

Schlussbericht vom 31.05.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20334 BG

Thema

Beeinflussung der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit des Schichtenverbundes bei Anwendung viskositätsverändernder organischer Zusätze im Asphalt

Berichtszeitraum

01.10.2018 bis 30.11.2021

Forschungsvereinigung

Deutsches Asphaltinstitut e.V. - DAI e.V. Ennemoserstraße 10 53119 Bonn]

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1 Technische Universität Dresden Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau Georg-Schumann-Str. 7 01062 Dresden

Forschungseinrichtung 2 RWTH Aachen Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen Mies-van-der-Rohe-Straße 1 52074 Aachen



Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG	1
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1	Versuche zum Schichtenverbund	4
2.1.1	Statische Versuche	5
2.1.2	Dynamische Versuche	7
2.1.3	Prüfprogramm zur Untersuchung der zyklische Schersteifigkeit	10
2.1.4	Prüfprogramm zur Untersuchung der zyklische Scherermüdung	15
2.2	Auswertung der Untersuchungen zum Schichtenverbund	17
2.2.1	Vorgehensweise für die Berechnung der Schersteifigkeit	17
2.2.2	Erweiterter Ansatz für die Berechnung der Schersteifigkeit	21
2.2.3	Bewertung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit vom Scherweg	23
2.2.4	Vorgehensweise für die Berechnung der Scherermüdung	24
2.3	Prüfverfahren zur Untersuchung des Materialverhaltens von Asphalt	28
2.3.1	Spaltzug-Schwellversuch	28
2.4	Dimensionierung und Bewertung von Asphaltbefestigungen	32
2.4.1	Vorgehensweise für die Durchführung des Ermüdungsnachweises	32
2.4.2	Darstellung der Ergebnisse	38
3	METHODISCHES VORGEHEN	40
3.1	Auswahl der Materialien	40
3.2	Untersuchungsmatrix und Herstellung der Probekörper	42
3.2.1	Herstellung der Probekörper auf der Teststrecke	42
3.2.2	Herstellung der Probekörper im Labor	48
4	ERGEBNISSE DER LABORUNTERSUCHUNGEN	51
4.1	Ergebnisse der Schersteifigkeitsuntersuchungen	51
4.1.1	Vergleich zwischen den Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes bei	
	Asphaltschichten ohne und mit viskositätsverändernden Zusätzen	51
4.1.2	Untersuchungen des Einflusses der Probekörperherstellung im Labor und in	
	situ auf den Schichtenverbund	54
4.1.3	Untersuchung der Auswirkung verschiedener Zusätze auf den mit	
	unterschiedlichen Bitumenemulsionsarten und -mengen hergestellten	
	Schichtenverbund	56
4.1.4	Einfluss der verschiedenen viskositätsverändernden Zusätze kombiniert mit	
	unterschiedlichen Bindemittelsorten im Asphalt auf den Schichtenverbund	66
4.1.5	Einflüsse der eingesetzten Mengen an viskositätsverändernden Zusätzen und	
	der Temperatur der Unterlage	73

4.2	Ergebnisse der Scherermüdungsuntersuchungen	79
4.2.1	Einfluss bei Asphaltschichten ohne und mit viskositätsverändernden Zusätzen	
	auf die Scherermüdung	79
4.2.2	Ergebnisse der Vorversuche	79
4.2.3	Ergebnisse der Hauptversuche	88
4.3	Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche	102
4.3.1	Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Steifigkeitsverhalten	102
4.3.2	Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten	108
5	ERGEBNISSE DER PROGNOSERECHNUNGEN	112
5.1	Einfluss der Materialkombination auf den Ermüdungsstatus	112
5.2	Bewertung der Spurrinnenanfälligkeit	118
5.3	Einfluss des Schichtenverbundes auf den Ermüdungsstatus	119
6	ZUSAMMENFASSUNG	124
ABBILD	JNGSVERZEICHNIS	127
TABELL	ENVERZEICHNIS	134
LITERAT	URVERZEICHNIS	136
ANLAGE	N	140
Anlage 1:	Kontrollprüfungen aller Asphaltgemische (zu Abschnitt 3.1)	141
Anlage 2:	Übersicht der Versuchsergebnisse für jede Materialkombination (zu Abschnitt	
-	4.1.1)	149
Anlage 3:	Ergebnisse der Schersteifigkeiten für die Laborvarianten (zu Abschnitt 4.1.2)	154
Anlage 4:	Schersteifigkeiten und Mittelwert der mit verschiedenen Emulsionen und -	
	mengen geprüften Probekörper mittels zyklischem Scherversuch (zu Abschnitt	
	4.1.3)	155
Anlage 5:	Ergebnisse der statischen Abscherversuche nach LEUTNER (zu Abschnitt	
	4.1.3)	164
Anlage 6:	Ergebnisse der Schersteifigkeitsuntersuchungen bei Verwendung	
	unterschiedlicher Bindemittel (zu Abschnitt 4.1.4)	167
Anlage 7:	Ergebnisse der Schersteifigkeitsuntersuchungen bei 2 M% und 3 M%	
	Zusatz sowie 0°C, 10°C und 30°C der Asphaltbindeschichtunterlage (zu	
	Abschnitt 4.1.5)	170
Anlage 8:	Steifigkeitsverläufe der Hauptversuchsphase für die Ermüdungskurven der dritten Stufe. (zu Abschnitt 4.2.3)	170
		119

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abb.	Abbildung
Abs.	Abschnitt
ABS	Asphaltbinderschicht
AC B S	Asphaltbinderschicht-Besondere Beanspruchung
BM 1	Bindemittel 1
ADS	Asphaltdeckschicht
ATS	Asphalttragschicht
BAB	Bundesautobahn
BK	Belastungsklasse
E 1	Emulsion 1
E 2	Emulsion 2
GI.	Gleichung
SMA	Splittmastixasphalt
Tab.	Tabelle
vvZ	viskositätsverändernde Zusätze
Z 1	Zusatz 1
Z 2	Zusatz 2
Z 3	Zusatz 3

1 EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG

Das Forschungsvorhaben wurde in Zusammenarbeit des Institutes für Stadtbauwesen und Straßenbau der TU Dresden (Forschungsstelle 1) und dem Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen (Forschungsstelle 2) durchgeführt.

Das Asphaltpaket einer Straße besteht in der Regel aus einer Asphaltdeck-, einer Asphaltbinder- und einer Asphalttragschicht. Diese sind aufgrund der in den erwartenden nächsten Jahren zu weiter zunehmenden drastischen Verkehrsentwicklung und der negativen Auswirkungen des Klimawandels großen Beanspruchungen ausgesetzt. Die Schichten des Asphaltpaketes werden sowohl in vertikaler Richtung durch Radlasten als auch in horizontaler Richtung durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge beansprucht. Zusätzlich wirken witterungsbedingte Beanspruchungen. Die entstehenden Schubbeanspruchungen an und zwischen den Schichtgrenzflächen müssen durch bautechnische Maßnahmen so aufgenommen werden, dass horizontale Relativverschiebungen der Schichtgrenzflächen weitestgehend vermieden werden. Hierfür ist ein intakter Schichtenverbund notwendig. Bei teilweise gestörtem oder fehlendem Schichtenverbund wird die Tragwirkung der gesamten Befestigung verändert, so dass es zu einer Reduktion bzw. zu einem Verlust der Tragfähigkeit, vorzeitiger Materialermüdung und ggf. zum kompletten Lösen des Verbundes kommt. Die Folgen sind die Entstehung von Schäden sowie deutlich kürzere Nutzungsdauern der Gesamtbefestigung.

Während der Herstellung und des Einbaus der Asphaltmischgüter entstehen gesundheitsschädliche Dämpfe und Aerosole. Weiterhin wird vermehrt klimaschädliches CO₂ freigesetzt. Deshalb ist es notwendig, diese negativen Auswirkungen durch geeignete Maßnahmen zu senken. Dies geschieht durch den Einsatz von viskositätsverändernden Zusätzen, welche die Temperatur sowohl bei der Herstellung als auch beim Einbau des Asphaltmischgutes senken. Während des Einbaues und der Verdichtung des Asphaltes mit viskositätsverändernden Zusätzen kühlt der Asphalt ab und die Kristallisation der zugegebenen viskositätsverändernden Zusätze setzt ein. Seit geraumer Zeit werden aus der Praxis vermehrt Probleme mit nicht anforderungsgerechtem Schichtenverbund zwischen den Asphaltschichten von Straßenbefestigungen gemeldet. Es wird vermutet, dass der herzustellende Schichtenverbund durch die viskositätsverändernden Zusätze gestört wird. Dabei stellt sich die Frage, ob sich diese Zusätze während des Transportes und des Einbaus separieren, an der Oberfläche und / oder an der Schichtgrenze anreichern und damit die Adhäsion zwischen Bitumenemulsion, Bindemittel und Gesteinskörnungsoberflächen und somit den Schichtenverbund stören.

Das Hauptziel dieses Forschungsvorhabens bestand foglich darin, die Auswirkungen bzw. den Einfluss der Zugabe von viskositätsverändernden Zusätzen auf den Schichtenverbund zu untersuchen. Mit dem dynamischen Prüfverfahren zur Prüfung des Schichtenverbundes können die Wechselwirkungen aus wiederholter Verkehrsbelastung, Beschleunigungs- und Bremsvorgängen als auch witterungsbedingte Einwirkungen auf den Schichtenverbund umfangreich und detailliert geprüft werden. Dadurch ist es möglich, die Auswirkungen der viskositätsverändernden Zusätze auf den Schichtenverbund zwischen Asphaltschichten unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen.

Anhand der Ergebnisse sollen realitätskonforme Prognosen ermöglicht und Lösungen zur Neutralisierung des möglicherweise negativen Einflusses der Zusätze auf den Schichtenverbund aufgezeigt werden. Ziel ist das Erreichen einer langfristigen Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Straßenbefestigungen.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Eine umfassende Literaturrecherche hat keine aussagekräftigen wissenschaftlichen Erkenntnisse hervorgebracht.

BOMMERT [15] hat in seinen Untersuchungen die Wirksamkeit von Zusätzen auf die Verarbeitungseigenschaften von Gussasphalt und deren Auswirkungen, unter anderem auf den Schichtenverbund, untersucht. Zur Beurteilung des Schichtenverbundes wurde der statische Abscherversuch nach Leutner angewendet. Der Autor stellte fest, dass die Schersteifigkeit von den mit den Zusätzen Romonta N, Asphaltan A und Sasobit modifizierten Gussasphalt- und der Asphaltbinderschicht bei einer Temperatur von 220°C deutlich geringer ist, als bei 240°C. BOMMERT schlussfolgerte, dass die geringere Verzahnung die Ursache für geringere Scherfestigkeiten zwischen diesen sei. Durch visuelle Beurteilung der Scherflächen konnte BOMMERT keine Hinweise auf eine Anreicherung der Zusätze an der Schichtgrenze finden. Die Untersuchung von BOMMERT beschreibt zwar den Einfluss der Zusätze auf die Verklebung der Schichten, jedoch nur in unzureichender Weise den Einfluss auf den unter allen auftretenden Bedingungen wirksamen Verbund zwischen den Asphaltschichten.

WISTUBA UND RENKEN [33] führten unter anderem systematische Untersuchungen zur physikalischen Wirkungsweise der viskositätsverändernden Zusätze im Bitumen, der Alterungsneigung und der Wirkung der Zusätze auf die wichtigsten Asphalteigenschaften durch. Es wurden drei viskositätsverändernde organische Zusätze ausgewählt, die in einer Menge von jeweils 3 M.-%, bezogen auf das jeweilige Bindemittel, mit verschiedenen Bindemitteln vermischt wurden. Die Autoren stellten fest, dass die Adhäsion zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung beim Asphaltbindermischgut durch die Modifizierung der Zusätze meist begünstigt wird. Bei den untersuchten Splittmastixasphalten konnten jedoch keine Vorteile durch Modifizierung der Zusätze festgestellt werden. Durch die Verwendung viskositätsveränderter Bindemittel wird der Verformungswiderstand begünstigt. Darüber hinaus wurde berichtet, dass sich der Einsatz von Montanwachs und Fischer-Tropsch-Wachs (FT-Wachs) häufig ungünstig auf das Kälteverhalten auswirkt und durch den Einsatz des Amidwaches ein negativer Einfluss auf das Kälteverhalten vermieden werden kann. Bei den Ermüdungsversuchen stellten die Autoren fest, dass durch die Zugabe von Montanwachs und FT-Wachs die Ermüdungseigenschaften der Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichtvarianten nachteilig beeinflusst werden. Die Ermüdungseigenschaften der Asphaltbindervarianten werden durch Zugabe von Amidwachs (Licomont) praktisch nicht beeinflusst. Im Projekt wurden jedoch keine Untersuchungen zu der Auswirkung der Zusätze auf den Schichtenverbund durchgeführt.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass bisher noch keine systematischen Untersuchungen zum Einfluss von viskositätsverändernden Zusätzen auf den Schichtenverbund beschrieben worden sind. In den genannten Forschungsvorhaben wurden lediglich statische Versuche durchgeführt.

In diesem Forschungsprojekt wurden deshalb drei viskositätsverändernde Zusätze, variierender Menge zu verschiedenen Asphaltschichten mit unterschiedlichen Bindemitteln zugefügt, mit unterschiedlichen Bitumenemulsionen und –mengen kombiniert und der Einfluss der variierenden Größen untersucht. Des Weiteren wurde der Einfluss der Probekörperherstellung und der Temperatur der Unterlage analysiert. Die diesem Bericht zugrundeliegenden Untersuchungen umfassen umfangreiche Laboruntersuchungen und damit verbundene Auswertungen.

Mit Hilfe des Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen analog zur RDO-Asphalt 2009 [3] wurden die Auswirkungen der Verbundwirkung unter Verwendung von viskositätsverändernden Zusätzen auf das Ermüdungsverhalten der Asphaltbefestigung untersucht.

2.1 Versuche zum Schichtenverbund

In der Praxis findet lediglich die Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER [5] Anwendung. Diese bezieht aber nicht die den Schichtenverbund beeinflussenden Faktoren ein. In diesem Projekt wird deshalb die zyklische Prüfung des Schichtenverbundes gemäß Arbeitsanleitung (AL) "Zyklischer Scherversuch"- Schersteifigkeit, Teil 48 [2], unveröffentlicht in Anwendung gebracht. Die in [2] beschriebene Vorgehensweise wurde an der Professur für Straßenbau der TU Dresden entwickelt und stetig erweitert.

Die von der FS 2 durchgeführten Prüfungen zur Scherermüdung wurden auf die Versuchsmatrix, welche sowohl auf den Erkenntnissen eines Vorgängerprojekts [31] basiert, als auch aus eigenen Überlegungen hinsichtlich Relevanz und Durchführbarkeit einzelner Parametervariationen entwickelt.

2.1.1 Statische Versuche

In Deutschland basiert die Beurteilung des Schichtenverbundes einer Asphaltbefestigung derzeit nach einem von LEUTNER entwickelten Prüfverfahren. Dieses ist in der Technischen Prüfvorschrift TP Asphalt-StB, Teil 80 Abscherversuch [5] geregelt. Die Mindestdicke der abzuscherenden Schicht beträgt 20 mm. Die darunter liegenden Schichten bzw. Lagen müssen insgesamt eine Dicke von mindestens 70 mm aufweisen. Für die Prüfung werden zwei Bohrkerne pro Entnahmestelle und einem Durchmesser von 150 \pm 2 mm verwendet. In Abb. 2-1 ist die in Deutschland verwendete Schervorrichtung dargestellt.

Dieser Versuch wird bei einer Temperatur von 20°C, einer Scherkraft von maximal 28 kN und einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 \pm 2 mm/min durchgeführt.

Die zur Abscherung notwendige Kraft wird als Kriterium für die Beurteilung des erzielten Schichtenverbundes herangezogen. Im Ergebnis erhält man aus dem Mittelwert der beiden Bohrkerne ein Kraft-Weg-Diagramm, wie Abb. 2-2 zeigt.



Abb. 2-1 Aufbau der Schervorrichtung gemäß TP Asphalt-StB, Teil 80 [5]



Abb. 2-2 Kraft-Weg-Diagramm gemäß TP Asphalt-StB, Teil 80 [5]

Momentan existieren weltweit viele unterschiedliche Prüfgeräte, welche für statische Abscherversuche verwendet werden [5], [26], [29], [16], [32], [22], [23]. Jedoch finden die zusätzlich zur Scherkraft zwischen zwei Asphaltschichten bzw. – lagen auftretenden Normalspannungen keine Berücksichtigung.

Mit diesen Prüfverfahren können die in der Straßenbefestigung herrschenden Beanspruchungen infolge einer wiederholten Belastung nicht simuliert werden. Somit sind die statischen Abscherversuche für die Ableitung von Materialparametern, die für die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen zur Berücksichtigung der Verbundwirkung sowie für eine Prognose der Nutzungsdauer der Straßenbefestigung benötigt werden, nicht geeignet.

2.1.2 Dynamische Versuche

Zur Prüfung von Asphaltprobekörpern unter realitätsnahen Bedingungen wurden Prüfgeräte entwickelt, mit denen es möglich ist, über zyklische Lasten Scherbeanspruchungen unter Zusammenwirkung mit Normallasten in die Probekörper einzuleiten. Diese Geräte können teilweise sowohl für statische als auch dynamische Versuche verwendet werden [27], [18], [17], [19], [28], [30]. Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Prüfablaufs, der Belastungsart, der Prüftemperatur und der Normalspannung.

WELLNER und ASCHER [30] entwickelten eine Prüfvorrichtung, welche die den Schichtenverbund beeinflussenden Faktoren Normalspannung, Temperatur und Belastungsfrequenz abbilden. Dadurch wurde es möglich, den Schichtenverbund beanspruchungsgerecht zu prüfen.

Das Prüfprogramm beinhaltete neun Scherwege, sechs Frequenzen, sechs Normalspannungen und fünf Temperaturen. Eine Übersicht des Prüfprogramms zeigt Abb. 2-3. Allerdings musste die Einstellung der Normalkraft durch Umstellung des Kompressordrucks und der Prüftemperatur manuell erfolgen.



Abb. 2-3 Ablauf des Prüfprogramms nach WELLNER und ASCHER [30]

Für das IGF Forschungsvorhaben "Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt" [31] wurde eine neue Prüfvorrichtung entwickelt. Diese stellte eine verbesserte Version der von WELLNER und ASCHER [30] konzipierten Prüfvorrichtung dar.

Auf Basis der von WELLNER und HRISTOV [31] entwickelten Prüfvorrichtung erfolgte für dieses Forschungsvorhaben eine Optimierung des Prüfeinsatzes. Um die auf den Probekörper wirkende Normalkraft in horizontaler Richtung korrekt aufzuzeichnen, wurde eine weitere Kraftmessdose eingebaut. Zusätzlich wurde die Prüfvorrichtung um Kragarme im vorderen Bereich erweitert, um so eine Aussteifung der Prüfmaschine zu erreichen (Abb. 2-4). Dies war notwendig, weil es zu messbaren horizontalen Verschiebungen des vertikalen Rahmens kam. Der Prüfeinsatz wurde in die servohydraulische Prüfmaschine Typ LH 08 63/50S eingebaut. Die Prüfmaschine verfügt über eine Temperierkammer, welche sowohl die Prüfvorrichtung als auch den Probekörper während des Versuchs konstant temperiert. Die Temperatur wurde jeweils stufenlos über einen Sensor geregelt.





Abb. 2-4 Servohydraulische Prüfmaschine mit Prüfvorrichtung (links) und mit eingebautem Probekörper und geschlossener Prüfvorrichtung (rechts)

Zur Prüfung des materialabhängigen Schichtenverbundes sind vorab die zu prüfenden Probekörper, welche sowohl aus Platten im Labor hergestellt als auch aus der Fahrbahn entnommen werden können, in definierte Stahlschalen einzukleben. Der Durchmesser der Probekörper muss dabei 100 ± 2 mm betragen und eine Dicke von max. 80 cm haben. Die unteren Stahlschalen werden in einer Klebevorrichtung fixiert, wobei der Abstand zwischen den Stahlhalbschalen 1 mm betragen muss. Der Kleber, hier ein Zwei-Komponenten-Kleber auf Epoxidharzbasis, welcher eine hohe Steifigkeit aufweist, wird vollflächig auf die Stahlhalbschalen aufgetragen, der Probekörper eingelegt und mit den oberen Stahlhalbschalen, die ebenfalls mit dem Zwei-Komponenten-Kleber eingestrichen sind, verbunden. Auch hier ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen den Halbschalen von 1 mm eingehalten wird. Zum Aushärten des Klebers müssen die Probekörper mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur gelagert werden (siehe Abb. 2-5).



Abb. 2-5 Einkleben eines Probekörpers in die Stahlhalbschalen, Probekörper in untere Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte), Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts)

Der in den Stahlhalbschalen eingeklebte und mit Schrauben fixierte Probekörper wird in die Prüfvorrichtung eingesetzt und in der Schervorrichtung so befestigt, dass eine Hälfte der Probe in A und die andere Hälfte in B liegt (1). Auch hier beträgt der Abstand zwischen den Scherbacken 1 mm (2), was bereits durch den in die Stahlhalbschalen eingeklebten Probekörper vorgegeben ist. Die Probe wird in horizontaler und vertikaler Richtung mit Schrauben befestigt, um eine Bewegung in der Prüfvorrichtung zu verhindern. In vertikaler Richtung wird eine zyklische maximale Scherkraft und in horizontaler Richtung eine statische Normalkraft unterschiedlicher Größenordnung aufgebracht. Die Scherkraft wird auf die eine Hälfte des Probekörpers durch den Hydraulikzylinder der servohydraulischen Prüfmaschine über die vertikal bewegliche Scherbacke A aufgebracht. Die zweite Hälfte der Probe wird in der Scherbacke B gehalten. Der Normaldruck wird auf die Rückseite der Asphaltprobe (Scherbacke B) über einen Pneumatikzylinder durch eine Stahlplatte aufgebracht. Um dem Normaldruck entgegenzuwirken, muss an die Stirnseite der Probe eine an der Scherbacke A befestigte zweite Stahlplatte mit Hilfe der Gewindespindel angedrückt werden. Der vertikale Scherweg wird durch zwei an der Scherbacke A befestigte induktive Wegaufnehmer gemessen. Das mechanische Modell der Prüfvorrichtung ist in Abb. 2-6 dargestellt.



Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung

2.1.3 Prüfprogramm zur Untersuchung der zyklische Schersteifigkeit

Für die Versuchsdurchführung wurde ein umfangreiches Prüfprogramm erarbeitet und realisiert. In Form von Multistage-Versuchen wurden Prüffrequenz, Prüftemperatur, aufgebrachte Normalkraft und erzwungener Scherweg variiert, wobei der Scherweg gemäß AL "Zyklischer Scherversuch"-Schersteifigkeit, Teil 48 [2] nach oben hin begrenzt und im Vorversuch festgelegt wurde (siehe Tab. 2-1).

		Betra	grenze	
Gesamtasphaltdicke	Prüftemperatur	ADS-ABS ^{bzw.} ADS-ATS	ABS-ATS	ATS-ATS
	-10 °C	0,03	3 mm	-
< 22.0m	+10 °C	0,07 mm		-
	+30 °C	0,11 mm		-
	+50 °C	0,15 mm		-
	-10 °C	0,02 mm		
> 22 cm	+10 °C		0,05 mm	
> 22 011	+30 °C		0,08 mm	
	+50 °C	0,11 mm		

Tab. 2-1 Maximal aufzubringende Scherwege in Abhängigkeit von der Temperatur [2]

Jeder Probekörper wurde bei vier verschiedenen Prüftemperaturen (-10°C, 10°C, 30°C, 50°C) geprüft. Für jede Temperatur wurde ein maximal zu erreichender Scherweg ermittelt. Bei jeder Prüftemperatur wurde die Probe mit vier Normalspannungen (900 kPa, 600 kPa, 300 kPa, 0 kPa) belastet. In jeder Normalspannungsstufe wiederum wurde die Prüffrequenz fünffach variiert (10 Hz, 3 Hz, 1 Hz, 0,3 Hz, 0,1 Hz). In Abhängigkeit von der Prüffrequenz wurde die je Belastungszustand aufzubringende Anzahl an Lastwechseln (LW) festgelegt. Für die Auswertung wurden jeweils die fünf letzten Lastwechsel herangezogen (siehe Tab. 2-2).

Tab. 2-2 Variation de	r Belastungsfrequenz,	Anzahl der	Lastwechsel	und Num	nmer der	ausgewerte-
ten Lastwechsel						

Lfd. Nr.	Frequenz	Anzahl der Last- wechsel	Lastwechselanalyse
1	10,0 Hz	60	56 bis 60
2	3,0 Hz	30	26 bis 30
3	1,0 Hz	18	14 bis 18
4	0,3 Hz	13	9 bis 13
5	0,1 Hz	8	4 bis 8

Wie bereits ausgeführt, erfolgte die Versuchsdurchführung ohne manuellen Eingriff. Dafür wurde die Prüfsoftware der GEOSYS verwendet. Alle die den Schichtenverbund beeinflussenden Parameter wurden in eine "Maske" eingegeben und der Versuch gestartet. Diese "Maske" musste nur beim ersten Versuch angelegt werden, da der Versuchsablauf für alle Probekörper gleich war (siehe Abb. 2-7).

Parameter	Wert	_	Parameter	Wert	4
Temperature variables (Tabelle 6)			Comment_4		
	60 min	1	Frequency variables (Tabelle 4)		2
Number of temperatures	4		Number frequencies	5	
Temperature No. 1	-10,9 °C		Frequency No. 1	10 Hz	1.1.1.
Tempering time of T1	270 min		Number of cycles for frequency No. 1	60	
Temperature No. 2	9,6 °C		Frequency No. 2	3 Hz	
Tempering time of T2	270 min		Number of cycles for frequency No. 2	30	
Temperature No. 3	30 °C		Frequency No. 3	1 Hz	
Tempering time of T3	270 min		Number of cycles for frequency No. 3	18	
Temperature No. 4	50,5 °C		Frequency No. 4	0,3 Hz	
Tempering time of T4	270 min		Number of cycles for frequency No. 4	13	
Temperature No. 5	-10 °C		Frequency No. 5	0,1 Hz	
 Tempering time of T5 	101 min		- Number of cycles for frequency No. 5	8	•

Parameter	Wert	
max Shear delta for T1	30 µm	•
max Shear delta for T2	70 µm	3
max Shear delta for T3	110 µm	
max Shear delta for T4	150 µm	
max Shear delta for T5	30 µm	
Axial stress (Tabelle 5)		
Number of constant axial stress loops	4	
Constant axial stress No. 1	361 kPa	
Constant axial stress No. 2	240 kPa	
Constant axial stress No. 3	115 kPa	
Constant axial stress No. 4	0 kPa	
Constant axial stress No. 5	380 kPa	

Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer (1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS"

Der Versuch startete bei

- Temperatur $T_i = -10^{\circ}$ C
- Normalspannung $\sigma_N = 900 \text{ kPa}$
- Frequenz f = 10 Hz

• Maximaler Scherweg $s = 30 \ \mu m$.

Vor jeder zu prüfenden Temperatur wurde die Prüfzelle mit eingebautem Prüfkörper für 270 Minuten auf die jeweilige Prüftemperatur temperiert und für die Dauer des Versuches gehalten. Vor jeder Temperaturänderung wurde ein Vorversuch mit einer Frequenz von 10 Hz, der maximalen Normalspannung von 900 kPa, einer maximalen Scherkraft von 8 kN und einer Scherwegamplitude, welche bei 30 µm beginnt, gefahren. Die Scherwegamplituden sind anschließend in nicht mehr als 20 Stufen bzw. in 5%-Schritten der Amplitudengrenzwerte mit nicht mehr als 20 Zyklen je Stufe so weit zu steigern, bis eine Kraftamplitude von mindestens 8 kN erreicht wird [2]. In diesem Vorversuch wurden die Startparameter (Kraft oder Weg) für den sich anschließenden Hauptversuch ermittelt.

Insgesamt betrug die Temperierzeit für einen Versuch 19 Stunden und die Versuchszeit ca. 3 Stunden, so dass eine Gesamtdauer von ca. 22 Stunden für einen Versuch eingeplant werden muss.

Der Versuch endete bei

- Temperatur $T_i = 50^{\circ}$ C
- Normalspannung $\sigma_N = 900 \text{ kPa}$
- Frequenz f = 10 Hz
- Maximaler Scherweg $s = 150 \ \mu m$.

Der schematische Ablauf des Prüfprogrammes ist in Abb. 2-8 dargestellt.



Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch

Die Schersteifigkeitsversuche werden gemäß AL Zyklischer Scherversuch -Schersteifigkeit, Teil 48 [2] mit einer Dreifachbelegung durchgeführt. Im Falle einer geringeren zur Verfügung stehenden Anzahl an Probekörpern (durch nicht korrektes Einkleben oder Schädigung während der Versuchsdurchführung) als grundsätzlich angedacht, muss von einer Dreifachbelegung abgewichen werden.

2.1.4 Prüfprogramm zur Untersuchung der zyklische Scherermüdung

Um einen strukturierten Aufbau einer Versuchsmatrix gewährleisten zu können, wurde ein stufenförmiger Aufbau gewählt (siehe Abb. 2-9). Die Entwicklung der Versuchsmatrix basiert sowohl auf den Erkenntnissen des Vorgängerprojekts (IGF-Vorhaben Nr. 17634 BG) [31], als auch aus eigenen Überlegungen hinsichtlich Relevanz und Durchführbarkeit einzelner Parametervariationen.



Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen

Die Input-Parameter für Ermüdungsversuche des dynamischen Schichtenverbunds sind die Prüftemperatur, die Prüffrequenz, die aufzubringende Normalkraft und die Scheramplitude. In der Phase der Vorversuche wurde die Prüffrequenz f auf 10 Hz festgelegt. Für jeden einzelnen Vorversuch wurden eine konstante Prüftemperatur T (-10°C, 20°C, 50°C) und eine konstante Normalkraft N (0 MPa, 0,45 MPa, 0,9 MPa) festgelegt (siehe Abb. 2-10). Die in 25 Phasen aufgebrachte Scheramplitude ŝ wurde stufenweise gesteigert (siehe Abb. 2-11). Aus den Daten des jeweils doppelbelegten Vorversuchs soll die Ermittlung von drei Scheramplituden für die Hauptversuchsphase erfolgen.



Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase





Den detaillierte Verlauf des Amplituden-Sweeps zeigt Tab. 2-3.

Stufe n	Scheramplitude [mm]
1	0,008
2 bis 20	0,008 + n*0,005
21 bis 23	0,1+(n-20)*0,01
24	0,15
25	0,2

2.2 Auswertung der Untersuchungen zum Schichtenverbund

Bei der Auswertung der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zum zyklischen Schersteifigkeitsversuch wurden verschiedene Methoden einbezogen. Zunächst wurde der Ansatz nach WELLNER und HRISTOV [31] in Anwendung gebracht. Dieser wurde im Rahmen der Projektbearbeitung so erweitert, dass die Schersteifigkeit für jede beliebige Normalspannung berücksichtigt werden kann. Für die Scherermüdungsprüfungen wurde ebenfalls die bestehende Methode aus einem Vorgängerprojekt [31] erweitert.

2.2.1 Vorgehensweise für die Berechnung der Schersteifigkeit

Für die Visualisierung der experimentell bestimmten Schersteifigkeiten kann das von ASCHER [12] erstellte Diagramm verwendet werden (siehe Abb. 2-12). Dargestellt ist der Verlauf der Schersteifigkeit in MPa (rote Linie), die Normalspannung in kPa (grüne Linie), die Prüftemperatur in °C (blaue Linie) und die Frequenz in Hz (schwarze Linie). Die Frequenz wurde aus Gründen der besseren Erkennbarkeit zweifach überhöht dargestellt. So können die den Schichtenverbund beeinflussenden Parameter, siehe. Abb. 2-8, anschaulich dargestellt werden.



Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]

Zur Berechnung der Schersteifigkeit werden je Belastungskombination die im Versuch aufgezeichneten Messwerte der Scherwege und Scherkräfte durch überlagerte Sinusregressionen geglättet. Aus den ermittelten Regressionsverläufen werden dann je Zyklus die Mini- und Maximalwerte ausgelesen und für die eigentliche Berechnung der maßgebenden Scherspannungen genutzt. Um Abweichungen am Anfang eines Versuches zu vernachlässigen, wurden jeweils nur die Daten der letzten fünf Zyklen herangezogen.

Die Scherspannung ergibt sich unter Anwendung physikalischer Bedingungen gemäß dem Ansatz in Gleichung GI. 2-1.

Für kleine Scherwinkel kann t $\tan \gamma_S \approx \gamma_S$ angenommen werden. Die Scherdehnung γ_S kann als das Verhältnis des Scherweges sw zur Spaltbreite zwischen den Stahladaptern dargestellt werden.

$$\tan \gamma_S = \gamma_S = \frac{s_w}{d_s}$$
 Gl. 2-2

Die Scherspannung τ_s lässt sich gemäß Gl. 2-3 aus der Amplitude der im Versuch aufgebrachten vertikalen Kraft, der Scherkraft F_s und der Querschnittsfläche A des Prüfkörpers berechnen.

$$\tau_S = \frac{F_s}{A} \qquad \qquad \text{GI. 2-3}$$

Die Schersteifigkeit G_S kann somit wie folgt berechnet werden:

$$G_s = \frac{\tau_s}{\gamma_s} = \frac{\frac{F_s}{A}}{\left(\frac{S_w}{d_s}\right)}$$
Gl. 2-4

mit:

G _S	Schersteifigkeit	[MPa]
F_S	Scherkraftamplitude	[N]
γs	Scherdehnung	[-]
$ au_S$	Scherspannung	[MPa]
Α	Fläche des Interface	[mm ²]
Sw	Scherwegamplitude	[mm]

*d*_s Spaltbreite zwischen den Stahladaptern, 1 mm [mm]

Um die frequenz-, normalspannungs- und temperaturabhängige Veränderung der Schersteifigkeit funktional beschreiben zu können, stehen verschiedene Modellansätze zur Verfügung. Am weitesten verbreitet ist die Anwendung von Sigmoidfunktionen. Diese zeigt für die funktionale Beschreibung der Schersteifigkeit nach aktuellem Kenntnisstand die beste Anpassung (für minimale, G_{s,min}, und maximale Schersteifigkeit, G_{S,max}). Die Darstellung des frequenz-, normalspannungs- und temperaturabhängigen Verhaltens der untersuchten Materialien kann somit in Form von Hauptkurven (auch Masterkurven genannt) erfolgen. Beschrieben werden die Hauptkurven durch materialspezifische Funktions- bzw. Modellparameter, die als dimensionierungsrelevante Materialkennwerte für Dimensionierungs- bzw. Prognoserechnungen genutzt werden können.

Zur Erstellung der Masterkurve wird die Schersteifigkeit G_s , wie auch beim Spalzug-Schwellversuch, in Abhängigkeit log($\alpha \tau^* f$) dargestellt (Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Prinzip).

Für die Berechnung des Verschiebungsfaktors α_T wird der Ansatz nach Arrhenius in Gl. 2-5 verwendet und für E_a/R (gemäß [31]) der Wert 32.000 angesetzt.

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-\frac{E_a}{R}} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_R + 273.15}\right)}$$
Gl. 2-5

$$m = \log(f \cdot \alpha_T) = \log\left(f \cdot \frac{1}{e^{-\frac{E_a}{R}}\left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_R + 273.15}\right)}\right)$$
Gl. 2-6

Für den funktionalen Ansatz der Masterfunktion ergibt sich nach [31] zur Beschreibung der Schersteifigkeit G_s :

$$G_{S} = G_{S,min} + \frac{(G_{S,max} - G_{S,min})}{1 + e^{(m \cdot a + b)}}$$
 GI. 2-7

mit:

m	Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Parameter	[Hz]
Gs,min	minimale Schersteifigkeit	[MPa]

$G_{s,max}$	maximale Schersteifigkeit	[MPa]
α_t	Verschiebungsfaktor	[-]
f	Frequenz	[Hz]
Т	Temperatur	[°C]
T_R	Referenztemperatur bei 20°C	[°C]
Ea	Aktivierungsenergie	[J/mol]
R	universelle Gaskonstante	[J/mol·K]
а	Regressionsparameter	[-]
b	Regressionsparameter	[-]

Zur Bestimmung der Parameter a und b in Gl. 2-7 ist der funktionale Zusammenhang zwischen Schersteifigkeit und Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Paramter zu fomulieren. Gemäß WELLNER und HRISTOV [31] lässt sich der Parameter a durch eine logarithmische Funktion (Gl. 2-8) und der Parameter b durch eine lineare Funktion (Gl. 2-9) beschreiben:

$$a = c \cdot ln(\sigma_{N,korr}) + d$$
 GI. 2-8

$$b = j \cdot \sigma_N + k \qquad \qquad \text{Gl. 2-9}$$

Die Parameter c, d, j und k in Gl. 2-8, Gl. 2-9 und Gl. 2-10 ergeben sich durch Regression von a (σ_N) und b (σ_N). Hierfür werden durch Variation der Parameter a und b in Gl. 2-7 die berechneten Schersteifigkeiten an die auf Versuchsdaten basierenden Schersteifigkeiten angepasst.

Somit folgt aus GI. 2-7 die Modellfunktion für die Berechnung der Schersteifigkeit für jede beliebige Temperatur und Frequenz und die einbezogenen Normalspannungen [31]:

$$G_S = G_{S,min} + \frac{G_{S,max} - G_{S,min}}{1 + e^{\left(m \cdot (c \cdot \ln(\sigma_{Nkorr}) + d) + (j \cdot \sigma_N + k)\right)}}$$
Gl. 2-10

In Abb. 2-13 ist eine Hauptkurve für die aus den Versuchsergebnissen berechneten Schersteifigkeiten für vier Temperaturen, vier Normalspannungen und fünf Frequenzen dargestellt.





2.2.2 Erweiterter Ansatz für die Berechnung der Schersteifigkeit

Da der Ansatz für die Berechnung der Schersteifigkeit nach WELLNER/HRISTOV [31] im Hinblick der Größe der versuchstechnisch aufzubringenden maximalen Normalspannung an seine Grenzen kam, wurde ein erweiterter Ansatz erarbeitet und in Anwendung gebracht. Zwar werden die Versuchsergebnisse innerhalb der Grenzen (0 MPa bis 0,9 MPa) der für den Versuch aufzubringenden Normalspannungen gut abgebildet, aber die Belastungen außerhalb dieser Grenzen der Normalspannung (> 0,9 MPa) können nicht abgebildet werden. Auch erfolgt keine Trennung der Einflüsse von Temperatur, Frequenz und Normalspannung in dem Parameter *a*.

Bei der Erweiterung des Ansatzes wird der Einfluss von Temperatur/Frequenz (m) und Normalspannung σ_N unabhängig voneinander betrachtet und entsprechend parametrisiert. Die GI. 2-7 wurde daher durch einen additiven linearen Term (c· σ_N) zur Beschreibung des Einflusses der Normalspannung, außerhalb der Grenzen, erweitert.

Damit stellt sich die erweiterte Hauptkurve wie folgt dar:

$$G_{S} = G_{S,min} + \frac{G_{S,max} - G_{S,min}}{1 + e^{(a \cdot m + b)}} + c \cdot \sigma_{N}$$
 GI. 2-11

Die durch den Term c· σ_N dargestellte Abhängigkeit der Schersteifigkeit, welche als annährend linear angenommen werden kann, ist in Abb. 2-14 und Abb. 2-15 für alle Temperaturen und Frequenzen dargestellt.



Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)



Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) und 50°C (rechts)

Ein Vergleich der Hauptkurven für ein ausgewähltes Beispiel zeigt, dass die Funktion nach WELLNER und HRISTOV [31] zwar eine bessere Anpassung aufweist (R²=0,995), aber die maximale Schersteifigkeit begrenzt ist. Hingegen kann die Schersteifigkeit bei dem erweiterten Ansatz für jede beliebige Normalspannung abgebildet werden (siehe Abb. 2-16).



Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)

2.2.3 Bewertung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit vom Scherweg

Die Auswertung und Bewertung der durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich verschiedener Einflussgrößen auf den Schichtenverbund zwischen zwei Asphaltschichten bzw. –probekörpern hat einen signifikanten Einfluss des Scherweges auf die Schersteifigkeit aufgezeigt. Ergänzend wurde daher, wie in Abb. 2-17 exemplarisch gezeigt, eine weitere Darstellung erarbeitet.

Die jeweils zu einem Pfad (wie in der linken Abbildung dargestellt) gehörenden Datenpunkte beschreiben die Schersteifigkeit für jeweils vier Normalspannungen und fünf Frequenzen bei einer Temperatur, gemäß Abb. 2-8. Die rechte Abbildung zeigt eine vergleichbare Darstellung für drei Probekörper. Der Zusammenhang zwischen Schersteifigkeit und Scherweg ist bei dieser Darstellung weitestgehend unabhängig von der Wahl des Probekörpers innerhalb einer Materialserie im Gegensatz zum Vergleich der Schersteifigkeiten verschiedener Probekörper auf Grundlage der Darstellung in Abb. 2-12.



Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)

2.2.4 Vorgehensweise für die Berechnung der Scherermüdung

Die Durchführung der Hauptversuche erfolgt bei konstanter Prüftemperatur, konstanter Normalkraft und konstanter Scheramplitude. Aus den kontinuierlich aufgezeichneten Rohdaten erfolgt die Berechnung der Scherspannung und Schersteifigkeit nach den folgenden Gleichungen (Gl. 2-12 und Gl. 2-13):

Scherspannung

$$\tau_i = \frac{F_i}{A_{eff}}$$
 GI. 2-12

Schersteifigkeit:

$$K_{s,i} = \frac{\tau_i}{U_i}$$
GI. 2-13

mit:

$ au_i$	Amplitude der Scherspannung bei Lastwechsel i		[MPa]
F _i	Kraftamplitude bei Lastwechsel i		[N]
4 _{eff}	wirksame Querschnittsfläche		[mm]
K _{s,i}	Schersteifigkeit bei Lastwechsel i		[MPa/mm]
U _i	Amplitude der relativen Verschiebung zwischen Schichten bei Lastwechsel i	den	[mm]

Das Ziel der Festlegung von Scheramplituden für den Hauptversuch anhand der Daten der Vorversuche ist dadurch motiviert, den Ermüdungsversuch in der Hauptversuchsphase im elastoplastischen Bereich des Materials bzw. der Materialkombination durchzuführen.

So wurden 3 Scheramplituden nach dem folgendem Verfahren ausgewählt. Zunächst wird die Laststufe der maximalen Kraftamplitude ausgewählt. Abhängig von der Scheramplitude in dieser Laststufe, wurden Amplituden ausgewählt, welche 25%, 50% und 75% dieser entsprechen. Durch diese Vorgehensweise in Kombination mit der Kontrolle der Linearität der berechneten Schersteifigkeit, wurde der Arbeitsbereich des elastoplastischen Materialverhaltens sichergestellt (siehe Abb. 2-18 bis Abb. 2-20).

Mit den im Vorversuch ermittelten Amplituden werden die Hauptversuche mit den konstanten Parametern Prüftemperatur, Prüffrequenz, Prüfamplitude und aufzubringende Normalkraft durchgeführt. Analog zum Vorversuch erfolgt die Berechnung der Schersteifigkeit über GI. 2-12 und GI. 2-13.

Wie im Vorgängerprojekt (IGF-Vorhaben Nr. 17634 BG) [31] vorgeschlagen, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Ermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbunds über die Schersteifigkeit. Als Ermüdungskriterium wird die Lastzahl Nf/50 ermittelt, welche die Anzahl an Lastwechseln beziffert, an der die ursprüngliche Schersteifigkeit des Probekörpers um 50% reduziert ist. Die zum Zeitpunkt des Erreichens des Ermüdungskriteriums aufgezeichnete Lastwechselzahl wurde als Eingangsgröße für die Erstellung der Ermüdungskurve ermittelt (siehe Abb. 2-19).



Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch



Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase

Um Einschwingvorgänge im Regelvorgang der Prüfmaschine zu berücksichtigen und die Initialsteifigkeit erst im eingeschwungenen Zustand zu ermitteln, wurde diese erst ermittelt, wenn die Amplitude konstant im Bereich Sollamplitude ±0,001mm eingestellt wurde (siehe Abb. 2-20).



Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude

Da jeder Hauptversuch bei drei Scheramplituden und dreifachbelegt durchgeführt worden ist, ergibt sich für den Standardfall für jede Variante mit zugehöriger Temperatur und Normalkraft die Ermüdungskurve definiert über neun Punkte. Diese Punkte werden über den Funktionsansatz nach GI. 2-14 in eine Potenzfunktion überführt. Diese Funktion nennt sich Wöhler- bzw. Ermüdungskurve.

$$\varepsilon_i = C_1 \cdot N^{C_2} \qquad \qquad \text{Gl. 2-14}$$

mit:

 ε_i Scheramplitude

[mm]

- N Lastwechselzahl bei Erreichen des Ermüdungskriteriums
- C₁ Parameter der Ermüdungsfunktion
- C₂ Exponent der Ermüdungsfunktion

Diese Ermüdungskurve stellt sich in einem doppelt logarithmischen Diagramm als Gerade dar. Durch gleichzeitiges Eintragen der Ermüdungskurven verschiedener Materialvarianten bei identischer Prüfkonfiguration hinsichtlich Temperatur und Normalkraft, kann eine Vergleichbarkeit hergestellt werden. Das über die Wöhler-Kurve definierte Materialgesetz kann über eine Extrapolation ebenfalls Aussagen über Scheramplituden liefern, welche versuchstechnisch nicht angesprochen wurden.

2.3 Prüfverfahren zur Untersuchung des Materialverhaltens von Asphalt

Zur Untersuchung des Materialverhaltens von Asphalt existieren zahlreiche verschiedene Prüfverfahren. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden zur Bewertung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens der einbezogenen Asphalte Spaltzug-Schwellversuche durchgeführt.

2.3.1 Spaltzug-Schwellversuch

Der Spaltzug-Schwellversuch gilt als ein relativ einfaches, schnelles und kostengünstiges dynamisches Prüfverfahren. Mittels des Spaltzug-Schwellversuches können Eingangsparameter für die Dimensionierung und Bewertung von Asphaltschichten bei Anwendung der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichtgemischen bestimmt werden.

Die Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche im Rahmen des Forschungsauftrages erfolgte in Anlehnung an die TP Asphalt, Teil 24 (Ermüdungsverhalten) [10] und Teil 26 (Steifigkeitsverhalten) [11]. Die maßgebenden Versuchsbedingungen sind in Tab. 2-4 zusammengefasst.

Untersuchungskriterium	Steifigkeit	Ermüdung
Temperatur [°C]	-10 / 5 / 20	20
Frequenz [Hz]	10 / 3 / 1 / 0,3/ 0,1	10
Unterspannung [MPa]	0,035	0,035
Zulässige horizontale Anfangsdehnung [‰]	0,05 bis 0,10	0,05 bis 0,30
Anzahl an Wiederholungen [-]	3	3x3

Tab. 2-4 Versuchsbedingungen im Spaltzug-Schwellversuch zur Untersuchung des Steifigkeitsund Ermüdungsverhaltens von Asphaltgemischen

Beim Spaltzug-Schwellversuch werden zylindrische Probekörper über zwei auf der Mantelfläche diametral gegenüber liegende Lasteintragungsschienen sinusförmig druck-schwellbelastet, woraus in horizontaler Richtung im Probekörper eine Zug-Schwellbeanspruchung entsteht (siehe Abb. 2-21). Während des Versuches wird die aus der vertikalen Belastung resultierende horizontale Gesamtverformung gemessen und aufgezeichnet.





Die Durchführung der Ermüdungsversuche erfolgt an zylindrischen Asphaltprobekörpern, welche eine konstante Prüftemperatur von T = 20°C aufweisen und einer Belastung bei unterschiedlichen Dehnungsniveaus bis zum Bruch der Probe. In Auswertung der jeweiligen elastischen Anfangsdehnung sowie der ertragenen Lastwechselanzahl bis zum Makroriss können die Parameter der Ermüdungsfunktion bestimmt werden. Ergebnis des Versuchs ist eine dehnungsbasierte Ermüdungsfunktion, welche exemplarisch in Abb. 2-22 dargestellt ist. Für die funktionale Beschreibung der Ermüdungsfunktion dient GI. 2-15. Nach Bestimmung der Parameter der Ermüdungsfunktion kann für jede beliebige Dehnung die maximal ertragbare Anzahl an Lastwechsel ermittelt werden.



Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion

$$N_{Makro} = \mathbf{k} \cdot \varepsilon_{el,anf}^{n}$$
 GI. 2-15

mit:

 N_{Makro} Anzahl der Lastwechsel bis zum Makroriss[-] $\varepsilon_{el,anf}$ anfängliche elastische Dehnung in Probekörpermitte[‰]k, nmaterialspezifische Parameter der Ermüdungsfunktion[-]

Die Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche zur Untersuchung der Steifigkeit erfolgt aufgrund des ausgeprägten temperatur- und frequenzabhängigen Steifigkeitsverhaltens von Asphalt bei unterschiedlichen Prüftemperaturen und -frequenzen. Als Ergebnis erhält man eine Hauptkurve, aus welcher die Modellparameter des absoluten E-Moduls (Steifigkeitsmodul) gemäß Gl. 2-16 bestimmt werden können. Nach Ermittlung der Hauptkurve kann unter Verwendung von Gl. 2-16 in Zusammenhang mit Gl. 2-17 und Gl. 2-18 für jede beliebige Kombination aus Temperatur und Frequenz der absolute E-Modul (Steifigkeitsmodul) errechnet werden. In Abb. 2-23 ist exemplarisch eine Hauptkurve dargestellt.

$$|E| = E_{min} + \frac{E_{max} - E_{min}}{1 + e^{(z_1 \cdot x^* + z_0)}}$$
Gl. 2-16

mit x*:

$$x^* = \log_{10}(\alpha_T \cdot f)$$
 GI. 2-17

mit α_T :

$$\alpha_T = e^{\mathbf{m} \cdot \left(\frac{1}{\mathbf{T} + 273, 15} - \frac{1}{\mathbf{T}_{\mathbf{R}} + 273, 15}\right)}$$
 GI. 2-18

Nach Einsetzen von GI. 2-18 in GI. 2-17 folgt:

$$x^* = \log_{10} \left(e^{\mathbf{m} \cdot \left(\frac{1}{\mathbf{T} + 273, 15} - \frac{1}{\mathbf{T}_{\mathsf{R}} + 273, 15} \right)} \cdot f \right)$$
Gl. 2-19

mit:

E	absoluter E-Modul (Steifigkeitsmodul), entspricht dem Betrag des komplexen E-Moduls	[MPa]
E_{max}	oberer Grenzwert des absoluten E-Moduls	[MPa]
E_{min}	unterer Grenzwert des absoluten E-Moduls (E_{min} = 0)	[MPa]
z_{1}, z_{0}	materialspezifische Parameter der Hauptkurve	[-]
<i>x</i> *	beliebiger Abszissenwert bestimmt über die Temperatur- Frequenz-Äquivalenz	[-]
М	Parameter für Temperaturshift	[-]
T, T_R	Temperatur, Referenztemperatur (i.d.R. 20°C]	[°C]
f	Frequenz	[Hz]
α_T	Verschiebungsfaktor	[-]



Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls |E|

2.4 Dimensionierung und Bewertung von Asphaltbefestigungen

Unter Einbeziehung der im Rahmen des diesem Bericht zugrundeliegenden Forschungsvorhabens erhobenen Versuchsergebnisse wurden Prognoserechnungen durchgeführt, welche die Auswirkungen bzw. den Einfluss der viskositätsverändernden Zusätze auf die Dauerhaftigkeit ausgewählter Straßenbefestigungen auf der Grundlage realitätsnaher Annahmen für das Verhalten der Asphaltgemische und der Straßenbefestigung ermöglichen. Hierbei werden die Kriterien Ermüdungsrissbildung und Spurrinnenbildung innerhalb des Asphaltpaketes berücksichtigt.

2.4.1 Vorgehensweise für die Durchführung des Ermüdungsnachweises

Für die Durchführung des Ermüdungsnachweises auf Grundlage des Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen analog zu den RDO Asphalt 2009 [3] sind sowohl dimensionierungsrelevante Materialkennwerte also auch temperatur- und verkehrslastbedingte Eingangsgrößen erforderlich. Zu den dimensionierungsrelevanten Materialkennwerten gehören das temperatur- und frequenzabhängige Steifigkeitsverhalten sowie das belastungsabhängige Ermüdungsverhalten (siehe Abb. 2-22 und Abb. 2-23). Da sich Asphalt deutlich temperaturabhängig verhält, ist i.d.R. auch die Änderung der Temperatur innerhalb der Asphaltschicht in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur zu berücksichtigen (siehe Abb. 2-24). Nach den RDO Asphalt 09 sind für 13 charakteristische Oberflächentemperaturen von -12,5 °C bis 47,5 °C die in Abb. 2-25 dargestellten Temperaturänderungsverläufe einzubeziehen und in Abhängigkeit der sich jeweils lokal einstellenden Temperatur die Steifigkeit des Asphalts zu bestimmen und entsprechend zu berücksichtigen.


Abb. 2-24: Änderung der Temperatur innerhalb des Asphaltpaketes in Abhängigkeit von charakteristischen Oberflächentemperaturen gemäß RDO 09 [3]



Abb. 2-25: Häufigkeitsverteilung der charakteristischen Oberflächentemperaturen, hier exemplarisch für Zone 3 gemäß RDO 09 [3]

Den 13 charakteristischen Oberflächentemperaturen können unterschiedliche Auftretenshäufigkeiten (in Abhängigkeit von regionalen klimatischen Unterschiede) zugeordnet werden. Gleiches gilt für die zu berücksichtigende Verkehrsbelastung. Verschiedene Achslastklassen werden hier unterschiedliche Auftretenshäufigkeiten zugeordnet (siehe Abb. 2-26).



Abb. 2-26: Häufigkeitsverteilung der Achslastklassen, hier exemplarisch für BAB Fernverkehr gemäß RDO 09 [3]

Für die rechnerische Nachweisführung gemäß den RDO Asphalt [3] müssen für jede Belastungskombination, resultierend aus Temperatur- und Verkehrsbelastung, die Beanspruchungen in der Konstruktion berechnet werden. Bei klassischen, relativ dicken, Befestigungen befindet sich der dimensionierungsrelevante Nachweispunkt bei Berücksichtigung einer gleichmäßigen Flächenlast an der Unterseite der Asphalttragschicht in der Lastachse.

Die Kenntnis der Lage des Nachweispunktes ist zum einen für die Bereitstellung dimensionierungsrelevanter Kennwerte und zum anderen für eine differenzierte Bewertung der einzelnen Befestigungsschichten und der jeweils verwendeten Materialien notwendig.

Grundannahme für die Durchführung von Dimensionierungsberechnungen ist, dass jeder einzelne Beanspruchungszustand zur Gesamtschädigung einer Befestigung beiträgt, d.h. die zu erwartende Gesamtschädigung setzt sich aus gewichteten Einzelschädigungen zusammen. Diese Einzelschädigungen können anhand der Hypothese nach MINER [3] (siehe GI. 2-20) zur Gesamtschädigung akkumuliert werden.

$$\sum_{i} s_{i} = \frac{N_{vorh,1}}{N_{zul,1}} + \frac{N_{vor,2}}{N_{zul,2}} + \frac{N_{vor,3}}{N_{zul,3}} + \dots + \frac{N_{vor,i}}{N_{zul,i}}$$
Gl. 2-20

mit:

s Schadenssumme [-]

$$N_{vorh,i}$$
 die mit der Beanspruchung σ im Beanspruchungszustand I = [-]
1,2,..,n zu erwartende Anzahl an Lastwechseln infolge von
Achsübergängen in dem geplanten Nutzungszeitraum
 $N_{zul,i}$ die mit der Beanspruchung σ im Beanspruchungszustand I = [-]
1,2,..,n zu ertragbare Anzahl an Lastwechseln infolge von
Achsübergängen in dem geplanten Nutzungszeitraum

Für jeden Belastungszustand lässt sich eine zulässige Anzahl an Achsübergängen berechnen, die der Anzahl tatsächlicher Überrollungen gegenüber gestellt wird (siehe Gl. 2-21).

Die zu erwartenden Lastwechsel für die unterschiedlichen Beanspruchungszustände sind durch die Überlagerung der Häufigkeiten des Auftretens der verschiedenen Achslastklassen mit den Häufigkeiten des Auftretens der verschiedenen Temperaturzustände zu bestimmen. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die Summe der Quotienten aus der für den geplanten Nutzungszeitraum des Oberbaus zu erwartenden und den ertragbaren Lastwechseln kleiner oder gleich 1 ist (siehe Gl. 2-22).

$$N_{zul.i} = AF * a * e^k$$
Gl. 2-21

mit:

AF	Anpassungsfaktor nach RSO Asphalt, Entwurf 16	[-]
а	Materialkennwert, bestimmt aus dem Ermüdungsversuch	[-]
ϵ	elastische Anfangsdehnung im Versuch	[-]
k	Materialkennwert, bestimmt aus dem Ermüdungsversuch	[-]

$$\sum_{i} s_{i} = \sum_{i=1}^{i} \frac{N_{vor,i}}{N_{zul,i}} \le 1$$
Gl. 2-22

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Dimensionierungsberechnungen erfolgten unter Anwendung der deterministischen Verfahrensweise. Hierfür wurde ein Anpassungsfaktor von 714 verwendet.

Für die rechnerische Ermittlung des Ermüdungsstatus in Anlehnung an die RDO Asphalt 09 [3] sowie der festgelegten bzw. versuchstechnisch ermittelten Eingangsgrößen wurde die Software ADtoPave [20] verwendet, basierend auf einem rotationssymmetrischen Mehrschichtenmodell.

Als Ergebnis einer Dimensionierungsberechnung erhält man den Ermüdungsstatus für eine beliebige Nutzungsdauer (i.d.R. nach 30 Jahren) im maßgebenden Nachweispunkt. Als Nachweispunkt wird der Punkt mit der größten Biegezugbeanspruchung im Asphaltpaket bezeichnet. In Abb. 2-27 ist exemplarisch der Ermüdungsstatus in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer für einen Befestigungsaufbau dargestellt. Aus dem dargestellten Zusammenhang lässt sich der Ausfallzeitpunkt einer Befestigung berechnen, d.h. nach welchem Zeitraum rechnerisch ein Ermüdungsstatus von 100% erreicht wird.



Abb. 2-27 Beispiel für die Darstellung des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer

Für die Durchführung des Ermüdungsnachweises aller untersuchten Materialkombinationen wurde folgender Konstruktionsaufbau gemäß den RStO 12 [4] gewählt (siehe Abb. 2-28):

- 40 mm Asphaltdeckschicht
- 80 mm Asphaltbinderschicht
- 220 mm Asphalttragschicht
- 360 mm Frostschutzschicht
- Boden.

Als EV₂-Wert wurden für die Frostschutzschicht 120 MPa und für den darunterliegenden Boden 45 MPa definiert. Zur Berechnung der Verkehrsbelastung wurde die Belastungsklasse BK 100 und das Achslastkollektiv BAB Fernverkehr angenommen (siehe Tab. 2-5). Für die Häufigkeit der auftretenden Oberflächentemperaturen wurde Zone 3 gem. RDO 09 [3] gewählt.

Achslastklasse (statische Achslast) [t]										
0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-20	20-22	22-24
Häufigkeit [%] der jeweiligen Achslastklasse										
2,839	21,467	26,484	30,719	11,703	4,909	1,654	0,208	0,012	0,000	0,000
6	0	8	5	2	8	0	7	6	7	1
	0-2 2,839 6	0-2 2-4 2,839 21,467 6 0	0-2 2-4 4-6 Häu 2,839 21,467 26,484 6 0 8	0-2 2-4 4-6 6-8 Häufigkeit [° 2,839 21,467 26,484 30,719 6 0 8 5	0-2 2-4 4-6 6-8 8-10 Häufigkeit [%] der je 2,839 21,467 26,484 30,719 11,703 6 0 8 5 2	O-2 2-4 4-6 6-8 8-10 10-12 Häufigkeit [%] der jeweiligen 2,839 21,467 26,484 30,719 11,703 4,909 6 0 8 5 2 8	0-2 2-4 4-6 6-8 8-10 10-12 12-14 Häufigkeit [%] der jeweiligen Achsl 30,719 11,703 4,909 1,654 6 0 8 5 2 8 0	0-2 2-4 4-6 6-8 8-10 10-12 12-14 14-16 Häufigkeit [%] der jeweiligen Achslastklass 2,839 21,467 26,484 30,719 11,703 4,909 1,654 0,208 6 0 8 5 2 8 0 7	O-2 2-4 4-6 6-8 8-10 10-12 12-14 14-16 16-20 Häufigkeit [%] der jeweiligen Achslastklasse 2,839 21,467 26,484 30,719 11,703 4,909 1,654 0,208 0,012 6 0 8 5 2 8 0 7 6	Actisiasticiasse (statische Actisiast) [t] 0-2 2-4 4-6 6-8 8-10 10-12 12-14 14-16 16-20 20-22 Häufigkeit [%] der jeweiligen Achslastklasse 2,839 21,467 26,484 30,719 11,703 4,909 1,654 0,208 0,012 0,000 6 0 8 5 2 8 0 7 6 7

Tab. 2-5 Achslastklassen und zugeordnete Häufigkeiten für BAB Fernverkehr [3]



Abb. 2-28 gewählter Befestigungsaufbau für BK 100

Zwischen den einzelnen Asphaltschichten wurde "voller Verbund" und zwischen Asphalttragschicht und Frostschutzschicht sowie zwischen Frostschutzschicht und Untergrund "kein Verbund" angenommen.

In Abb. 2-29 ist exemplarisch der Ermüdungsstatus nach Durchführung des Ermüdungsnachweises im Querschnitt eines Asphaltpaketes dargestellt. Die schwarzen horizontalen Linien kennzeichnen die Schichtgrenzen zwischen den Asphaltschichten, die schwarze gestrichelte Linie die Symmetrieachse des rotationssymmetrischen Modells und der schwarze Balken die halbe Radaufstandsfläche (R=150 mm).

Die größten Biegezugdehnungen innerhalb eines Asphaltpaketes treten i.d.R. in der Lastachse an der Unterseite der Asphalttragschicht auf. Im Beispiel in Abb. 2-29 ist jedoch erkennbar, dass auch in den oberen Asphaltschichten große Beanspruchungen, zum Teil größer als in der ATS, auftreten [13], [14].





2.4.2 Darstellung der Ergebnisse

Wegen noch nicht erfolgter Kalibrierung des Prognoseverfahrens zum Nachweis der Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltdeck- bzw. für die -binderschichten, sowie wegen fehlender Validierung des Verfahrens der Spurrinnenprognose wurden die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse für den Ermüdungsnachweis nur für die Asphalttragschicht als Relativwerte angegeben. Für eine realitätsnahe Bewertung müssen beide Verfahren zunächst kalibriert bzw. validiert werden.

Als Referenzwert für die Berechnung der Relativwerte dienten die Berechnungsergebnisse, die für die Referenzvarianten ermittelt wurden (siehe Abb. 2-30). Der Ermüdungsstatus für die Referenzvarianten beträgt somit nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren 100 %.

In allen Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltdeck- und der Asphaltbinderschicht variiert. Als Asphalttragschicht wurde der Kalibrierasphalt gemäß RDO 09 [3] in Ansatz gebracht.



Abb. 2-30 Beispiel für die Darstellung des Ermüdungsstatus für drei Asphaltvarianten und eine Verbundart bezogen auf eine Referenzvariante

3 METHODISCHES VORGEHEN

Das Untersuchungsprogramm wurde so aufgestellt, dass alle möglichen Kombinationen der Wechselwirkung zwischen Asphaltgemischen, viskositätsverändernden Zusätzen und Bitumenemulsionen systematisch untersucht wurden. Die Probekörper für die in Abschnitt 4 ausgewerteten Ergebnisse wurden sowohl in situ als auch und im Labor hergestellt.

3.1 Auswahl der Materialien

Für die Realisierung der für die einzelnen Arbeitspakete erforderlichen Untersuchungen war es notwendig, verschiedene Asphaltgemische, viskositätsverändernden Zusätze und Bitumenemulsionen zu beschaffen.

Für die Asphaltgemische wurden zwei Asphaltdeckschichten und eine Asphaltbinderschicht als Standardvariante festgelegt.

- ADS 1 SMA 8 S (25/55-55A)
- ADS 2 SMA 8 S (50/70)
- ABS AC 16 B S (25/55-55A)

Zu diesen wurden die viskositätsverändernden Zusätze in der entsprechenden Menge, in Abhängigkeit des Bindemittels, zugegeben. Hergestellt wurden diese Asphaltgemische in industrieller Produktion durch die Asphaltmischwerke Stolberg GmbH. Für alle Asphalte wurden im Straßenbaulabor der TU Dresden Kontrollprüfungen durchgeführt (siehe Anlage 1 Abb. A 1 bis Abb. A 15).

Als viskositätsverändernde Zusätze wurden

Sasobit

Hersteller: SASOL WAX GmbH, 20457 Hamburg Charakterisierung: Synthetische gesättigte, langkettige Kohlenwasserstoffe

Schmelzpunkt: 100°C, Formulierung: pastillenförmiges Granulat

- Romonta N Hersteller: ROMONTA GmbH, 06317 Amsdorf Charakterisierung: Montanwachs Schmelzpunkt: 125°C, Formulierung: pastillenförmiges Granulat
- DEUREX X 20 K Hersteller : DEUREX AG, 06729 Elsteraue Charakterisierung: vegetarisches Etylen-Bis-Stearamid-Wachs (EBS) Schmelzpunkt: 142 bis 151°C, Formulierung: feines Granulat

eingesetzt.

Diese stellen die am häufigsten in Deutschland verwendeten viskositätsverändernden Zusätze dar. Die Lieferung dieser Produkte erfolgte in der entsprechenden Menge durch die Hersteller an das Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen und anschließend an die Mischanlage.

Zur Herstellung des Schichtenverbundes wurden die in der ZTV Asphalt 07 [9] festgelegten Bitumenemulsionen

- C 60 BP 4-S polymermodifizierte Bitumenemulsion
- C 40 B 5-S lösemittelhaltige Bitumenemulsion

verwendet. Diese wurden durch die BITUNOVA GmbH, 21007 Hamburg ebenfalls an das Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen geliefert.

Eine Übersicht aller Materialien ist in Tab. 3-1 zusammengestellt.

Materialart		Materialsorte			
		SMA 8 S 25/55-55A			
		2% Sasobit	3% Sasobit		
		SMA 8 S	S 25/55-55A		
		2% Romonta N	3% Romonta N		
		SMA 8 S	S 25/55-55A		
		2% Amidwachs	3% Amidwachs		
		SMA	8 S 50/70		
		SMA 8 S 50	/70 3% Sasobit		
		SMA 8 S 50/70 3% Romonta N			
		SMA 8 S 50/70 3% Amidwachs			
		AC 16 B S 25/55-55A			
	Asphaltbin- derschicht	AC 16 B S 25/55-55A 3% Sasobit			
		AC 16 B S 25/55-55A 3% Romonta N			
		AC 16 B S 25/55-	55A 3% Amidwachs		
		Sá	asobit		
Viskositätsverändernde Zu- sätze		Ro	monta		
		Ami	dwachs		
Dind	amittal	25/55-55A			
DINUE		50/70			
Ditumon		C 4	0 B5-S		
Ditumen	IEMUISION	C 60 BP4-S			

Tab. 3-1 Übersicht der Materialvarianten

3.2 Untersuchungsmatrix und Herstellung der Probekörper

Aufgrund der großen Anzahl an Materialien und der sich daraus ergebenden Materialkombinationen war es notwendig, detaillierte Ablaufpläne für die Herstellung der Teststrecke und der Gewinnung der Probekörper zu erarbeiten.

3.2.1 Herstellung der Probekörper auf der Teststrecke

Es wurde ein Konzept, welches alle Materialkombinationen beinhaltet, erarbeitet. Dieses bildete die Grundlagen für die

- Mengenermittlung der Materialien
- Materialkombinationen/Variantenmix

- Erarbeitung der Einbaupläne für die Teststrecke
- Herstellung der Teststrecke und
- Anordnung der Bohrungen und das Ziehen der Probekörper.

Die Mengenermittlung erfolgte auf Grundlage der Einbaulänge und der Stärke der einzubauenden Asphaltschichten der Teststrecke, als auch der Anzahl an im Labor herzustellenden Probekörper. Der größte Teil der Probekörper konnte auf der Teststrecke der RWTH Aachen gewonnen werden. Durch den Einbau der verschiedenen Materialkombinationen auf der Teststrecke des Geländes der RWTH Aachen konnte eine maximale Praxisnähe erzielt werden.

Es wurden insgesamt 25 Materialkombinationen realisiert (Variante 1 bis 26). Die Herstellung der Varianten 27 bis 47 erfolgte im Labor (siehe Abb. 3-1). Dazu wurde das beim Einbau der Teststrecke angelieferte Asphaltmaterial in Eimer abgefüllt und an die TU Dresden verschickt.

		Var 16	DS1/BS1E2-400-Z1-3%	
Var 1	DS1/BS1E1-200-o	Var 17	DS1/BS1E1-300-Z2-3%	
Var 2	DS2/BS1-E1-200-o	Var 18	DS1/BS1E1-400-Z2-3%	
Var 3	DS1/BS1E1-200-Z1-3%	Var 19	DS1/BS1E2-200-Z2-3%	
Var 4	DS1-Z1-3%/BS1-oE1-200	Var 20	DS1/BS1E2-300-Z2-3%	
Var 5	DS1-o/BS1-Z1-3%E1-200	Var 21	DS1/BS1E2-400-Z2-3%	
Var 6	DS1/BS1E1-200-Z2-3%	Var 22	DS1/BS1E1-300-Z3-3%	
Var 7	DS1-Z2-3%/BS1-oE1-200	Var 23	DS1/BS1E1-400-Z3-3%	
Var 8	DS1-o/BS1-Z2-3%E1-200	Var 24	DS1/BS1E2-200-Z3-3%	
Var 9	DS1/BS1E1-200-Z3-3%	Var 25	DS1/BS1E2-300-Z3-3%	
Var 10	DS1-Z3-3%/BS1-oE1-200	Var 26	DS1/BS1E2-400-Z3-3%	
Var 11	DS1-o/BS1-Z3-3%E1-200	Var 27	DS1-BM2/BS1E1-200-Z1-3%	
Var 12	DS1/BS1E1-300-Z1-3%	Var 28	DS1-BM2/BS1E1-200-Z2-3%	
Var 13	DS1/BS1E1-400-Z1-3%	Var 29	DS1-BM2/BS1E1-200-Z3-3%	
Var 14	DS1/BS1E2-200-Z1-3%	Var 30	DS1/BS1E1-200-Z1-2%	
Var 15	DS1/BS1E2-300-Z1-3%	Var 31	DS1/BS1E1-200-Z2-2%	
		Var 32	DS1/BS1E1-200-Z3-2%	

nicht durch Einbau herstellbar.

Abb. 3-1 Übersicht der Materialkombinationen

Legende zu Abb. 3-1

DS1	SMA 8 S (25/55-55)	Z1	Sasobit	E1	C60BP4-S	Standardvariante	DS1/BS 1-E1
BS1	AC 16 B S (25/55-55)	Z2	Romonta N	E2	C40B5-S	Standardzugabe VVZ	3 M%
BM1	25/55-55	Z3	Amidwachs			Standardzugabe E1	200 g/m²

Auf Grundlage der Abb. 3-1 wurden Einbaupläne für die Herstellung der Teststrecke auf dem Gelände der RWTH Aachen erarbeitet. Der Einbau erfolgte parallel in 3 Bauabschnitten. In jedem Bauabschnitt wurde die Asphaltbinderschicht ohne viskositätsverändernden Zusatz mit den darüberliegenden Asphaltdeckschichten mit viskositätsverändernden Zusätzen verbaut. Im Einbauabschnitt 1 sind Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht ohne Zusätze, als Referenzvariante, eingebaut. (siehe Abb. 3-2). In allen 3 Bauabschnitten erfolgte die Variation der viskositätsverändernden Bindemittel, der Emulsionsart und der – menge sowohl in der Asphaltdeck- als auch in der Asphaltbinderschicht, wie in der Übersicht der Abb. 3-1 dargestellt.



Abb. 3-2 Einbaupläne mit Unterteilung in Bauabschnitt eins bis drei für die Teststrecke auf dem Gelände der RWTH Aachen

In Anlehnung an die in Abb. 3-2 erarbeiteten Einbaupläne wurde die Teststrecke in einzelne Bauabschnitte eingeteilt (1). Das angelieferte Mischgut (Asphaltbinderschicht) wurde an den Asphaltfertiger (2) übergeben und eingebaut (3). Nach der Überprüfung der Mischguttemperatur (4) konnte verdichtet werden (5) (siehe Abb. 3-3).



Abb. 3-3 Einbau der Asphaltbinderschicht für die Herstellung der Teststrecke auf dem Gelände der RWTH Aachen

Nach Herstellung der Asphaltbinderschichtvarianten erfolgte die Aufteilung der einzelnen Bereiche für das Anspritzen der verschiedenen Arten und Mengen der Bitumenemulsionen (6). Da die zu bearbeitenden Teilstücke von geringer Größe waren, wurden die Bitumenemulsionen mit GARDENA-Spritzen manuell aufgetragen (7). Durch das Wiegen der Spritzen vor und nach dem Aufbringen der Emulsion wurde sichergestellt, dass genau die gewünschte Menge aufgebracht wurde (siehe Abb. 3-4).



Abb. 3-4 Fertige Asphaltbinderschichten (links) und Anspritzen der Emulsionen (rechts)

Nach dem Brechen der Emulsion wurden die Asphaltbinderschichten mit den Asphaltdeckschichten (mit und ohne viskositätsverändernde Zusätze) überbaut und die einzelnen Abschnitte/Materialkombinationen entsprechend gekennzeichnet (siehe Abb. 3-5).



Abb. 3-5 Vorbereitung der Fläche für das Ziehen der Bohrkerne

Die Entnahme der Bohrkerne erfolgte nach drei Wochen auf Grundlage von Einbau- bzw. Probenahmeplänen, separat für jeden viskositätsverändernden Zusatz. Die Pläne beinhalten die Anzahl der Bohrkerne, die Lage der Bohrkerne und die Größe (Durchmesser) (siehe Abb. 3-6). Es wurden für jedes Arbeitspaket ca. 50 % mehr Bohrkerne gewonnen als kalkuliert.



Abb. 3-6 Einbauplan/Probennahmeplan mit Lage, Anzahl und Durchmesser der für jedes Arbeitspaket zu entnehmenden Bohrkerne

Die Bohrkerne wurden gemäß der in Abb. 3-1 erstellten Übersicht beschriftet und bis zur Prüfung gelagert (siehe Abb. 3-7).



Abb. 3-7 Lagerung der gekennzeichneten Bohrkerne/Prüfkörper

3.2.2 Herstellung der Probekörper im Labor

Ausgewählte Probekörpervarianten wurden im Labor hergestellt. Dies war notwendig, da hier sowohl die eingesetzten Mengen an viskositätsverändernden Zusätzen als auch die Temperatur der Unterlage (Asphaltbinderschicht) variiert werden sollten und eine Herstellung der nur geringen Mengen an Probekörpern auf der Teststrecke wirtschaftlich und zeitlich nicht vertretbar war.

Das Asphaltmischgut wurde, wie bereits ausgeführt, an der Mischanlage der Asphaltmischwerke Stolberg GmbH hergestellt und direkt vor Ort in Eimer gefüllt.

Als Asphaltbinderschichtmaterial wurde die Standardvariante AC 16 B S (25/55-55A) und als Asphaltdeckschichtmaterial die Standardvariante SMA 8 S (25/55-55A) unter Variation der Mengen an viskositätsverändernden Zusätzen von 2 und 3 M.-% für alle drei Zusätze eingesetzt. In Abstimmung mit den Fachbetreuern des Projektbegleitenden Ausschusses wurden Temperaturen für die Unterlage (Asphaltbinderschicht) von 0°C, 10°C und 30°C festgelegt. Als Bitumenemulsion wurde die Standardvariante C 60 BP 4S eingesetzt und als Auftragsmenge wurde 200 g/m² gewählt, dies entspricht 16,64 g für eine Asphaltplatte.

Die Probekörper wurden aus Asphaltplatten (Abmessung 320 x 260 mm x 40 mm) mit dem Walzsegmentverdichter nach TP Asphalt, Teil 33 [6] mit dem Braunschweiger Verdichtungsprogramm, welches eine weggeregelte Vorverdichtung und eine kraftgeregelte Hauptverdichtung vorsieht, im Straßenbaulabor der TU Dresden hergestellt (siehe Abb. 3-8). Die Einwaage der Platten wurde anhand der in den Kontrollprüfungen ermittelten Raumdichten berechnet.



Abb. 3-8 Walzsegmentverdichter und Ablauf des Verdichtungsprogrammes

Die Asphaltmischgüter wurden im Wärmeschrank auf die erforderliche Verdichtungstemperatur aufgeheizt und anschließend gut homogenisiert. Gemäß TP Asphalt-StB, Teil 30) [7] beträgt die Verdichtungstemperatur für die ADS und die ABS mit 25/55-55A Bindemittel 145°C \pm 5°C.

Als erstes erfolgte die Herstellung der Asphaltbinderschichtplatten. Diese verblieben bis zum vollständigen Abkühlen im Stahlrahmen des Walzsegmentverdichters. Dadurch konnte eine unerwünschte Verformung verhindert werden. Nach dem Auskühlen wurden die Asphaltbinderschichtplatten mit dem Rahmen für 24 Stunden zu gleichen Anteilen auf 0°C, 10°C und 30°C temperiert und die Bitumenemulsion bei der entsprechenden Temperatur mit Hilfe einer Schaumstoffwalze aufgebracht (siehe Abb. 3-9).



Abb. 3-9 Überprüfen der Temperatur auf der Asphaltbinderschicht

Die Asphaltplatten wurden bis zum Brechen der Bitumenemulsion der Emulsion

bei der entsprechenden Temperatur gelagert. Nach dem Erwärmen und Homogenisieren des Asphaltdeckschichtmischgutes wurde das Asphaltdeckschichtmischgut zeitnah auf die im Walzsektorverdichter eingebaute Asphaltbinderschicht aufgebracht und verdichtet.

Mittels Kernbohrgerät wurden aus jeder Asphaltplattenkombination (ADS-ABS) vier zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von jeweils 100 mm herausgebohrt (siehe Abb. 3-10). Die Probekörper wurden bis zur Prüfung bei Raumtemperatur gelagert.





Ebenfalls im Labor hergestellt wurden die Probekörper für die Spaltzug-Schwellversuche nach den TP Asphalt-StB [10], [11]. Die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche dienen der Berechnung der Auswirkungen der Verbundwirkung der viskositätsverändernden Zusätze auf prognostizierte Nutzungsdauern in Anlehnung an die RDO Asphalt 2009 [3]. Die Vorgehensweise zur Probekörperherstellung erfolgte analog der für die zyklischen Schersteifigkeitsversuche hergestellten Probekörper. Es wurden für jede Materialkombination jeweils 10 Probekörper für Ermüdungsversuche nach den TP Asphalt-StB, Teil 24 [10] und 4 Probekörper für Steifigkeitsversuche nach den TP Asphalt-StB, Teil 26 [11] hergestellt. Für alle Probekörper betrug der Zieldurchmesser 100 mm und die Zielhöhe 40 mm.

4 ERGEBNISSE DER LABORUNTERSUCHUNGEN

Voraussetzung für eine Bewertung der Auswirkung der viskositätsverändernden Zusätze auf die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung sind die Kenntnisse zum Gebrauchsverhalten der einzelnen Asphaltschichten und des Schichtenverbundes zwischen diesen Schichten.

Ergebnisse dazu liefern der Spaltzug-Schwellversuch [1], [10], [11], der zyklische Schersteifigkeitsversuch [2] und der zyklische Scherermüdungsversuch.

4.1 Ergebnisse der Schersteifigkeitsuntersuchungen

Nachfolgend werden sowohl die Ergebnisse der zyklischen, als auch teilweise der statischen Schersteifigkeitsversuche der verschiedenen Materialkombinationen graphisch dargestellt und miteinander verglichen.

4.1.1 Vergleich zwischen den Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes bei Asphaltschichten ohne und mit viskositätsverändernden Zusätzen

Inhalt der Untersuchungen war die Bewertung der Unterschiede zwischen den Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes bei unterschiedlich kombinierten Asphaltschichten ohne und mit viskositätsverändernden Zusätzen bei ansonsten identischen Einbaubedingungen in situ.

Als Verbundvarianten wurden Kombinationen aus Asphaltdeckschicht (ADS) und Asphaltbinderschicht (ABS) eingebaut.

Jeder der drei viskositätsverändernden Zusätze (Sasobit, Romonta N und Amidwachs), wurde entsprechend Tab. 4-1 der ADS und/oder der ABS zugesetzt. Einen Überblick über die untersuchten Materialkombinationen gibt Tab. 4-1.

Insgesamt wurden 10 Asphaltkombinationen hergestellt und geprüft, 1 Referenzvariante und 9 modifizierte Varianten.

Schichtenkombination	Anzahl zu prüfender Probe- körper	Durchmesser [mm]
SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas.}	4	100
SMA 8 S Rom AC 16 B S Rom.	4	100
SMA 8 S Amidw AC 16 B S Amidw.	4	100
SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S	4	100
SMA 8 S Rom AC 16 B S	4	100
SMA 8 S Arridw AC 16 B S	4	100
SMA 8 S - AC 16 B S _{Sas.}	4	100
SMA 8 S - AC 16 B S Rom.	4	100
SMA 8 S - AC 16 B S Amidw.	4	100
SMA 8 S - AC 16 B S (Referenz)	4	100

Tab. 4-1 Übersicht der Materialkombinationen

Um die Varianten zu vergleichen, wurde für jede Materialkombination der Mittelwert aus den Versuchsdaten, erhoben für verschiedene Prüfkörper, gebildet. In der Regel erfolgte die Mittelwertbildung aus 4 Versuchen, soweit vorhanden und soweit die Ergebnisse plausibel waren (siehe Anlage 2 Abb. A 16 bis Abb. A 25). Durch fehlerhaftes Einkleben der Probekörper und maschinenbedingte Ausfälle standen teilweise keine vier verwertbaren Ergebnisse zur Verfügung. Für einzelne Varianten wurde daher nur ein Versuchsergebnis ausgewertet, z.B. Asphaltdeckschicht mit Amidwachs und Asphaltbinderschicht ohne Zusatz (siehe Abb. A 21). Die Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten der untersuchten Varianten sind in Abb. 4-1 dargestellt.



Abb. 4-1: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten für alle Materialkombinationen

Die Schersteifigkeit der Referenzvariante (Deckschicht ohne Zusatz und Binderschicht ohne Zusatz), hier rot dargestellt, liegt bei -10°C und 10°C im mittleren Bereich, wobei hingegen bei 50°C kaum noch eine Schersteifigkeit messbar ist. Oberhalb der Referenzvariante zeigen die Varianten Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht mit Amidwachs, Asphaltdeckschicht ohne Zusatz und Asphaltbinderschicht mit Romonta, Asphaltdeckschicht ohne und Asphaltbinderschicht mit Amidwachs, Asphaltdeckschicht ohne und Asphaltbinderschicht mit Amidwachs, Asphaltdeckschicht ohne und Asphaltbinderschicht mit Sasobit als auch die Variante Asphaltdeckschicht mit Amidwachs und Asphaltbinderschicht ohne Zusatz ähnliche Steifigkeiten über den gesamten Temperaturverlauf. Auch hier wirkt, wie bereits bei der Referenzvariante beschrieben, der Effekt der Verklebung im Temperaturbereich von -10°C bis 10°C am stärksten. Bei Temperaturen von 30°C und 50°C sind geringe bzw. kaum Schersteifigkeiten messbar, da bei höheren Temperaturen (50°C) die verklebende Wirkung des Bindemittels nicht mehr gegeben ist. Der Schichtenverbund wird hier nur noch durch die Verzahnung ermöglicht. Unterhalb der Referenzvariante zeigt die Variante Asphaltdeckschicht mit Romonta und Asphaltbinderschicht ohne Zusatz im niedrigen Temperaturbereich (-10°C bis 10°C) die geringsten Steifigkeiten von allen untersuchten Varianten auf, hingegen bei 30°C die Höchsten. Im Temperaturbereich ab 30°C konnten bei allen getesteten Materialkombinationen nur noch geringe Schersteifigkeiten gemessen werden. Bei 50°C war kaum noch eine Schersteifigkeit vorhanden. An diesen untersuchten Varianten lässt sich noch keine direkte Auswirkung der mit viskositätsverändernden Zusätzen angereicherten Asphaltgemische auf den Schichtenverbund schließen, da die Abweichung zwischen der besten Variante (Deckschicht und Binderschicht mit Amidwachs) und der schlechtesten Variante (Deckschicht mit Romonta und Binderschicht ohne Zusatz) im normalen Streubereich liegen.

Ein ausschließlich negativer Einfluss der viskositätsverändernden Zusätze auf den Schichtenverbund konnte nicht vollständig nachgewiesen werden. Die Materialkombinationen oberhalb der Referenzvariante enthalten sowohl Amidwachs als auch Romonta, wobei der Zusatz von Amidwachs sowohl in der Deckschicht als auch in der Binderschicht einen leicht positiveren Einfluss auf die Schersteifigkeit im niedrigen Temperaturbereich zeigte.

4.1.2 Untersuchungen des Einflusses der Probekörperherstellung im Labor und in situ auf den Schichtenverbund

Der Vergleich der Verbundwirkung von labortechnisch hergestellten Probekörpern mit denen auf der institutseigenen Teststrecke der RWTH Aachen gezogenen Bohrkernen war Gegenstand weiterer Untersuchungen. Dazu sollte nur ein viskositätsverändernder Zusatz mit der Referenzvariante verglichen werden. In Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde das Additiv, mit dem die größte Abweichung, bezogen auf die Referenzvariante, aus Abschnitt 4.1.1 festgestellt wurde, angewendet. Die größte Abweichung beschreibt die Variante mit der geringsten Schersteifigkeit, in diesem Fall Asphaltdeckschicht mit Romonta und Asphaltbinderschicht ohne Zusatz.

Die Einzelergebnisse der in situ hergestellten Varianten wurden bereits in Abschnitt 4.1.1 ermittelt und sind in Anlage 2 Abb. A 16 bis Abb. A 25 dargestellt. Die Einzelergebnisse der im Labor hergestellten zwei Varianten sind in Anlage 3: Abb. A 26 und Abb. A 27 dargestellt. Auffällig ist hier, dass geringe Schersteifigkeiten, sowohl bei der Referenzvariante als auch bei der Variante mit Romonta ab 30°C gemessen wurden.

Ein Vergleich der Mittelwerte dieser Varianten ist in Abb. 4-2 dargestellt. Hier ist deutlich erkennbar, dass die Schersteifigkeiten der im Labor hergestellten Probekörper ca. 50% geringer sind als die der in situ Probekörper. Als mögliche Ursachen können die Art der Verdichtung (Teststrecke bessere Verdichtung durch die Walze), das Wiedererwärmen des Mischgutes im Labor sowie das unterschiedliche Aufbringen der Bitumenemulsion gesehen werden. Es wird vermutet, dass der Schichtenverbund der Laborprobekörper nur durch die Reibung und die Verzahnung der Gesteine erreicht wurde und die Verklebung durch nicht ausreichende bzw. optimale Verdichtung ungenügend war.



Abb. 4-2: Vergleich der in situ Probekörper und Laborprobekörper, jeweils Referenzvariante (ADS) SMA 8S (25/55-55A) / ABS AC 16 B S (25/55-55A) und ADS SMA 8S_Rom (25/55-55A)/ ABS AC 16 B S (25/55-55A)

In Abb. 4-3 ist der Vergleich der Schersteifigkeiten als Flächenfunktion dargerstellt. Hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Normalspannung auf den Schichtenverbund. Während bei fehlender Normalspannung ($\sigma_N = 0$ KPa) die Schersteifigkeit nahezu 0 beträgt, nimmt mit Zuhahme der Normalspannung die Schersteifigkeit zu.



Abb. 4-3: Flächenfunktion zu Abb. 4-2

4.1.3 Untersuchung der Auswirkung verschiedener Zusätze auf den mit unterschiedlichen Bitumenemulsionsarten und -mengen hergestellten Schichtenverbund

Da in der Praxis der Schichtenverbund mit dem statischen Abscherversuch nach LEUTNER [4] geprüft wird, sollte auch ein Vergleich zwischen statischer und dynamischer Schichtenverbundprüfung erfolgen. Dabei sollten die Emulsionsarten und die Emulsionsmengen variiert werden, wodurch die Verklebung, ein wichtiger Aspekt für die Herstellung des Schichtenverbundes, beeinflusst wird.

Dabei kommen überwiegend wässrige Bitumenemulsionen, aber auch lösemittelhaltige Haftkleber zum Einsatz. In den ZTV Asphalt-StB 07/13 [9] werden für den Schichtenverbund zwei Bitumenemulsionsarten und die Dosierung der Bitumenemulsionen, in Abhängigkeit von der Belastungsklasse, geregelt. Allerdings sind dort noch die veralteten Bezeichnungen enthalten. In diesem Forschungsvorhaben wurden die Emulsionen C60BP4-S (vormals C60BP1-S) und C40BP5-S (vormals C40BF1-S) verwendet. Als Ansprühmengen wurden, in Anlehnung an die ZTV Asphalt StB 07/13 [9], 200g/m², 300g/m² und 400g/m² für jede Emulsionsart und Variante festgelegt (siehe Tab. 4-2 und Tab. 4-3).

Tab. 4-2 Art und Dosierung der polymermodifizierten Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Unterlage in den Belastungsklassen Bk 100 bis Bk 3,2 [9]

		Aufzubringende Schicht					
Art und Bescho heit der Unterlo	ıffen- age	Asphalttragschicht	Asphaltbinderschicht	Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton			
		Ansj	prühmenge C60BP1-S in	g/m^2			
	f	150 bis 250	250 bis 350	X			
Asphalt- tragschicht	gf	250 bis 350	250 bis 350	X			
in agoentenii	o/a	300 bis 400	300 bis 500	X			
	f	_	X	150 bis 250			
Asphalt- hinderschicht	gf	_	250 bis 350	250 bis 350			
onder semen	o/a	_	300 bis 500	250 bis 350			

Tab. 4-3 Art und Dosierung der lösemittelhaltigen Bitumenemulsion in Abhängigkeit von der Unterlage in den Belastungsklassen Bk1,8 bis Bk 0,3 [9]

		Aufzubringende Schicht			
Art und Beschaffenheit der Unterlage		Asphalttragschicht	Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton		
		Ansprühmenge (C40BF1-S in g/m ²		
	f	200 bis 300	200 bis 300		
Asphalttragschicht	gf	300 bis 400	200 bis 300		
	o/a	350 bis 450	300 bis 400		

Die Probekörpergewinnung erfolgte, sowohl für die statischen als auch für die dynamischen Versuche, aus der Teststrecke. Während für die Prüfung des Schichtenverbundes nach LEUTNER [2] Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm notwendig sind, werden bei dem zyklischen Schersteifigkeitsversuch Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm geprüft.

Auch hier wurden die drei viskositätsverändernden Zusätze sowohl in der Asphaltdeckschicht als auch in der Asphaltbinderschicht in verschiedenen Kombinationen zugemischt. Eine Übersicht der untersuchten Varianten gibt Tab. 4-4.

	Schichtenkombination	Art und Menge an Emulsion [g/cm ³]	Durchmesser [mm]
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas.}	E 1_200	100, 150
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas.}	E 1_300	100, 150
Sacobit	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas.}	E 1_400	100, 150
Sasobil	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas.}	E 2_200	100, 150
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas.}	E 2_300	100, 150
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas.}	E 2_400	100, 150
	SMA 8 S Rom AC 16 B S Rom.	E 1_200	100, 150
	SMA 8 S Rom AC 16 B S Rom	E 1_300	100, 150
Pomonto	SMA 8 S Rom AC 16 B S Rom.	E 1_400	100, 150
Romonia	SMA 8 S Rom AC 16 B S Rom.	E 2_200	100, 150
	SMA 8 S Rom AC 16 B S Rom.	E 2_300	100, 150
	SMA 8 S Rom AC 16 B S Rom.	E 2_400	100, 150
	SMA 8 S Amidw AC 16 BS Amidw.	E 1_200	100, 150
	SMA 8 S Amidw AC 16 BS Amidw.	E 1_300	100, 150
Amidwacha	SMA 8 S Amidw AC 16 BS Amidw.	E 1_400	100, 150
Annuwachs	SMA 8 S Amidw AC 16 BS Amidw.	E 2_200	100, 150
	SMA 8 S Amidw AC 16 BS Amidw.	E 2_300	100, 150
	SMA 8 S Amidw AC 16 BS Amidw.	E 2_400	100, 150

Tab. 4-4 Übersicht der zu prüfenden Materialkombinationen

Die Einzelergebnisse der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten der für die zyklische Prüfung des Schichtenverbundes in Tab. 4-4 aufgelisteten Varianten und den daraus resultierenden Mittelwerten sind in Anlage 4: Abb. A 28 bis Abb. A 45 dargestellt.

Ein Vergleich der Mittelwerte aller Varianten mit unterschiedlichen Emulsionsmengen zeigt, dass die Variante mit dem Zusatz Amidwachs bei Verwendung der Emulsion E1 (C60BP4-S) für die drei getesteten Auftragsmengen (200 g/m², 300 g/m² und 400 g/m²) die höchsten Schersteifigkeiten aufweist. Im Temperaturbereich ab 30°C ist eine geringe bzw. keine Schersteifigkeit mehr vorhanden. Dieser Effekt beruht auf der Temperaturabhängigkeit des Bitumens. Im Temperaturbereich von 20°C bis -10°C wird die Wirksamkeit des Schichtenverbundes maßgeblich durch die Verklebung, die Reibung und die Verzahnung bestimmt. Der Anteil jeder dieser Parameter wirkt bei verschiedenen Temperaturen in unterschiedlicher Größenordnung (siehe Abb. 4-4). Hingegen zeigt bei der Emulsion E2 (C40BP5-S) die Asphaltvariante mit Romonta bei 200 g/m² und 300 g/m² und bei 400 g/m² Auftragsmenge die Variante mit Amidwachs die höchsten Schersteifigkeiten (siehe Abb. 4-5). Die dargestellten bzw. beschriebenen Unterschiede sind nur von geringer Ausprägung und dürfen somit nicht überbewertet werden.





Abb. 4-4: Vergleich der einzelnen Varianten mit 200 g/m² (oben links), 300 g/m² (oben rechts) und 400 g/m² (unten) Emulsion C60BP4- S (E1)





Abb. 4-5: Vergleich der einzelnen Varianten mit 200 g/m² (oben links), 300 g/m² (oben rechts) und 400 g/m² (unten) Emulsion C40BP5-S (E2)

Die Untersuchung der Verbundwirkung bei unterschiedlicher Dosierung der Bitumenemulsion zeigte, dass die optimale Menge der Bitumenemulsion bei 200 g/m² liegt (siehe Abb. 4-6). Dies trifft für alle drei untersuchten Zusätze zu. Die gemessenen Werte im zyklischen Schersteifigkeitsversuch bewegen sich in einem Bereich zwischen 70 MPa (Sasobit, Romonta) und 80 MPa (Amidwachs) bei der kationischen Bitumenemulsion (E1). Bei den für alle drei untersuchten Materialkombinationen und Emulsionsmengen liegt die Schersteifigkeit bei der Temperatur von -10°C im Bereich von 40 MPa bis 80 MPa. Bei -10°C kommen alle die den Schichtenverbund beeinflussenden Faktoren zum Tragen. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Schersteifigkeit, wie bereits beschrieben, ab.



Abb. 4-6: Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante und der Varianten mit Sasobit, Romonta und Amidwachs mit jeweils 200 g/m² Emulsion C60BP4-S (E1) dargestellt als Flächenfunktion

Vergleicht man die Ergebnisse für jeden viskositätsverändernden Zusatz einzeln für beide Emulsionen und die drei Emulsionsmengen, so besteht kein signifikanter Unterschied bzw. so ergeben sich keine großen Abweichungen zwischen den mit dem zyklischen Scherversuch ermittelten Schersteifigkeiten untereinander (siehe Anlage 4: Abb. A 28 bis Abb. A 43).

Die Bohrkerne mit dem Durchmesser von 150 mm wurden mit dem statischen Abscherversuch nach LEUTNER [5] geprüft. Eine Übersicht der ermittelten Werte ist in Anlage 5: Tab.1 bis Tab. 3 dargestellt. Bei allen geprüften Probekörpern wurde eine Scherkraft von ≥ 15 KN gemessen. Damit wurden die Anforderungen gemäß TP Asphalt, Teil 80 [5] erfüllt. Die Darstellung der Mittelwerte (aus zwei Versuchen) für alle drei Auftragsmengen sowie Emulsion E1 und E2, erfolgt in Abb. 4-7 und Abb. 4-8. Auffallend ist, dass die Probekörper mit der Emulsion E1 (C60BP4-S) bei allen Auftragsmengen nur geringe Streuungen aufweisen. Die Scherkräfte (35 bis 43 kN) und die Scherwege (3,9 bis 4,4 mm) sind auf einem annährend ähnlichen Niveau. Bei Emulsion E2 (C40BP5-S) zeigen die Scherkräfte ähnliche Werte (32 bis 37 kN), allerdings gibt es hier größere Abweichungen in den Scherwegen (3,2 bis 5,5 mm). Als Ursache dafür kann eine evtl. höhere Viskosität der Emulsion E2 angesehen werden.



Abb. 4-7: Vergleich der Ergebnisse (Mittelwerte) des statischen Abscherversuchs nach LEUTNER [5] für Emulsion E1 mit jeweils 200, 300 und 400 g/m² Auftragsmenge für Sasobit, Romonta und Amidwachs



Abb. 4-8: Vergleich der Ergebnisse (Mittelwerte) des statischen Abscherversuchs nach LEUTNER [5]] für Emulsion E2 mit jeweils 200, 300 und 400 g/m² Auftragsmenge für Sasobit, Romonta und Amidwachs

Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Prüfbedingungen des dynamischen und des statischen Versuches zur Ermittlung der Schersteifigkeit sind in Abb. 4-9 die einzelnen Versuchsparameter dargestellt. Hierbei sind deutliche Unterschiede in der Versuchsdurchführung erkennbar. Die zyklische Prüfung bildet den realen Beanspruchungszustand unter Verkehrslast realistischer ab.

Wie aus Abb. 4-9 ersichtlich, wird beim Abscherversuch nach LEUTNER [5] bei nur einer Temperatur (20°C), ohne Normalspannung, ohne Frequenz und ohne Variation des Scherweges geprüft. Die Berücksichtigung der verschiedenen Einflüsse (z.B. Reibung, Temperatur) findet hier nicht statt. So ist die Reibung von vorherrschenden Normalkraft abhängig, während die verklebenden der Eigenschaften eines bitumenhaltigen Bindemittels sich vor allem mit der Temperatur ändern. Hieraus ist erkennbar, dass das komplexe nichtlineare Verhalten des Schichtenverbundes für analytische Zwecke nicht in Form eines einzelnen Wertes, wie z.B. der Maximal- bzw. Scherkraft im Abscherversuch Dieser Versuch angegeben werden kann [21]. kann nicht die den Schichtenverbund beeinflussenden Parameter Verzahnung, Reibung und Verklebung abbilden und somit nicht ausreichend beschreiben.



Abb. 4-9 Vergleich der Eingangsparameter zyklischer Versuch und statischer Versuch (rot) zur Ermittlung der Schersteifigkeit bzw. des wirksamen Schichtenverbundes

Um die Ergebnisse dieser unterschiedlichen Versuchsbedingungen vergleichbar bzw. anschaulich darstellen zu können, wurde das HOOKsche Gesetz angewandt. Es besagt, dass die Dehnung ΔI linear von der einwirkenden Kraft F abhängt. In Abb. 4-10 ist für einen Probekörper die Dehnung/Federkonstante in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Für den zyklischen Versuch erhält man vier Messwerte, da der Probekörper bei vier Temperaturen und fünf Frequenzen, jedoch ohne Normalspannung, geprüft wurde, für den Versuch nach LEUTNER [5] hingegen nur einen Messwert (T = 20°C, $\sigma_N = 0$ KPa)). Anhand dieses Vergleiches ist eindeutig zu erkennen, dass der dynamische Schersteifigkeitsversuch das Materialverhalten deutlich besser abbildet bzw. beschreibt.



Abb. 4-10 Vergleich der Ergebnisse dynamischer Schersteifigkeitsversuch und statischer Versuch nach LEUTNER [5]

Zusammenfassend kann eine Wertung des Einflusses der viskositätsverändernden Zusätze und der Art der aufgebrachten Bitumenemulsion nicht erfolgen. Alle untersuchten Varianten zeigen ähnliche Ergebnisse. Als optimale Auftragmenge an Emulsion konnte, für beide Emulsionen, die geringste Menge von 200g/m² ermittelt werden. Es kann bestätigt werden, dass der statische Abscherversuch nach LEUTNER zur Einschätzung des Schichtenverbundes nicht die den Schichtenverbund beeinflussenden Parameter abbildet und somit festgestellte Verbundstörungen nicht auf gesicherter Grundlage beurteilt werden können.

4.1.4 Einfluss der verschiedenen viskositätsverändernden Zusätze kombiniert mit unterschiedlichen Bindemittelsorten im Asphalt auf den Schichtenverbund

Zur Anwendung kamen die zwei im Straßenbau am häufigsten verarbeiteten Bindemittelsorten 50/70 und 25/55-55A unter Variation der viskositätsverändernden Zusätze. Dabei wurde die Kombination Asphaltdeckschicht/Asphaltbinderschicht untersucht, wobei die viskositätsverändernden Zusätze Sasobit, Romonta und Amidwachs jeweils in beiden Schichten verwendet wurden. Das Bindemittel 50/70 wurde nur in der Asphaltdeckschicht eingesetzt. Somit ergaben sich die in Tab. 4-5 aufgeführten Materialkombinationen. Die Einzelergebnisse der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten sind in Anlage 6: Abb. A 46 bis Abb. A 51 dargestellt.

Tab. 4-5 Übersicht Materialkombinationen der mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellten Asphaltdeckschichten

	Schichtenkombination	Emulsion [g/m ²]
Sacabit	SMA 8 S (25/55-55A)sas AC 16 B S sas	
Sasobit	SMA 8 S (50/70) _{Sas.} - AC 16 B S _{Sas}	
Pomonto	SMA 8 S (25/55-55A)Rom AC 16 B S Rom	
Komonia	SMA 8 S (50/70)Rom AC 16 B S Rom	E1-200
A second second second	SMA 8 S (25/55-55A) _{Amid.} - AC 16 B S _{Amid}	C 60 BP-4S
Amuwachs	SMA 8 S (50/70) _{Amid} - AC 16 B S _{Amid}	
Deferenz	SMA 8 S (25/55-55A) - AC 16 B S	
Reieleliz	SMA 8 S (50/70) - AC 16 B S	

Die Herstellung der Probekörper mit dem Bindemittel 50/70, welches nur in der Asphaltdeckschicht eingesetzt wurde, erfolgte im Labor aus Asphaltplatten.

Ein Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der mit Sasobit, sowohl in der Asphaltdeck- als auch in der Asphaltbinderschicht hergestellten Probekörper zeigt deutlich, dass bei Verwendung des Bitumen 50/70 höhere Schersteifigkeiten im Temperaturbereich von -10°C bis 30°C auftreten. Bei 50°C sind die Schersteifigkeiten der beiden Bitumen ähnlich.

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 2.2.2 wurde partiell auch der im Versuch ermittelte Scherweg differenziert ausgewertet. Bei der mit dem Bitumen 50/70 hergestellten Asphaltdeckschicht ist der Scherweg um 50 % geringer als bei der Variante mit dem Bitumen 25/55-55A. (siehe Abb. 4-11 und Abb. 4-12).

Abb. 4-13 zeigt den Vergleich der Schersteifigkeiten in Abhängigkeit von den Scherwegen der Referenzvarianten (ADS mit 50/70 und ADS mit 25/55-55A ohne Sasobit) mit den der mit Sasobit modifizierten Asphaltschichten. Deutlich erkennbar ist, dass die Referenzvariante mit 25/55-55A eine um ca. 50 % höhere Schersteifigkeit als die Referenzvariante mit 50/70 aufweist. Dies kann an der Art der Probekörperherstellung liegen, da die Referenzvariante mit 50/70 aus im Labor hergestellten Platten gewonnen und daher die Verdichtung bzw. das Verkleben

der Asphaltdeck- mit der Asphaltbinderschicht ggf. nicht optimal war. Allerdings ist dieser Effekt nicht bei den mit Sasobit modifizierten Probekörpern erkennbar. Hier kehrt sich das Ergebnis um.



Abb. 4-11 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit bei vier Temperaturen

Abb. 4-12 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit bei vier Temperaturen



Abb. 4-13 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten für Referenzvariante ADS 1 (25/55-55A), Referenzvariante ADS 2 (50/70), ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit und ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit
Bei den mit Romonta modifizierten Asphaltvarianten sind die Schersteifigkeiten der mit dem Bitumen 25/55-55A hergestellten Probekörpern im Temperaturbereich von -10°C bis 30°C höher als beim Bitumen 50/70. Auch hier zeigen sich bei 50°C ähnliche Schersteifigkeiten (siehe Abb. 4-14 und Abb. 4-15). Ein Vergleich zwischen den jeweiligen Referenzvarianten zeigt, dass die mit Romonta modifizierten Asphaltdeckschichten keine signifikanten Unterschiede in der Schersteifigkeit zur jeweiligen Referenzvariante aufweisen. Es kann vermutet werden, dass hier der Zusatz von Romonta keinen Einfluss auf den Schichtenverbund hat (siehe Abb. 4-16).



Abb. 4-14 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Romonta bei vier Temperaturen

Abb. 4-15 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Romonta bei vier Temperaturen



Abb. 4-16 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten für Referenzvariante ADS 1 (25/55-55A), Referenzvariante ADS 2 (50/70), ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Romonta und ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Romonta

Bei den Mittelwerten der Schersteifigkeiten der mit Amidwachs modifizierten Asphaltdeckschichten ist eine deutlich höhere Schersteifigkeit bei der mit Bitumen 50/70 hergestellten Asphaltdeckschicht bei 50°C erkennbar. Vermutlich ist hier der Anteil der Verklebung, neben dem Einfluss der Reibung und Verzahnung, höher, da normalerweise mit Zunahme der Temperatur der Anteil der Verklebung abnimmt (siehe Abb. 4-17 und Abb. 4-18).

Ein Vergleich mit den jeweiligen Referenzvarianten macht zwischen den mit dem Bitumen 25/55-55A hergestellten Probekörpern erkennbare Unterschiede in der Schersteifigkeit sichtbar, d.h. die Referenzvariante zeigt deutlich größere Schersteifigkeiten als die mit Amidwachs modifizierte Variante(siehe Abb. 4-19).



Abb. 4-17 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs bei vier Temperaturen

Abb. 4-18 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs bei vier Temperaturen



Abb. 4-19 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten für Referenzvariante ADS 1 (25/55-55A), Referenzvariante ADS 2 (50/70), ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs und ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs

Um einen besseren Überblick aller untersuchten Varianten zu bekommen, sind in Abb. 4-20 und Abb. 4-21 die Ergebnisse der Referenzvarianten, getrennt nach Bitumen und den dazugehörigen modifizierten Varianten, dargestellt. Zusammenfassend kann man sagen, dass die mit dem Bitumen 50/70 modifizierten Asphaltgemische im Temperaturbereich von 50°C etwas höhere Schersteifigkeiten



aufweisen, als die mit dem Bitumen 25/55-55A hergestellten Asphaltvarianten (siehe Abb. 4-22).

Sasobit, Amidwachs, Romonta bei vier Amidwachs, Romonta bei vier Temperaturen Temperaturen

Abb. 4-20 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für Abb. 4-21 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit,



Abb. 4-22 Vergleich wie in Abb. 4-20 als Flächenfunktion

4.1.5 Einflüsse der eingesetzten Mengen an viskositätsverändernden Zusätzen und der Temperatur der Unterlage

Die Zugabemenge der viskositätsverändernden Zusätze wird durch das gewünschte Verhalten der Asphalte und Bindemittel bestimmt. Bei der Zugabe von zu viel viskositätsverändernden Zusätzen besteht die Gefahr, dass das Bindemittel zu hart wird und es dadurch zu Rissbildungen kommt. Wird dagegen zu wenig dazugegeben, kann die gewünschte Wirkung nicht erreicht werden.

In der Praxis werden die Bindemittel mit 2 bis 3 M.-% Zusätzen, bezogen auf den Anteil des Bindemittels, modifiziert. Diese Annahmen wurden auch für Untersuchungen, in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss, übernommen. Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Herstellung eines guten Schichtenverbundes bildet der Einfluss der Temperatur der Unterlage, hier im speziellen der Asphaltbinderschicht. Dafür wurden drei Temperaturen, ebenfalls in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss, (0°C, 10°C und 30°C) betrachtet.

Die viskositätsverändernden Zusätze wurden hier nur in der Asphaltdeckschicht eingesetzt. Somit ergaben sich die in Tab. 4-6 dargestellten Materialkombinationen. Die Herstellung der gesamten Probekörper erfolgte im Labor.

Die Einzelergebnisse der Schersteifigkeiten für alle geprüften Materialkombinationen sind in Anlage 7: Abb. A 52 bis Abb. A 69 aufgeführt.

In Abb. 4-23 und Abb. 4-24 sind die Mittelwerte der Schersteifigkeiten der mit 2und 3 M.-% viskositäsverändernden Zusätzen hergestellten Asphaltdeckschichten, welche auf die auf 0°C abgekühlten Asphaltbinderschichten aufgebracht wurden, dargestellt.

Erkennbar ist, dass die mit jeweils 2- und 3 M.-% Romonta, Sasobit und Amidwachs versetzten Asphaltdeckschichten keine signifikanten Abweichungen zur jeweiligen Referenzvariante zeigen. Auch bestehen kaum Unterschiede in den Schersteifigkeiten zwischen der Zugabemenge von 2- oder 3 M.-%.

Somit kann eine Beeinflussung des Schichtenverbundes bei 0°C Temperatur der Asphaltunterlage in Abhängigkeit von der Menge an viskositätsverändernden Zusätze nicht erkannt werden. Aus wirtschaftlicher Sicht kann auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen deshalb die geringere Zugabemenge empfohlen werden.

Tab. 4-6 Übersicht Materialkombinationen der bei Temperaturen von 0°C, 10°C, 30°C und 2% und 3% viskositätsverändernden Bindemitteln hergestellten Asphaltschichten

	Schichtenkombination	Temperatur der	Menge an Zusatz
	Schenkenkombination	Unterlage [°C]	[Masse-%]
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S	0	2
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S	0	3
Sasobit	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S	10	2
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S	10	3
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S	30	2
	SMA 8 S _{Sas.} - AC 16 B S	30	3
	SMA 8 S Rom AC 16 B S	0	2
	SMA 8 S Rom AC 16 B S	0	3
Romonta	SMA 8 S _{Rom.} - AC 16 B S	10	2
	SMA 8 S _{Rom.} - AC 16 B S	10	3
	SMA 8 S _{Rom.} - AC 16 B S	30	2
	SMA 8 S _{Rom.} - AC 16 B S	30	3
	SMA 8 S Amid AC 16 B S	0	2
	SMA 8 S Amid AC 16 B S	0	3
Amidwachs	SMA 8 S Amid AC 16 B S	10	2
	SMA 8 S Amid AC 16 B S	10	3
	SMA 8 S _{Amid.} - AC 16 B S	30	2
	SMA 8 S Amid AC 16 B S	30	3
Referenzvariante	SMA 8 S - AC 16 B S	0	_
	SMA 8 S - AC 16 B S	10	_
	SMA 8 S - AC 16 B S	30	_



Abb. 4-23 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 2% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 2% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs mit jeweils ABS (25/55-55A) bei 0°C



Abb. 4-24 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 3% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 3% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und jeweils ABS (25/55-55A) bei 0°C

Vergleicht man hingegen die Mittelwerte der Schersteifigkeiten bei einer Temperatur der Asphaltunterlage, hier Asphaltbinderschicht, bei 10°C und ebenfalls von 2- und 3-M.-% Zusatz von Romonta, Sasobit und Amidwachs in der Asphaltdeckschicht, so sind Unterschiede in Bezug zur Referenzvariante zu erkennen. Bei den mit 2 M.-% hergestellten Probekörpern zeigen sich im Temperaturbereich von 10°C bis 50°C etwas höhere Schersteifigkeiten im Bezug zur Referenzvariante. Bei einer Zugabe von 3 M.-% an viskositätsverändernden Zusätzen zeigt die Referenzvariante bei der Prüftemperatur von -10°C etwas höhere Schersteifigkeiten. Ein nennenswerter Einfluss der Zugabemenge und der Temperatur der Asphaltunterlage ist auch hier nicht erkennbar (siehe Abb. 4-25 und Abb. 4-26).



Abb. 4-25 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 2% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 2% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs mit jeweils ABS (25/55-55A) bei 10°C

Bei der dritten Temperatur (30°C) zeigt sich kein Einfluss der viskositätsverändernden Zusätze auf die Schersteifigkeit. Hier liegen alle getesteten Probekörper auf bzw. in unmittelbarer Nähe der Referenzvariante. Lediglich die mit 3 M.-% Romonta hergestellte Asphaltdeckschicht zeigt bei -10°C Prüftemperatur eine ca. 20 MPa höhere Schersteifigkeit als die Referenzvariante und die mit Sasobit und Amidwachs hergestellten Asphaltdeckschichten (siehe Abb. 4-27 und Abb. 4-28).



Abb. 4-26 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 3% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 3% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und jeweils ABS (25/55-55A) bei 10°C



Abb. 4-27 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 2% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 2% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs mit jeweils ABS (25/55-55A) bei 30°C

Zur besseren Veranschaulichung der sich ergebenden minimalen Unterschiede bei Variation der Menge an Zusätzen und der Temperatur der Unterlage ist in Abb. 4-29 ein Vergleich der Ergebnisse für die Variante mit dem Zusatz Amidwachs für 0°C und 30°C sowie 2- und 3 M.-% Zugabemenge dargestellt. Die Mittelwerte der Schersteifigkeiten befinden sich auf einem ähnlichen Niveau.



Abb. 4-28 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 3% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 3% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und jeweils ABS (25/55-55A) bei 30°C



Abb. 4-29 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs, ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und ABS (25/55-55A) bei 0°C, ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs, 3% Amidwachs und ABS (25/55-55A) bei 30°C als Flächenfunktion

4.2 Ergebnisse der Scherermüdungsuntersuchungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der zyklischen Scherermüdungsversuche, bestehend aus Vor- und Hauptversuchsphase der verschiedenen Materialkombinationen graphisch dargestellt und miteinander verglichen.

4.2.1 Einfluss bei Asphaltschichten ohne und mit viskositätsverändernden Zusätzen auf die Scherermüdung

Zur Beurteilung des Einflusses von viskositätsverändernden Zusätzen auf das Ermüdungsverhalten des Schichtenverbunds wurden 3 Varianten (2 Zusätze + 1 Referenz) untersucht. Die Ergebnisse wurden in Form von Ermüdungskurven interpretiert und für Vor- und Hauptversuche getrennt dargestellt Dafür wurden die hergestellten Bohrkerne aus dem praxisnahen Einbau auf der Teststrecke der RWTH Aachen verwendet. Eine Übersicht der verwendeten Varianten gibt Tab. 4-7.

Variante	Deckschicht- material	Binderschicht- material	Emulsion	Menge Emulsion [g/m²]	Zusatz	Zusatz- menge [M%]
1					-	-
3	SMA 8 S (25/55-55)	AC 16 B S (25/55-55)	C60BP4-S	200	Sasobit	3
6	((Romonta	3

Tab. 4-7 Übersicht der zu untersuchenden Varianten

4.2.2 Ergebnisse der Vorversuche

• Ergebnisse der Vorversuche bei einer Normalkraft von 0 MPa

Die Vorversuche der Ermüdungsansprache des Schichtenverbunds wurden bei den Prüftemperaturen -10°C, 20°C und 50°C durchgeführt. Die Auswertung erfolgte über die Parameter Kraftamplitude und Schersteifigkeit. In Abb. 4-30 bis Abb. 4-32 sind die Versuchsergebnisse für -10°C dargestellt.



Abb. 4-30: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von -10°C (Normalkraft 0 MPa)



Abb. 4-31: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Sasobit bei einer Prüftemperatur von -10°C (Normalkraft 0 MPa)



Abb. 4-32: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Romonta bei einer Prüftemperatur von -10°C (Normalkraft 0 MPa)

Für alle drei Varianten wurde ein sehr ähnlicher Verlauf der Parameter Kraftamplitude und Schersteifigkeit festgestellt. Die Steigerung der Scheramplituden führt, begründet in der hohen Steifigkeit des Probekörpers bei der tiefen Prüftemperatur, zu einem deutlichen Anstieg der aufzubringenden Kraftamplitude. Die Variante ohne viskositätsverändernden Zusatz zeigt eine stetige Abnahme der Schersteifigkeit. Lediglich die Variante mit dem Zusatz Sasobit erleidet einen initialen Steifigkeitsverlust. Dieser Steifigkeitsverlust kann auf anfängliche regeltechnische Unregelmäßigkeiten der Messtechnik zurückgeführt werden, welches an dem unkonventionellen Verlauf Kraftamplitude erkennbar ist. Die Kraftamplitude weist der Wegvorgabe folgend einen nahezu linearen Verlauf auf. Analog deutet die nahezu lineare Abnahme der Schersteifigkeit auf einen Festigkeitsverlust hin. Die Ergebnisse zeigen, dass vorzeitige Versuchsabbrüche im Bereich der 12. bis 15. Laststufe aufgetreten sind. Diese lassen sich durch das Erreichen des Grenzbereiches der maschinenseitigen Messtechnik begründen. Die Kraftmessdose ist limitiert bei einer Maximalkraft von 10 kN, so dass bei der internen Berechnung der nächsten Laststufe unter Berücksichtigung weiterer Sicherheitsfaktoren, der maschinenseitige Abbruch des Vorversuchs erfolgte. Da der Verlauf der Kraftamplitude in Kombination mit der berechneten Schersteifigkeit keinen Rückschluss

auf ein Versagen des Probekörpers liefern, konnte der Versuch bei einer Temperatur von -10°C und einer Normalkraft von 0 MPa nicht zielgerichtet ausgewertet werden.

Die mittlere Prüftemperaturstufe der Vorversuche wurde mit 20°C festgelegt. Für alle Prüfvarianten weisen die Verläufe der Schersteifigkeiten eindeutige Charakteristika auf (siehe Abb. 4-33 bis Abb. 4-35).



Abb. 4-33: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von 20°C (Normalkraft 0 MPa)



Abb. 4-34: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Sasobit bei einer Prüftemperatur von 20°C (Normalkraft 0 MPa)



Abb. 4-35: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Romonta bei einer Prüftemperatur von 20°C (Normalkraft 0 MPa)

Aus der vorgestellten Auswertemethodik (siehe Abschnitt 2.2.4) der Vorversuche ergeben sich für die Konfiguration mit der Prüftemperatur 20°C und einer Normalkraft von 0 MPa die in Tab. 4-8 dargestellten drei Scheramplituden für die verschiedenen Varianten.

	Laststufe				
Variante	25 %	50 %	75 %		
Referenz	0,028 mm	0,055 mm	0,083 mm		
Sasobit	0,019 mm	0,038 mm	0,057 mm		
Romonta	0,03 mm	0,06 mm	0,09 mm		

Tab. 4-8 : Laststufen der Hauptversuche für eine Prüftemperatur von 20 °C und einer Normalkraft von 0 MPa

Bei einer Prüftemperatur von 50°C konnte bei allen Varianten ein ähnlicher Verlauf der Versuchsparameter Kraftamplitude und Schersteifigkeit festgestellt werden (siehe Abb. 4-36 bis Abb. 4-38). Es zeigt sich, dass die Sollwerte der Scheramplituden in allen Versuchen gut eingehalten werden können. Es wird jedoch deutlich, das im Vergleich zu den Prüfungen bei einer Temperatur von 20°C ein sehr geringes Steifigkeitsniveau erkennbar ist. Dieses ist mit den geringen benötigten Kraftamplituden zur Einstellung der Soll-Scherwege zu erklären. Ein Maximum des Verlaufes der Kraftamplitude stellt sich bei keiner der drei Varianten ein, so dass keine Auswertung anhand eines Versagens des Probekörpers möglich war. Ein spontaner Abfall der Schersteifigkeiten konnte somit ebenfalls nicht nachgewiesen werden, so dass eine zielgerichtete Auswertung und Verwertung der Vorversuche bei 50 °C und einer Normalkraft von 0 MPa nicht erfolgen kann.



Abb. 4-36: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von 50°C (Normalkraft 0 MPa)



Abb. 4-37: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Sasobit bei einer Prüftemperatur von 50°C (Normalkraft 0 MPa)



Abb. 4-38: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Romonta bei einer Prüftemperatur von 50°C (Normalkraft 0 MPa)

• Ergebnisse der Vorversuche bei einer Normalkraft von 0,45 MPa Die Ergebnisse der Vorversuche bei einer Normalkraft von 0,45 MPa sind vergleichbar mit den Versuchen bei der Normalkraft 0 MPa. Da diese Ergebnisse unabhängig der Variante eine gleiche Charakteristik aufweisen, werden die Ergebnisse grafisch lediglich für die Referenzvariante gezeigt.

Die Versuchsergebnisse der Vorversuche führten bei einer Prüftemperatur von - 10 C aufgrund der bereits erläuterten Begrenzung der Kraftaufnehmer zu vorzeitigen Versuchsabbrüchen (siehe Abb. 4-39), so dass keine Auswertung der Einzelversuche durchführbar war.



Abb. 4-39: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von -10°C (Normalkraft 0,45 MPa)

Bei einer Prüftemperatur von 20°C ist aufgrund des charakteristischen Verlaufs der Kraftamplitude als Reaktion auf die Scherwegvorgabe eine Auswertung des Versuchs möglich. Auffällig ist, dass trotz Erreichen des Maximums der Kraftamplitude der Schersteifigkeitsverlauf keinen spontanen Steifigkeitsverlust aufweist. Eine mögliche Begründung könnte darin liegen, dass die Normalkraft trotz eines Versagens der Scherfuge, einen hohen Kraftbedarf bei einer weiteren Steigerung der Scheramplitude nach Versagen verursacht siehe (siehe Abb. 4-40).



Abb. 4-40: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von 20°C (Normalkraft 0,45 MPa)

Die aus den Vorversuchen ermittelten Scheramplituden als Inputparameter für die Hauptversuche dieser Konfiguration sind in Tab. 4-9 dargestellt.

Tab. 4-9 : Laststufen der Hauptversuche für eine Prüftemperatur von 20 °C und einer Nor	malkraft
von 0,45 MPa	

	Laststufe			
Variante	25 %	50 %	75 %	
Referenz	0,018 mm	0,03 mm	0,053 mm	
Sasobit	0,025 mm	0,05 mm	0,075 mm	
Romonta	0,03 mm	0,06 mm	0,09 mm	

Der Vorversuch bei einer Temperatur von 50°C und einer Normalkraft von 0,45 MPa zeigt ebenfalls einen vergleichbaren Verlauf der Schersteifigkeiten auf einem sehr geringen Niveau (siehe Abb. 4-41).



Abb. 4-41: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von 50°C (Normalkraft 0,45 MPa)

Die Auswertung der Vorversuche bei einer Normalkraft von 0 MPa zeigte lediglich bei einer Prüftemperatur von 20 °C verwertbare Ergebnisse. Diese Ergebnisse wurden auch bei einer Normalkraft von 0,45 MPa und 0,9 MPa ermittelt, so dass auch hier eine Verwertung der Vorversuche lediglich bei einer Prüftemperatur von 20 °C erfolgen konnte. Limitationen in Form der Überschreitung der maximal prüftechnisch ertragbaren Kraftamplitude haben für eine Prüftemperatur von -10°C sowohl bei einer Normalkraft von 0 MPa, als auch 0,45 MPa und 0,9 MPa dazu geführt, dass eine zielgerichtete Auswertung der Vorversuchsergebnisse für diese Konfigurationen nicht möglich gewesen ist.

Bei einer Prüftemperatur von 50°C wurden für alle Normalkraftniveaus sehr geringe Steifigkeiten aufgrund des Materialverhaltens bei hohen Prüftemperaturen festgestellt, so dass kein Versagen der Probekörper detektiert werden konnte und somit keine Auswertung und Verwertung der Ergebnisse realisierbar war.

4.2.3 Ergebnisse der Hauptversuche

Die Prüfmatrix der Hauptversuchsphase basiert auf den Erkenntnissen der Vorversuchsphase. Der Fokus wurde auf eine Prüftemperatur von 20°C gelegt, um eine prüftechnische Umsetzung sicherstellen zu können. Zusätzlich wurden die Normalkraftniveaus 0 MPa und 0,45 MPa für die Hauptversuchsphase ausgewählt. Die Normalkraft von 0,9 MPa wurde aufgrund der prüftechnisch nicht realisierbaren Umsetzung während der Hauptversuche (Vielzahl Versuchsabbrüche) verworfen, obwohl die Vorversuchsphase Ergebnisse lieferte. Im Rahmen der durchgeführten Prüfungen, wurden stufenweise Anpassungen an der Prüfmatrix vorgenommen, wie in Abb. 4-42 dargestellt. Das Ziel dieser Anpassungen war die Sicherstellung von Ermüdungskurven, welche eine Vergleichbarkeit der Varianten unter Berücksichtigung einer statistisch abgesicherten Regression zulassen.



Abb. 4-42: Prüfmatrix der Hauptversuchsphase

Die Entwicklung dieser Vorgehensweise erfolgte dynamisch während der Hauptversuchsphase in enger Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss, welche dieser geschlossen zustimmte. Zunächst erfolgte, wie in der Methodik als grundsätzliches Vorgehen beschrieben, die Durchführung der Ermüdungsversuche an drei Scheramplituden, mit je dreifacher Belegung. In der nächsten Stufe erfolgte die Erhöhung der Belegung der einzelnen Scheramplituden-Stufen um eine Bereinigung der aufgetretenen Ausreißer statistisch abgesichert durchführen zu können. In der dritten und letzten Stufe wurde die Anzahl der gewählten Scheramplituden auf fünf erhöht, um die Ermüdungskurven durch eine höhere Anzahl an Punkten ergänzen zu können.

Die Ergebnisse der Einzelversuche der Scherermüdungsprüfungen der dritten Stufe sind in Anlage 8:: Abb. A 70 bis Abb. A 97 dargestellt.

Ergebnisse der Hauptversuche bei einer Normalkraft von 0 MPa und 20°C
 Prüftemperatur

Die Ergebnisse der Vorversuche weisen auf durchführbare und verwertbare Hauptversuche für eine Normalkraft von 0 MPa und einer Prüftemperatur von 20°C hin. In Stufe 1 erfolgte eine dreifache Belegung der Versuche bei drei Scheramplituden, welche 25%, 50% und 75% der in der Vorversuchsphase ermittelten maximalen Laststufe entsprechen. Die Ermüdungskurven der ersten Phase wurden somit durch neun Versuche pro Variante definiert.

Die Ermüdungskurve der Referenzvariante ohne viskositätsverändernde Zusätze weist ein geringes Bestimmtheitsmaß R² auf, welches mit der großen Lastwechselzahl im hohen Scheramplitudenbereich zu begründen ist (siehe Abb. 4-43). Für die beiden Varianten mit den viskositätsverändernden Zusätzen Sasobit und Romonta zeigen die Ermüdungskurven einen sehr ähnlichen Verlauf. Für die Varianten Sasobit und Variante Romonta wurden Bestimmtheitsmaße von 0,99 respektive 0,93 erzielt, welche als sehr gut zu bewerten sind (siehe Abb. 4-44 und Abb. 4-45).

Da es sich bei den Lastwechselwerten der Scheramplitudenstufen um einen Mittelwert von 3 Versuchen handelt, konnten Versuche, welche als Ausreißer gewertet wurden trotzdem einen großen Einfluss auf die Ermüdungskurve haben, so dass in Stufe 2 sowohl Ausreißer eliminiert, als auch weitere Versuche an identischen Scheramplituden durchgeführt wurden. Trotz hoher Bestimmtheitsmaße der modifizierten Varianten, wurde aufgrund großer Streuungen der Einzelversuche, das vorgeschlagene Vorgehen an allen Varianten durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Varianten mit der Referenz weiterhin gewährleisten zu können



Abb. 4-43: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der ersten Stufe der Hauptversuchsphase



Abb. 4-44: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der ersten Stufe der Hauptversuchsphase



Abb. 4-45: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der ersten Stufe der Hauptversuchsphase

In Abb. 4-46 bis Abb. 4-48 sind die Ermüdungskurven der Stufe 2 der Scherermüdungsprüfungen dargestellt. Bei Betrachtung der Referenzvariante wird deutlich, dass die Maßnahmen der Stufe 2 zu einer eindeutigeren Ermüdungskurve führen. Das Bestimmtheitsmaß R² konnte auf einen Wert von 0,94 angehoben werden. Das Bestimmtheitsmaß der Variante Sasobit verringert sich auf sehr hohem Niveau leicht auf 0,96, das der Variante Romonta verbessert sich auf 0,99. Somit konnte gezeigt werden, dass die Anpassung der Prüfmatrix in Stufe 2 Verbesserungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse geliefert hat. Bei der Betrachtung der Verläufe der Ermüdungskurven zeigt sich, dass alle Kurven ähnliche Steigungen aufweisen. Das Niveau der ertragbaren Lastwechselzahlen im relevanten Scheramplitudenbereich liegt ebenfalls auf einem sehr ähnlichen Niveau.



Abb. 4-46: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der zweiten Stufe der Hauptversuchsphase Variante Sasobit 20°C 0 MPa





Abb. 4-47: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der zweiten Stufe der Hauptversuchsphase

Abb. 4-48: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der zweiten Stufe der Hauptversuchsphase

Obwohl die Ergebnisse der Stufe 2 der Hauptversuchsphase zufriedenstellende Ergebnisse hinsichtlich der Bestimmtheitsmaße liefern, wurde entschieden, die Ermüdungskurven mit weiteren Punkten bei weiteren Scheramplitudenstufen zu ergänzen. Da im geringen Amplitudenbereich sehr hohe Lastwechselzahlen erreicht wurden, wurden im Bereich einer Laststufe von 37,5% der maximal ermittelten Laststufen in der Vorversuchsphase eine weitere Prüf-Scheramplitude ausgewählt, um eine Abgrenzung in den Bereich der Dauerfestigkeit vornehmen zu können. Im Bereich der hohen Amplituden konnte festgestellt werden, dass Versuchsabbrüche aufgrund eines Übersteigens der prüftechnisch aufbringbaren Kraft aufgetreten sind. Um diesen Bereich dennoch genauer definieren zu können, wurde eine weitere Stufe der Scheramplitude von 62,5% ausgewählt. Somit erfolgen die Scherermüdungsprüfungen in der dritten Stufe der Hauptversuchsphase bei insgesamt 5 Scheramplituden. Die Belegung der Zwischenstufen 37,5% und 62,5% wurde kontinuierlich angepasst, indem die Plausibilität der durchgeführten Versuche hinsichtlich der Position auf der in Stufe 2 berechneten Ermüdungskurven geprüft wurde.

Die Ermüdungskurven nach Durchführung aller Versuche bei allen Laststufen zeigen Abb. 4-49 bis Abb. 4-51. Für alle Varianten konnten sehr gute Bestimmtheitsmaße (Referenz 0,98; Sasobit 0,96 und Romonta 0,97) erreicht werden. Im Rahmen der Ausreißerbereinigung wurden für die Referenzvariante und die Variante Romonta die maximale Scheramplitude entfernt. Es wird deutlich, dass die zusätzlich eingeführten Belastungsstufen, die Ermüdungskurven hinreichend ergänzen, sodass eine Vergleichbarkeit der Varianten untereinander ermöglicht werden konnte.



Abb. 4-49: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der dritten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C, 0 MPa)



Abb. 4-50: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der dritten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C, 0 MPa)



Abb. 4-51: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der dritten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C, 0 MPa)

Abb. 4-52 zeigt die Ermüdungskurven aller Varianten vergleichend in einem Diagramm. Es zeigt sich eindeutig, dass die Referenzvariante und die Variante Sasobit auf demselben Niveau liegen. Lediglich die Variante Romonta liegt auf einem etwas höheren Niveau. Im Rahmen der zu beobachtbaren Prüfstreuung wird jedoch von einem sehr vergleichbaren Scherermüdungsverhalten aller Varianten ausgegangen. Es wird somit deutlich, dass für die Scherermüdungsprüfungen bei einer Prüftemperatur von 20°C und einer Normalkraft von 0 MPa kein negativer Einfluss des Einsatzes von viskositätsverändernden Zusätzen auf den Schichtenverbund hinsichtlich seiner Ermüdungsbeständigkeit zu erkennen ist.



Abb. 4-52: Ermüdungskurven aller Varianten für eine Prüftemperatur von 20°C und einer Normalkraft von 0 MPa

Ergebnisse der Hauptversuche bei einer Normalkraft von 0,45 MPa und 20°C Prüftemperatur

In der Vorversuchsphase konnte gezeigt werden, dass eine zielgerichtete Durchführung und Verwertung bei einer Prüftemperatur von 20°C und einer Normalkraft von 0,45 MPa uneingeschränkt möglich ist. Analog zu den Versuchen bei einer Normalkraft von 0 MPa wird auch bei dieser Konfiguration stufenweise verfahren. In der ersten Stufe, also einer Belegung der Ermüdungskurve mit neun Einzelversuchen wird für die Referenzvariante ein Bestimmtheitsmaß R² von 0,71 erreicht (siehe Abb. 4-53). Die Variante Sasobit weist ein sehr gutes Bestimmtheitsmaß von 0,99 auf (siehe Abb. 4-54). Wie Abb. 4-55 zeigt, konnte die Variante Romonta lediglich bei den Laststufen 25% und 50% durchgeführt werden, so dass eine Bestimmtheit aufgrund der zu geringen Datenbasis nicht ermittelt werden konnte.



Abb. 4-53: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der ersten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C;0,45 MPa)



Abb. 4-54: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der ersten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C;0,45 MPa)



Abb. 4-55: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der ersten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C;0,45 MPa)

Aufgrund des geringen Bestimmtheitsmaßes der Referenzvariante und der zu geringen Anzahl an Datenpunkten der Variante Romonta wurde in der nächsten Stufe erneut eine Ausreißerbereinigung und die Erhöhung des Belegungsgrades durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass bei der Prüfkonfiguration mit einer Normalkraft von 0,45 MPa und einer Prüftemperatur von 20°C für die Varianten Referenz und Sasobit die Erhöhung der Anzahl der Prüfungen und Bereinigung der Ausreißer zu schlechteren Bestimmtheitsmaßen führen (siehe Abb. 4-56 und Abb. 4-57). Eine Begründung könnte in der hohen Streuung einzelner Prüfergebnisse einer Laststufe liegen, welche eine Bewertung über den Mittelwert unpräziser werden lassen. Für die Variante Romonta kann in der Stufe zwei zunächst keine Aussage über den Erfolg der Maßnahmen getroffen werden (siehe Abb. 4-58).



Abb. 4-56: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der zweiten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)



Abb. 4-57: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der zweiten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)



Abb. 4-58: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der zweiten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)

In Stufe drei wurde die Anzahl der Scheramplituden für die Referenzvariante und Sasobit auf fünf erhöht. Abb. 4-59 zeigt für die Referenzvariante, dass trotz der deutlichen Erhöhung der Anzahl der Prüfungen, das Bestimmtheitsmaß auf einem ähnlichen Niveau liegt. Die gewählten Maßnahmen führen für die Variante Sasobit zu einer leichten Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes (siehe Abb. 4-60). Einen großen Effekt auf die Erhöhung der Versuchsanzahl konnte für die Variante Romonta ermittelt werden. Hier konnte ein R² von 0,99 erreicht werden (siehe Abb. 4-61). Eine Aussagekraft ist jedoch auch bei dieser Variante aufgrund der Versuchsstreuung der Einzelversuche zu hinterfragen und durch weitere Versuche abzusichern.



Abb. 4-59: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der dritten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)



Abb. 4-60: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der dritten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)



Abb. 4-61: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der dritten Stufe der Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)

Abb. 4-62 zeigt die Ermüdungskurven der Konfiguration Prüftemperatur 20°C und Normalkraft 0,45 MPa in einem Diagramm. Die Varianten mit viskositätsverändernden Zusätzen weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Beide Varianten tendieren in dieser Darstellung im Bereich kleiner Amplituden zu einem besseren Ermüdungsverhalten als die Referenzvariante, im Bereich höherer Amplituden könnte ein schwächeres Verhalten vermutet werden. Generell kann aber unter Berücksichtigung der Verfahrensstreuung anhand der ermittelten Versuchsdaten kein negativer Einfluss der viskositätsverändern Zusätze auf das Scherermüdungsverhalten festgestellt werden.



Abb. 4-62: Ermüdungskurven aller Varianten für eine Prüftemperatur von 20°C und einer Normalkraft von 0,45 MPa

Mit Durchführung von Scherermüdungsprüfungen sollte untersucht werden, ob viskositätsverändernde Zusätze einen negativen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten des Schichtenverbunds haben. Um eine Bewertung vorzunehmen, sei zunächst auf verfahrenstechnische Erkenntnisse verwiesen. Die folgenden Aussagen hinsichtlich der technischen Umsetzung der Ermüdungsprüfungen können auf Basis der in diesem Projekt durchgeführten Scherermüdungsversuche getroffen werden:

 In der Phase der Vorversuche konnte festgestellt werden, dass die Pr
üftemperatur von 20°C eine Festlegung der Scheramplituden f
ür die Hauptversuche erm
öglicht.

- Der Versuch unterliegt einer gewissen Streuung, welche bei der Beurteilung der Ergebnisse beachtet werden müssen.
- Eine Erhöhung der Anzahl der Scheramplituden hat sich als praktikabel erwiesen.

Hinsichtlich der zentralen Fragestellung kann die Aussage getroffen werden, dass im Rahmen der im Projekt durchgeführten Scherermüdungsversuche kein negativer Einfluss der viskositätsverändernden Zusätze auf die Ermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbunds ermittelt werden konnte. Beide untersuchten Varianten (Sasobit und Romonta) zeigen eine Ermüdungsbeständigkeit auf dem Niveau der Referenzvariante.

4.3 Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche

Ergebnis der durchgeführten Spaltzug-Schwellversuche sind Funktionen, die das frequenz- und temperaturabhängige Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten der untersuchten 15 Asphaltgemische aufzeigen. Beschrieben werden die Funktionen durch Funktionsparameter, die als Materialparameter fungieren und als dimensionierungs- oder bemessungsrelevante Eingangsdaten für die sich anschließenden Dimensionierungsberechnungen analog zu den RDO Asphalt 09 [3] unerlässlich sind.

4.3.1 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Steifigkeitsverhalten

In Tab. 4-10 bis Tab. 4-13 sind die Regressionsparameter der Hauptkurven für die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten, getrennt nach Art des Bindemittels und der Menge der Zusätze, zusammengefasst. Anhand dieser Parameter können die in Abb. 4-63 bis Abb. 4-70 dargestellten Hauptkurven und Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen gebildet werden.

Tab. 4-10 Regressionsparameter der Hauptkurven für die Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz

Asphatlmischgut	T _R	Φ	E _{min}	E _{max}	Z1	Zo
	[°C]	[-]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[-]
Ref-25-55/55A		30033	0	35802	-0,50979705	2,56075754

DS_Sasobit	20	26425	0	23837	-0,63233391	1,41860668
DS_Amidwachs		26578	0	23635	-0,68694703	1,54605915
DS_Romonta		29481	0	33064	-0,49153096	1,92823791



Abb. 4-63 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz



Abb. 4-64 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz

Ein Vergleich der in Abb. 4-63 dargestellten Hauptkurven und der in Abb. 4-64

dargestellten Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz zeigt, dass die Referenzvariante (gelb) die geringste Steifigkeit aufweist. Die Variante mit 2% Romonta (orange) weist im Vergleich zu der Variante mit Amidwachs (hellblau) und Sasobit (blau) im Temperaturbereich unter 0°C die höchsten Steifigkeiten auf. Im Temperaturbereich über 0°C verhalten sich alle drei Asphaltdeckschichtvarianten identisch.

Tab. 4-11 Regressionsparameter der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz

Asphaltmischgut	Т _R [°С]	Φ [-]	E _{min} [N/mm²]	E _{max} [N/mm²]	Z ₁ [-]	Z ₀ [-]
Ref-25-55/55A		30033	0	35802	-0,50979705	2,56075754
DS_Sasobit	20	27931	0	26310	-0,55144842	1,61800255
DS_Amidwachs		28826	0	25866	-0,54612119	1,7584506
DS_Romonta		29534	0	34047	-0,46670401	1,85174646



Abb. 4-65 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz
DS_Sasobit

DS_Amidwachs

DS_Romonta



Abb. 4-66 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz

Bei den Asphaltdeckschichtvarianten, welche mit 3 % viskositätsverändernden Zusätzen angereichert sind, können bis -10°C keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Auch hier weist die Referenzvariante (gelb) geringere Steifigkeiten gegenüber den modifizierten Varianten auf (siehe Abb. 4-65 und Abb. 4-66).

Zusatz						
Asphaltmischgut	T _R [°C]	Φ [-]	E _{min} [N/mm²]	E _{max} [N/mm²]	Z1 [-]	Z ₀ [-]
Ref-50/70		41787	0	24138	-0,71864231	3,51026305

0

0

0

26875

27215

24876

-0,57036565

-0,58958555

-0,61408511

1,58518303

1,65707092

1,46172617

26991

26639

25882

20

Tab. 4-12 Regressionsparameter	der Asphaltdeckschichtgemische	mit Bindemittel 50)/70 und 3%
Zusatz			



Abb. 4-67 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 50/70 und 3% Zusatz



Abb. 4-68 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 50/70 und 3% Zusatz

Der Vergleich der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen der mit dem Bindemittel 50/70 hergestellten Asphaltdeckschichtgemische zeigt sehr deutlich, dass die Referenzvariante (gelb) die geringsten Steifigkeiten im untersuchten Temperaturbereich aufweist. Hier ist sehr gut erkennbar, dass die mit Amidwachs (hellblau), Romonta (orange) und Sasobit (blau) modifizierten Asphaltdeckschichtvarianten ähnlich hohe Steifigkeiten aufweisen (siehe Abb. 4-68).

Tab. 4-13 Regressionsparameter der Asphaltbinderschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz

Asphaltmischgut	Т _R [°С]	Φ [-]	E _{min} [N/mm²]	E _{max} [N/mm²]	Z1 [-]	Z ₀ [-]
BS_Referenz	20	30667	0	31172	-0,49155409	1,60240747
DS_Sasobit		27679	0	30128	-0,48494848	1,36073063
DS_Amidwachs		28502	0	34627	-0,45474027	1,57831661
DS_Romonta		27706	0	37161	-0,46414604	1,76465652



Abb. 4-69 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz



Abb. 4-70 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Asphaltbinderschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz

Bei den Asphaltbinderschichtvarianten mit dem Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz sind zwischen Referenzvariante (gelb) und den mit Amidwachs (hellblau), Romonta (orange) und Sasobit (blau) modifiziertem Asphaltbinderschichtgemisch keine Unterschiede zwischen den Hauptkurven bzw. den Steifigkeits-Temperaturfunktionen erkennbar. Alle befinden sich bis -10°C auf ähnlichem Niveau (siehe Abb. 4-69 Abb. 4-70).

4.3.2 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Ermüdungsversuche in Form von Ermüdungsfunktionen zusammengefasst und für verschiedene Bindemittel sowie Arten und Mengen an viskositätsverändernden Zusätzen verglichen (siehe Abb. 4-71 bis Abb. 4-74).



Abb. 4-71 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz

Die in Abb. 4-71 dargestellten Ermüdungsfunktionen für die Referenzvariante SMA 8 S 25/55-55A (gelb) und die mit jeweils 2% Zusatz modifizierten Varianten zeigen keine merklichen Unterschiede im Ermüdungsverhalten.



Abb. 4-72 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz

Im Vergleich der Asphaltdeckschichtvarianten mit 2% Zusatz zeigen die Asphaltdeckschichtvarianten mit 3 % Zusatz geringe Unterschiede bzgl. der Ermüdungsfunktion. Bei elastischen Anfangsdehnungen von $\varepsilon_{el,anf} \leq 0,12 \%$ weist die Variante mit Romonta (rot) die schlechteste Ermüdungsfunktion auf. Bei den Ermüdungsfunktionen von Amidwachs (hellblau) und Sasobit (blau) sind kaum Unterschiede erkennbar (siehe Abb. 4-72).



Abb. 4-73 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 50/70 und 3% Zusatz

Abb. 4-74 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschichtgemische mit Bindemittel

25/55-55A und 3% Zusatz

Die mit dem Bindemittel 50/70 hergestellten Asphaltdeckschichtgemische zeigen keine Unterschiede in ihren Ermüdungsfunktionen (siehe Abb. 4-73). Deutliche Unterschiede in den Ermüdungsfunktionen sind bei den Asphaltbinderschichtgemischen erkennbar. Die geringsten ertragbaren Lastwechsel bis zum Versagen zeigt die Variante mit 3% Romonta. Die Referenzvariante und die Variante mit Amidwachs hingegen weisen gleiche Lastwechselanzahlen auf (siehe Abb. 4-74).

5 ERGEBNISSE DER PROGNOSERECHNUNGEN

Mittels des Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen analog zu den RDO Asphalt [3] wurden sowohl die Auswirkungen der Verbundwirkung unter Einbeziehung der in Abschnitt 4.1 und 4.3 zusammengefassten versuchstechnisch ermittelten materialspezifischen Eingangsdaten als auch der temperatur- und verkehrslastbedingten Eingangsgrößen in Abschnitt 2.4 auf das Ermüdungsverhalten untersucht. Ergänzend wurde auch das Risiko der Spurrinnenbildung analysiert.

Mit dem Programm AdToPave [20] wurde für verschiedene Befestigungsaufbauten mit variierendem Schichtenverbund der Ermüdungsstatus im Befestigungsquerschnitt auf Grundlage der Mehrschichtentheorie berechnet und die deviatorische Vergleichsspannung zur Bewertung der Spurrinnenanfälligkeit ermittelt.

Des Weiteren wurde mit dem Finite-Elemente-Programm SAFEM [25], ebenfalls für verschiedene Befestigungsaufbauten, unter Einbeziehung der versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbundparameter der Einfluss des Schichtenverbundes auf den Ermüdungsstatus untersucht.

5.1 Einfluss der Materialkombination auf den Ermüdungsstatus

Nachfolgend werden die Berechnungsergebnisse für ausgewählte Verbund- und Materialkombinationen dargestellt. Die Berechnungen erfolgten für zwei Verbund- varianten. Diese waren voller Verbund zwischen Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht sowie ohne Verbund zwischen der Asphaltdeck- und Asphaltbinder- und Asphalttragschicht kombiniert mit vollem Verbund zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht.

Durch die versuchstechnische Untersuchung des Ermüdungs- und Steifigkeitsverhaltens nach den TP Asphalt [10], [11] für die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht konnte das tatsächliche Materialverhalten der oberen beiden Asphaltschichten in den Berechnungen berücksichtigt werden. Für die Asphalttragschicht wurde der Kalibrierasphalt verwendet. Als Ergebnis der Prognoserechnungen erhält man einen Ermüdungsstatus bzw.eine prognostizierte Nutzungsdauer. Stehen für die Materialien in allen Asphaltschichten Ermüdungsfunktionen zur Verfügung, so kann der Ermüdungsstatus für den gesamten Querschnitt einer Asphaltbefestigung berechnet werden.

Die Berechnungen erfolgten für die zwei im Forschungsvorhaben verwendeten Asphaltdeckschichtvarianten unter Variation der viskositätsverändernden Zusätze mit 3 M.-% und der Asphaltbinderschicht ohne Zusätze sowie unter Variation der viskositätsverändernden Zusätze mit 3 M.-%.

In Abb. 5-1 ist der Ermüdungsstatus im Berechnungsquerschnitt für die in Tab. 5-1 aufgeführten Asphaltkombinationen dargestellt. Diese beinhalten die Referenzvariante und die mit jeweils 3 M.-% Amidwachs, Romonta und Sasobit hergestellten Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten sowie vollem Verbund zwischen den Asphaltschichten.

Die Darstellungen in Abb. 5-1 bestätigen, dass die maximalen Beanspruchungen innerhalb einer Befestigung auch in der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht auftreten können.Die Lage der maximalen Beanspruchungen ist vornehmlich abhängig von der berücksichtigten Materialkombination und dem gewählten Konstruktionsaufbau.

Variante	Ermüdungsstatus nach Nutzungs- dauer ND (30 Jahre) [%]
	Asphalttragschicht
ADS_Ref_25-55/ABS-Ref/ATS_Kali_V-V	47,7
ADS_25-55_Amid/ABS_Amid/ATS_Kali_V-V	38,65
ADS_25-55_Rom/ABS_Rom/ATS_Kali_V-V	37,00
ADS_25-55_Sas/ABS_Sas/ATS_Kali_V-V	36,26

Tab. 5-1 Ergebnisse der I	Prognoserechnungen für di	ie Varianten mit vollem	Verbund zwischen allen
Asphaltschichten			

Die Lage des Maximums des Ermüdungsstatus innerhalb einer jeden Schicht ist durch einen Punkt gekennzeichnet Jeder einzelne Punkt repräsentiert den Ermüdungsstatus, der sich aus den 143 Belastungskombinationen, bedingt durch den Einfluss von Oberflächentemperatur und Verkehr, nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahre ergibt. Für alle Asphalttragschichten befindet sich der Punkt der maximalen Beanspruchung (Nachweispunkt) an der Unterseite in der Lastachse. Bei den Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten hingegen variiert die Lage der Nachweispunkte.

c) ADS_25/55-55A_Sas/ABS_Sas/ATS_Kali_V-V

Ein Vergleich der in Tab. 5-1 dargestellten Ergebnisse der Prognoserechnungen für die Asphalttragschicht über einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren zeigt Abb. 5-2. Die dargestellten Ergebnisse sind Relativdarstellungen, bezogen auf die jeweilige Referenzvariante.

Abb. 5-1 Ermüdungsstatus im Berechnungsquerschnitt für die in Tab. 5-1 aufgeführten Varianten nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren

Abb. 5-2 Vergleich des relativen Ermüdungsstatus für die Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt mit der Asphaltdeckschicht 1 mit jeweils 3% vvZ und der Asphaltbinderschicht mit jeweils 3% vvZ bei vollem Verbund zwischen allen Asphaltschichten

Für die Referenzvariante beträgt der Ermüdungsstatus der Asphalttragschicht nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren 47,7%, d.h. eine vollständige Ermüdung kann rechnerisch nach ca. 62 Jahren erwartet werden. Der Ermüdungsstatus der Asphalttragschichten nach einer Nutzungsdauer von 30 für die mit 3 M.-% zugesetzten Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten für alle drei viskositätsverändernde Zusätze liegen in einem ähnlichen Bereich. Es kann mit einer vollständigen Ermüdung zwischen 78 Jahren (Amidwachs) und 83 Jahren (Sasobit) gerechnet werden.

Bei den untersuchten Varianten ist erkennbar, dass für die Asphalttragschicht nach 30 Jahren noch keine vollständige Ermüdung eingetreten ist, d.h. dass ein Ermüdungsstatus von 100% noch nicht erreicht ist.

Die zweite Verbundvariante, für welche der Ermüdungsstatus bzw. die prognostizierte Nutzungsdauer berechnet wurde, ist die ohne Verbund zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht und voller Verbund zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht. Hier wurde allerdings die Asphaltdeckschicht mit 50/70 Bitumen und jeweils 3 M. -% Sasobit, Amidwachs und Romonta und für die Asphaltbinderschicht die Referenzvariante ausgewählt. Die Ergebnisse sind in Tab. 5-2 dargestellt. Tab. 5-2 Ergebnisse der Prognoserechnungen der Varianten ohne Verbund zwischen Asphaltdeckschicht 2 und Asphaltbinderschicht und mit vollem Verbund zwischen Asphaltbinderund Asphalttragschicht

Variante	Ermüdungsstatus nach Nutzungsdauer ND (30 Jahre) [%]
	Asphalttragschicht
ADS_Ref_50-70/ABS-Ref/ATS_Kali_0-V	84,73
ADS_50-70_Amid/ABS_Ref/ ATS_Kali_0-V	84,24
ADS_50-70_Rom/ABS_Ref/ ATS_Kali_0-V	84,03
ADS_50-70_Sas/ABS_Ref/ ATS_Kali_0-V	126,06

Auf Grundlage der Ergebnisse der Prognoserechnungen in Tab. 5-2 konnte der maximale Ermüdungsstatus im Querschnitt für jede Materialkombination und für jede Asphaltschicht ermittelt und in Abb. 5-3 dargestellt werden.

Abb. 5-3 Ermüdungsstatus im Berechnungsquerschnitt für die Tab. 5-2 aufgeführten Varianten nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren

Ein Vergleich der in Tab. 5-2 dargestellten Ergebnisse der Prognoserechnungen der Asphalttragschicht für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren zeigt Abb. 5-4. Die dargestellten Ergebnisse sind Relativdarstellungen, bezogen auf die Referenzvariante. Für die Asphalttragschicht bei der mit Sasobit hergestellte Asphaltdeckschicht beträgt der Ermüdungsstatus nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren 126 %, d.h. eine vollständige Ermüdung kann rechnerisch bereits nach ca. 24 Jahren erwartet werden.

Auch hier erlauben die in Abb. 5-4 dargestellten Ergebnisse keine direkte Bewertung der verwendeten Zusätze, da das Verhalten der Gesamtbefestigung aus dem Zusammenwirken der berücksichtigten Materialien und dem gewählten Konstruktionsaufbau resultiert.

Abb. 5-4 Vergleich des relativen Ermüdungsstatus für die Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt und Asphaltdeckschicht 2 mit jeweils 3% vvZ und der Asphaltbinderschicht mit jeweils 3% vvZ bei vollem Verbund zwischen allen Asphaltschichten

5.2 Bewertung der Spurrinnenanfälligkeit

Die Ermittlung der Spurrinnengefährdung der Asphaltdeck- und der Asphaltbinderschichten erfolgt gemäß RDO Asphalt 09 [3] anhand der deviatorischen Vergleichsspannung in der Lastachse unterhalb der Radaufstandsfläche. Das Maximum der Vergleichsspannung zwischen Oberseite der Grenze zwischen Asphaltbinder und Asphalttragschicht (für die höchste Lastklasse) wird als Maß der Spurrinnengefährdung betrachtet [3].

In Abb. 5-5 ist für die Variante Asphaltdeckschicht 25/55-55A mit Amidwachs, Romonta und Sasobit, Asphaltbinderschicht 25/55-55A ebenfalls mit Amidwachs, Romonta und Sasobit und dem Kalibrierasphalt als Asphalttragschicht die Deviatorspannung für vollen Verbund zwischen allen Schichten, ohne Verbund zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht und voller Verbund zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht als auch ohne Verbund zwischen beiden Asphaltschichten dargestellt

a) Deviatorspannung für vollen Verbund zwischen alllen Schichten

b) Deviatorspannung ohne Verbund zwischen ADS-ABS und vollen Verbund zwischen ABS-ATS

c) Deviatorspannung ohne Verbund zwischen allen Asphaltschichten

Abb. 5-5 Vergleich der Deviatorspannungen für verschiedene Verbünde bei einer Temperatur von 47,5 C und einer Achslast von 11,5 t

Die Berechnung der Deviatorspannung erfolgte für die Temperatur von 47,5 C und der Achslast von 11,5 t. Die Asphalttragschicht wurde dabei nicht mit einbezogen. Das Maximum dieser Vergleichsspannung, welche sich hier bei einer Tiefe von 40 mm, an der Unterseite der Asphaltdeckschicht und 120 mm, an der Unterseite der Asphaltbinderschicht befindet, stellt das Maß der Spurrinnengefährdung dar. Wenn voller Schichtenverbund zwischen den Asphaltschichten vorhanden ist, besteht eine geringe Gefahr für die Bildung von Spurrinnen (siehe Abb. 5-5 a). Mit Zunahme der Deviatorspannung nimmt die Qualität des Schichtenverbundes ab und damit die Spurrinnengefährdung zu.

5.3 Einfluss des Schichtenverbundes auf den Ermüdungsstatus

Nachfolgend werden die Berechnungsergebnisse, welche den Einfluss des Schichtenverbundes auf den Ermüdungsstatus der einzelnen Asphaltschichten beschreiben, für ausgewählte Materialkombinationen, dargestellt.

Mittels Finite-Elemente-Berechnungen wurden die gemäß dem Verfahren zur rechnerischen Dimensionierung nach den RDO 09 [3] erforderlichen Kennwerte berechnet und der Ermüdungsstatus in Abhängigkeit von den im zyklischen Schersteifigkeitsversuch (siehe Abschnitt 4.) ermittelten Schichtenverbundkennwerte berechnet. Zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht wurden die versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbundkennwerte verwendet. Zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht wurde der im vorangegangenen Forschungsvorhaben [31] definierte schlechteste Verbund (Bad Case) angenommen. Auch hier wurde ein Nutzungszeitraum von 30 Jahren betrachtet.

Unter Anwendung des Programms SAFEM [25] wurden die Dehnungen in der Lastachse an der Unterseite der Asphalttragschichten ermittelt und im gleichen Punkt der Ermüdungsstatus berechnet. Für die Asphalttragschicht entspricht der gewählte Punkt dem Punkt der maximalen Beanspruchung.

In Abb. 5-6 bis Abb. 5-9 ist für die Asphalttragschicht der berechnete Ermüdungsstatus in der Lastachse, jeweils an der Schichtunterseite, als Relativwert für ausgewählte Materialkombinationen dargestellt.

In Abb. 5-6 ist der Einfluss der Auswirkung der Zusätze Sasobit, Romonta und Amidwachs (jeweils in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht) unter Variation der Bitumenemulsionsmenge und –art auf den Ermüdungsstatus dargestellt.

Abb. 5-6 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeck- und Asphaltbinderschicht mit dem Bitumen 25/55-55A

und jeweils 3 % Sasobit, Amidwachs und Romonta; der Emulsion C60 BP4-S und jeweils 200 g/m², 300 g/m² und 400g g/m²; Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt

Bei den Asphalttragschichten, für welche der Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom Schichtenverbund gemäß gültigem Regelwerk abgebildet wird, erreichen die mit unterschiedlichen Bitumenemulsionsmengen zwischen ADS und ABS sowie mit Amidwachs modifizierten Asphalten bereits vor dem für die Berechnung zugrundegelegten Nutzungszeitraum von 30 Jahren einen Ermüdungsstatus von 100%.

Auch wurde der Einfluss der verschiedenen viskositätsverändernden Zusätze bei unterschiedlichen Bindemittelsorten auf den Ermüdungsstatus in Abhängigkeit des Schichtenverbundes untersucht. Eine Darstellung der Ergebnisse ist in Abb. 5-7 zu sehen.

Abb. 5-7 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeckschicht mit Bindemittel 50/70 und 25/55-55A und Asphaltbinderschicht mit Bindemittel 25/55-55A jeweils 3% Sasobit, Amidwachs und Romonta; 200 g/m² Emulsion E1; der Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt

In Abb. 5-8 ist der Einfluss der Menge der viskositätsverändernden Zusätze, hier 2 und 3 M.-% und die Temperatur der Unterlage, hier für 0 C, auf den Ermüdungsstatus des Schichtenverbundes dargestellt.

Unabhängig der Menge an Zusätzen ist erkennbar, dass die Asphalttragschicht rechnerisch nach mehr als 30 Jahren ermüdet.

Abb. 5-8 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeckschicht mit Bindemittel 25/55-55A und jeweils 2 und 3 M:-% Sasobit, Romonta, Amidwachs; der Asphaltbinderschicht mit Bindemittel 25/55-55A; der Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt bei 0°C der Asphaltunterlage

Die Herstellung des Asphaltpaketes bei 30°C der Asphaltbinderschicht zum Anspritzen der Emulsion zeigt ebenfalls eine rechnerische Lebensdauer der Asphalttragschicht von mehr als 30 Jahren (siehe Abb. 5-9).

Abb. 5-9 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeckachicht mit Bindemittel 25/55-55A und jeweils 2 und 3M:-% Sasobit, Romonta, Amidwachs; der Asphaltbinderschicht mit Bindemittel 25/55-55A; der Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt bei 30°C der Asphaltunterlage

6 ZUSAMMENFASSUNG

Hauptziel dieses Forschungsvorhabens war, den Einfluss der viskositätsverändernden Zusätze auf den Schichtenverbund hinsichtlich Schersteifigkeit (TU Dresden) und Scherermüdung (RWTH Aachen) zu untersuchen und die daraus möglichen Konsequenzen des Einsatzes dieser Zusätze im Asphalt im Hinblick auf die Nutzungsdauer abzuschätzen.

In dem für dieses Projekt aufgestellte Untersuchungsprogramm, wurden alle möglichen Kombinationen der Wechselwirkung zwischen Asphaltgemischen, viskositätsverändernden Zusätzen, Bindemitteln und Bitumenemulsionen systematisch erfasst.

Ein Vergleich der Schersteifigkeiten des Schichtenverbundes bei Asphaltschichten ohne und Asphaltschichten mit viskositätsverändernden Zusätzen hat gezeigt, dass keine direkten Auswirkungen der mit viskositätsverändernden Zusätzen angereicherten Asphaltgemische auf den Schichtenverbund sichtbar sind. Die Abweichungen von der "besten" Variante (Deckschicht und Binderschicht mit Amidwachs) zur "schlechtesten" Variante (Deckschicht mit Romonta und Binderschicht ohne Zusatz) liegen hierbei im normalen Streubereich.

Der Vergleich der berechneten Schersteifigkeiten der im Labor und den von der Teststrecke gewonnenen Probekörpern zeigte deutliche Abweichungen. Die Schersteifigkeiten der in situ Varianten fielen dabei höher aus. Dies kann auf eine evtl. bessere Verdichtung unter Baustellenbedingungen zurückzuführen sein.

Ein Vergleich der Mittelwertkurven aller untersuchten Varianten hinsichtlich der Emulsionsmenge zeigte, dass die Variante mit dem Zusatz Amidwachs bei Verwendung der Emulsion E1 (C60BP4-S) für alle drei untersuchten Auftragmengen (200 g/m², 300 g/m² und 400 g/m²) die höchsten Schersteifigkeiten aufweist. Hingegen zeigte bei der Emulsion E2 (C40BP5-S) die Asphaltvariante mit Romonta bei 200 g/m² und 300 g/m² und bei 400 g/m² Auftragmenge die Variante mit Amidwachs die höchsten Schersteifigkeiten.

Der Vergleich des zyklischen Schersteifigkeitsversuchs und des statischen Abscherversuchs konnte nicht direkt erfolgen, da der statische Abscherversuch nach LEUTNER nicht die gesamten den Schichtenverbund beeinflussenden Parameter abbildet. Für ein schnelles, erstes Ergebnis ist der statische Abscherversuch geeignet, aber für aussagekräftige Ergebnisse soll die Prüfung mit dem zyklischen/dynamischen Versuch erfolgen, da dieser die den Schichtenverbund beeinflussenden Parameter abbildet.

Schersteifigkeitsuntersuchungen zum Einfluss der eingesetzten Menge an viskositätsverändernden Zusätzen und der Temperatur der Asphaltunterlage von 0°C, hier der Asphaltbinderschicht, lassen erkennen, dass die mit jeweils 2- und 3 M.- % Romonta, Sasobit und Amidwachs versetzten Asphaltdeckschichten keine signifikanten Abweichungen zur jeweiligen Referenzvariante zeigen. Auch bestehen kaum Unterschiede in den Schersteifigkeiten zwischen der Zugabemenge von 2- oder 3 M.-%.

Die bei 30°C untersuchten Probekörper, welche ebenfalls mit jeweils 2- und 3 M.- % Romonta, Sasobit und Amidwachs in der Asphaltdeckschicht angereicht wurden, lassen keine Auswirkungen der Zusätze als auch eine Beeinflussung durch die Temperatur von 30°C der Asphaltbinderschicht auf die Schersteifigkeit, im Vergleich zur Referenzvariante, erkennen.

Um den Ermüdungsstatus der einzelnen Asphaltschichten gemäß bzw. in Anlehnung an die RDO 09 [3] berechnen zu können, war es notwendig, die als dimensionierungs- oder bemessungsrelevante Materialparameter für alle Asphalte zu bestimmen. Dies geschah durch Steifigkeits- und Ermüdungsversuche. Dabei gab es keine Auffälligkeiten in Hinblick auf die Hauptkurven und die Steifigkeits-Temperatur-Funktionen.

Im Dimensionierungs- bzw. Prognoseverfahren in Anlehnung an die RDO Asphalt 09 [3] kann der Schichtenverbund zwischen den Asphaltschichten zurzeit nur sehr vereinfacht berücksichtigt werden (0 % für vollständig aufgelösten Schichtenverbund oder 100 % für vollständig wirksamen Schichtenverbund).

Die aus den Versuchsergebnissen abgeleitete und verbesserte sigmoidale Masterfunktion zur Beschreibung der Schersteifigkeit, konnte den Zusammenhang zwischen Schersteifigkeit, Temperatur, Frequenz und Normalspannung abbilden. Mit denen aus dieser Masterfunktion ermittelten Parametern konnte mit Hilfe eines Finiten-Elemente-Programms der Einfluss des Schichtenverbundes über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren ermittelt werden.

Die Abschätzung der Spurrinnengefährdung zur Bewertung der plastischen Verformung wurde mit Hilfe der deviatorischen Spannung in der Lastachse an der Oberfläche und an den Schichtgrenzflächen zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht mit den aus den zyklischen Versuchen bestimmten Funktion für den Schichtenverbund durchgeführt. Ein unzureichender Schichtenverbund führt zwangsläufig zu einer Erhöhung der Spurrinnengefährdung.

Für eine Beurteilung des Einflusses von viskositätsverändernden Zusätzen auf die Ermüdungsbeständigkeit des Schichtenverbunds wurden dynamische Scherermüdungsprüfungen an drei Varianten durchgeführt. Durch eine Optimierung der Prüfmatrix konnten Ermüdungskurven erstellt werden, welche eine statistisch abgesicherte Beurteilung ermöglichen. Die Verbundvarianten mit viskositätsverändernden Zusätzen wiesen ein vergleichbares Ermüdungsverhalten zu der Referenz ohne Zusätze auf.

Ein generell negativer Einfluss der viskositätsverändernden Zusätze auf den Schichtenverbund konnte durch die in diesem Forschungsvorhaben umfangreichen Untersuchungen, sowohl der Schersteifigkeit als auch der Scherermüdung, nicht nachgewiesen werden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-2 Kraft-Weg-Diagramm gemäß TP Asphalt-StB, Teil 80 [5] 6 Abb. 2-3 Ablauf des Prüfprogramms nach WELLNER und ASCHER [30] 7 Abb. 2-4 Servohydraulische Prüfmaschine mit Prüfvorrichtung (links) und mit 9 eingebautem Probekörper und geschlossener Prüfvorrichtung (rechts) 8 Abb. 2-5 Einkleben eines Probekörpers in die Stahlhalbschalen, Probekörper in untere 8 Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte), 9 Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts) 9 Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung 10 Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer 11, Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software 9 GEOSYS" 12 Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software 16 Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf 17 Frequenzen und vier Normalspannung eine Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf 12 Abb. 2-14 Darstel	Abb. 2-1 Aufbau der Schervorrichtung gemäß TP Asphalt-StB, Teil 80 [5]	6
Abb. 2-3 Ablauf des Prüfprogramms nach WELLNER und ASCHER [30] 7 Abb. 2-4 Servohydraulische Prüfmaschine mit Prüfvorrichtung (links) und mit eingebautem Probekörper und geschlossener Prüfvorrichtung (rechts) 8 Abb. 2-5 Einkleben eines Probekörpers in die Stahlhalbschalen, Probekörper in untere Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte), 8 Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts) 9 Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung 10 Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer 11 (1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 12 14 Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch 14 Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12] 17 Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) 22 Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) 23 Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTO	Abb. 2-2 Kraft-Weg-Diagramm gemäß TP Asphalt-StB, Teil 80 [5]	6
Abb. 2-4 Servohydraulische Prüfmaschine mit Prüfvorrichtung (links) und mit eingebautem Probekörper und geschlossener Prüfvorrichtung (rechts) 8 Abb. 2-5 Einkleben eines Probekörpers in die Stahlhalbschalen, Probekörper in untere Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte), 9 Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts) 9 Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung 10 Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer 11 (1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software 14 Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software 14 Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen 15 Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf 17 Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) 22 Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) 24 Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und 24 <tr< td=""><td>Abb. 2-3 Ablauf des Prüfprogramms nach WELLNER und ASCHER [30]</td><td>7</td></tr<>	Abb. 2-3 Ablauf des Prüfprogramms nach WELLNER und ASCHER [30]	7
eingebautem Probekörper und geschlossener Prüfvorrichtung (rechts)8Abb. 2-5 Einkleben eines Probekörpers in die Stahlhalbschalen, Probekörper in untere Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte), Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts)9Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung10Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer (1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Schenwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannung (12)17Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)24Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch 2624Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung der Einzelversuch eder Hauptversuchsphase Abb. 2-21 Sche	Abb. 2-4 Servohydraulische Prüfmaschine mit Prüfvorrichtung (links) und mit	
Abb. 2-5 Einkleben eines Probekörpers in die Stahlhalbschalen, Probekörper in untere Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte), Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts) 9 Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung 10 Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer (1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 12 Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch 14 Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen 15 Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf 17 Frequenzen und vier Normalspannungen 21 Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) 22 Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und 23 Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und 24 Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen 24	eingebautem Probekörper und geschlossener Prüfvorrichtung (rechts)	8
Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte), Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts)9Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung10Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer (1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 12Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen14Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen16Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-213 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-213 Schematische Darstellu	Abb. 2-5 Einkleben eines Probekörpers in die Stahlhalbschalen, Probekörper in untere	е
Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts)9Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung10Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer11(1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 1214Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch14Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen15Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannung22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch 2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exe	Stahlhalbschalen einkleben (links), Aufbringen der oberen Stahlhalbschalen (Mitte),	
Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung10Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer(1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 12Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch14Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen15Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fün Frequenzen und vier Normalspannung22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-213 Schematische Darstellung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-221 Schematische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung de	Kontrolle des Abstandes zwischen den Stahlhalbschalen (rechts)	9
Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer (1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 12 Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch 14 Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen 15 Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, 17 der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12] 17 Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) 12 und 10°C (rechts) 22 Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) 21 Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und 23 Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen 24 Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen 24 Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen 24 Abb. 2-17	Abb. 2-6 Mechanisches Modell der Prüfvorrichtung	10
(1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und zu prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 12Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen 15 Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase 16 Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12] 17 Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannungen 21 Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts) 22 Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) und 50°C (rechts) 22 Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts) 23 Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts) 24 Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch 26 Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude 27 Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34] 24 Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion 30 Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion 30 Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30 30 30	Abb. 2-7 Parameter für den Versuchsablauf mit Temperatur und Temperierungsdauer	
prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software "GEOSYS" 12Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch14Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen15Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) und 50°C (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Einzelversuche der Hauptversuch [42]26Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls [E]31	(1), Frequenz und Anzahl der Lastwechsel (2), aufzubringende max. Scherwege und z	zu
"GEOSYS"12Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch14Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen15Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur,17der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf14Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls [E]31	prüfende Normalspannung (3) für den zyklischen Schichtenverbund mit der Software	
Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch14Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen15Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur,17der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf14Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls [E]31	"GEOSYS" 12	
Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen15Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur,17der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf17Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls [E]31	Abb. 2-8 Ablauf des Prüfprogramms für den zyklischen Schersteifigkeitsversuch	14
Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase16Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls [E]31	Abb. 2-9 Aufbau der Versuchsmatrix der Scherermüdungsprüfungen	15
Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase16Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-19 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-33: Exemplarische Darstellung der Hauptvkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-10 Temperatur und Normalspannung der Vorversuchsphase	16
Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links) und 10°C (rechts)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links) und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls [E]31	Abb. 2-11 Verlauf des Scheramplituden-Sweeps in der Vorversuchsphase	16
der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]17Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf21Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links)22und 10°C (rechts)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-12 Experimentell ermittelte Schersteifigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur	ſ,
Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünfFrequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	der Belastungsfrequenz und der Normalspannung [12]	17
Frequenzen und vier Normalspannungen21Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-13 Exemplarische Darstellung einer Hauptkurve bei vier Temperaturen, fünf	
Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links)und 10°C (rechts)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Frequenzen und vier Normalspannungen	21
und 10°C (rechts)22Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)22und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls [E]31	Abb. 2-14 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei -10°C (links	3)
Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links)und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Einzelvurve des absoluten E-Moduls [E]31	und 10°C (rechts)	22
und 50°C (rechts)22Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und23erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch2626Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-15 Darstellung der linearen Abhängigkeit der Normalspannung bei 30°C (links))
Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]30Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	und 50°C (rechts)	22
erweiterter Ansatz (rechts)23Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen24Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den24Hauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-16 Vergleich der Hauptkurven nach WELLNER/HRISTOV [17] (links) und	
Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den Hauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	erweiterter Ansatz (rechts)	23
Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)24Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den26Hauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-17 Darstellung der Schersteifigkeit in Abhängigkeit des Scherweges für einen	
Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für denHauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Probekörper (links) und für drei Probekörper (rechts)	24
Hauptversuch26Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-18 Beispielhafter Ablauf der Festlegung der Prüfparameter für den	
Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase26Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Hauptversuch 26	
Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude27Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-19 Beispielhafte Auswertung der Einzelversuche der Hauptversuchsphase	26
Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]29Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-20 Umgang mit Einschwingvorgängen der Scheramplitude	27
Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion30Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-21 Schematische Darstellung Spaltzug-Schwellversuch [34]	29
Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E 31	Abb. 2-22: Exemplarische Darstellung der Ermüdungsfunktion	30
	Abb. 2-23: Exemplarische Darstellung der Hauptkurve des absoluten E-Moduls E	31

Abb. 2-24: Änderung der Temperatur innerhalb des Asphaltpaketes in Abhängigkeit vo	on
charakteristischen Oberflächentemperaturen gemäß RDO 09 [3]	33
Abb. 2-25: Häufigkeitsverteilung der charakteristischen Oberflächentemperaturen, hie	r
exemplarisch für Zone 3 gemäß RDO 09 [3]	33
Abb. 2-26: Häufigkeitsverteilung der Achslastklassen, hier exemplarisch für BAB	
Fernverkehr gemäß RDO 09 [3]	33
Abb. 2-27 Beispiel für die Darstellung des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit von der	
Nutzungsdauer 36	
Abb. 2-28 gewählter Befestigungsaufbau für BK 100	37
Abb. 2-29 Darstellung des Ermüdungsstatus im Querschnitt der ADS, ABS und ATS	38
Abb. 2-30 Beispiel für die Darstellung des Ermüdungsstatus für drei Asphaltvarianten	
und eine Verbundart bezogen auf eine Referenzvariante	39
Abb. 3-1 Übersicht der Materialkombinationen	43
Abb. 3-2 Einbaupläne mit Unterteilung in Bauabschnitt eins bis drei für die Teststrecke	Э
auf dem Gelände der RWTH Aachen	44
Abb. 3-3 Einbau der Asphaltbinderschicht für die Herstellung der Teststrecke auf dem	
Gelände der RWTH Aachen	45
Abb. 3-4 Fertige Asphaltbinderschichten (links) und Anspritzen der Emulsionen	
(rechts) 46	
Abb. 3-5 Vorbereitung der Fläche für das Ziehen der Bohrkerne	46
Abb. 3-6 Einbauplan/Probennahmeplan mit Lage, Anzahl und Durchmesser der für jed	des
Arbeitspaket zu entnehmenden Bohrkerne	47
Abb. 3-7 Lagerung der gekennzeichneten Bohrkerne/Prüfkörper	47
Abb. 3-8 Walzsegmentverdichter und Ablauf des Verdichtungsprogrammes	49
Abb. 3-9 Überprüfen der Temperatur auf der Asphaltbinderschicht	49
Abb. 3-10 Herausbohren der Probekörper für die zyklischen Schersteifigkeitsversuche	÷50
Abb. 4-1: Mittelwerte der versuchstechnisch ermittelten Schersteifigkeiten für alle	
Materialkombinationen	53
Abb. 4-2: Vergleich der in situ Probekörper und Laborprobekörper, jeweils	
Referenzvariante (ADS) SMA 8S (25/55-55A) / ABS AC 16 B S (25/55-55A) und ADS	
SMA 8S_Rom (25/55-55A)/ ABS AC 16 B S (25/55-55A)	55
Abb. 4-3: Flächenfunktion zu Abb. 4-2	56
Abb. 4-4: Vergleich der einzelnen Varianten mit 200 g/m ² (oben links), 300 g/m ² (oben	1
rechts) und 400 g/m ² (unten) Emulsion C60BP4- S (E1)	60
Abb. 4-5: Vergleich der einzelnen Varianten mit 200 g/m ² (oben links), 300 g/m ² (oben	1
rechts) und 400 g/m ² (unten) Emulsion C40BP5-S (E2)	61
Abb. 4-6: Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante und de	эr
Varianten mit Sasobit, Romonta und Amidwachs mit jeweils 200 g/m ² Emulsion C60Bl	P4-
S (E1) dargestellt als Flächenfunktion	62

Abb. 4-7: Vergleich der Ergebnisse (Mittelwerte) des statischen Abscherversuchs nach LEUTNER [5] für Emulsion E1 mit jeweils 200, 300 und 400 g/m² Auftragsmenge für Sasobit, Romonta und Amidwachs 63 Abb. 4-8: Vergleich der Ergebnisse (Mittelwerte) des statischen Abscherversuchs nach LEUTNER [5]] für Emulsion E2 mit jeweils 200, 300 und 400 g/m² Auftragsmenge für Sasobit, Romonta und Amidwachs 64 Abb. 4-9 Vergleich der Eingangsparameter zyklischer Versuch und statischer Versuch (rot) zur Ermittlung der Schersteifigkeit bzw. des wirksamen Schichtenverbundes 65 Abb. 4-10 Vergleich der Ergebnisse dynamischer Schersteifigkeitsversuch und statischer Versuch nach LEUTNER [5] 66 Abb. 4-11 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit bei vier Temperaturen 68 Abb. 4-12 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit bei vier Temperaturen 68 Abb. 4-13 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten für Referenzvariante ADS 1 (25/55-55A), Referenzvariante ADS 2 (50/70), ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit und ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit 68 Abb. 4-14 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Romonta bei vier Temperaturen 69 Abb. 4-15 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Romonta bei vier Temperaturen 69 Abb. 4-16 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten für Referenzvariante ADS 1 (25/55-55A), Referenzvariante ADS 2 (50/70), ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Romonta und ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Romonta 70 Abb. 4-17 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs bei vier Temperaturen 71 Abb. 4-18 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs bei vier Temperaturen 71 Abb. 4-19 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten für Referenzvariante ADS 1 (25/55-55A), Referenzvariante ADS 2 (50/70), ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs und ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Amidwachs 71 Abb. 4-20 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (25/55-55A) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit, Amidwachs, Romonta bei vier Temperaturen 72 Abb. 4-21 Mittelwerte der Schersteifigkeiten für ADS (50/70) und ABS (25/55-55A) mit Sasobit, Amidwachs, Romonta bei vier Temperaturen 72 Abb. 4-22 Vergleich wie in Abb. 4-20 als Flächenfunktion 72 Abb. 4-23 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 2% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 2% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs mit jeweils ABS (25/55-55A) bei 0°C 75

Abb. 4-24 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 3% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 3% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und jeweils ABS (25/55-55A) bei 0°C 75

Abb. 4-25 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 2% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 2% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs mit jeweils ABS (25/55-55A) bei 10°C 76

Abb. 4-26 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 3% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 3% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und jeweils ABS (25/55-55A) bei 10°C 77

Abb. 4-27 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 2% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 2% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs mit jeweils ABS (25/55-55A) bei 30°C 77

Abb. 4-28 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten der Referenzvariante ADS (25/55-55A) / ABS ((25/55-55A), ADS (25/55-55A) mit 3% Sasobit, ADS (25/55-55A) mit 3% Romonta und ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und jeweils ABS (25/55-55A) bei 30°C 78

Abb. 4-29 Vergleich der Mittelwerte der Schersteifigkeiten ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs, ADS (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und ABS (25/55-55A) bei 0°C, ADS (25/55-55A) mit 2% Amidwachs, 3% Amidwachs und ABS (25/55-55A) bei 30°C als Flächenfunktion 78

Abb. 4-30: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von -10°C (Normalkraft 0 MPa) 80 Abb. 4-31: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Sasobit bei einer Prüftemperatur von -10°C (Normalkraft 0 MPa) 80 Abb. 4-32: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Romonta bei einer Prüftemperatur von -10°C (Normalkraft 0 MPa) 81 Abb. 4-33: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur von 20°C (Normalkraft 0 MPa) 82 Abb. 4-34: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Sasobit bei einer Prüftemperatur von 20°C (Normalkraft 0 MPa) 83 Abb. 4-35: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Romonta bei einer Prüftemperatur von 20°C (Normalkraft 0 MPa) 83 Abb. 4-36: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperatur 84 von 50°C (Normalkraft 0 MPa) Abb. 4-37: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Sasobit bei einer Prüftemperatur von 50°C (Normalkraft 0 MPa) 85

Abb. 4-38: Ergebnisse des Vorversuchs der Variante Romonta bei einer Prüftempera	tur
von 50°C (Normalkraft 0 MPa)	85
Abb. 4-39: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperate	ur
von -10°C (Normalkraft 0,45 MPa)	86
Abb. 4-40: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperate	ur
von 20°C (Normalkraft 0,45 MPa)	87
Abb. 4-41: Ergebnisse des Vorversuchs der Referenzvariante bei einer Prüftemperate	ur
von 50°C (Normalkraft 0,45 MPa)	88
Abb. 4-42: Prüfmatrix der Hauptversuchsphase	89
Abb. 4-43: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der ersten Stufe der	
Hauptversuchsphase	91
Abb. 4-44: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der ersten Stufe der	
Hauptversuchsphase	91
Abb. 4-45: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der ersten Stufe der	
Hauptversuchsphase	91
Abb. 4-46: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der zweiten Stufe der	
Hauptversuchsphase	92
Abb. 4-47: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der zweiten Stufe der	
Hauptversuchsphase	93
Abb. 4-48: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der zweiten Stufe der	
Hauptversuchsphase	93
Abb. 4-49: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der dritten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C, 0 MPa)	94
Abb. 4-50: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der dritten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C, 0 MPa)	94
Abb. 4-51: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der dritten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C, 0 MPa)	95
Abb. 4-52: Ermüdungskurven aller Varianten für eine Prüftemperatur von 20°C und e	iner
Normalkraft von 0 MPa	95
Abb. 4-53: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der ersten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C;0,45 MPa)	96
Abb. 4-54: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der ersten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C;0,45 MPa)	97
Abb. 4-55: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der ersten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C;0,45 MPa)	97
Abb. 4-56: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der zweiten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)	98
Abb. 4-57: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der zweiten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)	98

Abb. 4-58: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der zweiten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)	99
Abb. 4-59: Ermüdungskurve der Referenzvariante in der dritten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)	100
Abb. 4-60: Ermüdungskurve der Variante Sasobit in der dritten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)	100
Abb. 4-61: Ermüdungskurve der Variante Romonta in der dritten Stufe der	
Hauptversuchsphase (20°C; 0,45 MPa)	100
Abb. 4-62: Ermüdungskurven aller Varianten für eine Prüftemperatur von 20°C und e	iner
Normalkraft von 0,45 MPa	101
Abb. 4-63 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemitte	el
25/55-55A und 2% Zusatz	103
Abb. 4-64 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen der	
Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz	103
Abb. 4-65 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemitte	el
25/55-55A und 3% Zusatz	104
Abb. 4-66 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der	
Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz	105
Abb. 4-67 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemitte	el
50/70 und 3% Zusatz	106
Abb. 4-68 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der	
Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 50/70 und 3% Zusatz	106
Abb. 4-69 Vergleich der Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische mit Bindemi	ttel
25/55-55A und 3% Zusatz	107
Abb. 4-70 Vergleich Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der	
Asphaltbinderschichtgemische mit Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz	108
Abb. 4-71 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit	
Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz	109
Abb. 4-72 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit	
Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz	109
Abb. 4-73 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische mit	
Bindemittel 50/70 und 3% Zusatz	110
Abb. 4-74 Vergleich der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschichtgemische mit	t
Bindemittel 25/55-55A und 3% Zusatz	110
Abb. 5-1 Ermüdungsstatus im Berechnungsquerschnitt für die in Tab. 5-1 aufgeführte	en
Varianten nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren	114
Abb. 5-2 Vergleich des relativen Ermüdungsstatus für die Asphalttragschicht mit	
Kalibrierasphalt mit der Asphaltdeckschicht 1 mit jeweils 3% vvZ und der	
Asphaltbinderschicht mit jeweils 3% vvZ bei vollem Verbund zwischen allen	
Asphaltschichten 115	

Abb. 5-3 Ermüdungsstatus im Berechnungsquerschnitt für die Tab. 5-2 aufgeführten Varianten nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren

Abb. 5-4 Vergleich des relativen Ermüdungsstatus für die Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt und Asphaltdeckschicht 2 mit jeweils 3% vvZ und der Asphaltbinderschicht mit jeweils 3% vvZ bei vollem Verbund zwischen allen Asphaltschichten 117

Abb. 5-5 Vergleich der Deviatorspannungen für verschiedene Verbünde bei einer Temperatur von 47,5 C und einer Achslast von 11,5 t

Abb. 5-6 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeck- und Asphaltbinderschicht mit dem Bitumen 25/55-55A und jeweils 3 % Sasobit, Amidwachs und Romonta; der Emulsion C60 BP4-S und jeweils 200 g/m², 300 g/m² und 400g g/m²; Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt 120

Abb. 5-7 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeckschicht mit Bindemittel 50/70 und 25/55-55A und Asphaltbinderschicht mit Bindemittel 25/55-55A jeweils 3% Sasobit, Amidwachs und Romonta; 200 g/m² Emulsion E1; der Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt 121

Abb. 5-8 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeckschicht mit Bindemittel 25/55-55A und jeweils 2 und 3 M:-% Sasobit, Romonta, Amidwachs; der Asphaltbinderschicht mit Bindemittel 25/55-55A; der Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt bei 0°C der Asphaltunterlage 122

Abb. 5-9 Vergleich des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom versuchstechnisch bestimmten Schichtenverbund zwischen der Aspaltdeckachicht mit Bindemittel 25/55-55A und jeweils 2 und 3M:-% Sasobit, Romonta, Amidwachs; der Asphaltbinderschicht mit Bindemittel 25/55-55A; der Asphalttragschicht mit Kalibrierasphalt bei 30°C der Asphaltunterlage 123

119

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2-1 Maximal aufzubringende Scherwege in Abhängigkeit von der Temperatur [2]	11
Tab. 2-2 Variation der Belastungsfrequenz, Anzahl der Lastwechsel und Nummer der	
ausgewerteten Lastwechsel	11
Tab. 2-3 Belastungsstufen des Scheramplituden-Sweeps	16
Tab. 2-4 Versuchsbedingungen im Spaltzug-Schwellversuch zur Untersuchung des	
Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphaltgemischen	28
Tab. 2-5 Achslastklassen und zugeordnete Häufigkeiten für BAB Fernverkehr [3]	37
Tab. 3-1 Übersicht der Materialvarianten	42
Tab. 4-1 Übersicht der Materialkombinationen	52
Tab. 4-2 Art und Dosierung der polymermodifizierten Bitumenemulsion in Abhängigkei	it
von der Unterlage in den Belastungsklassen Bk 100 bis Bk 3,2 [9]	57
Tab. 4-3 Art und Dosierung der lösemittelhaltigen Bitumenemulsion in Abhängigkeit vo	on
der Unterlage in den Belastungsklassen Bk1,8 bis Bk 0,3 [9]	57
Tab. 4-4 Übersicht der zu prüfenden Materialkombinationen	58
Tab. 4-5 Übersicht Materialkombinationen der mit unterschiedlichen Bindemitteln	
hergestellten Asphaltdeckschichten	67
Tab. 4-6 Übersicht Materialkombinationen der bei Temperaturen von 0°C, 10°C, 30°C	
und 2% und 3% viskositätsverändernden Bindemitteln hergestellten Asphaltschichten	74
Tab. 4-7 Übersicht der zu untersuchenden Varianten	79
Tab. 4-8 : Laststufen der Hauptversuche für eine Prüftemperatur von 20 °C und einer	
Normalkraft von 0 MPa	84
Tab. 4-9 : Laststufen der Hauptversuche für eine Prüftemperatur von 20 °C und einer	
Normalkraft von 0,45 MPa	87
Tab. 4-10 Regressionsparameter der Hauptkurven für die Asphaltdeckschichtgemisch	е
mit Bindemittel 25/55-55A und 2% Zusatz 1	102
Tab. 4-11 Regressionsparameter der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel	
25/55-55A und 3% Zusatz 1	104
Tab. 4-12 Regressionsparameter der Asphaltdeckschichtgemische mit Bindemittel 50/	70
und 3% Zusatz 105	
Tab. 4-13 Regressionsparameter der Asphaltbinderschichtgemische mit Bindemittel	
25/55-55A und 3% Zusatz 1	107
Tab. 5-1 Ergebnisse der Prognoserechnungen für die Varianten mit vollem Verbund	
zwischen allen Asphaltschichten 1	113
Tab. 5-2 Ergebnisse der Prognoserechnungen der Varianten ohne Verbund zwischen	
Asphaltdeckschicht 2 und Asphaltbinderschicht und mit vollem Verbund zwischen	
Asphaltbinder- und Asphalttragschicht 1	116

Tab.1 Ergebnisse der statischen Schersteifigkeitversuche nach LEUTNER für ADS und ABS mit Sasobit 164

Tab. 2 Ergebnisse der statischen Schersteifigkeitsversuche nach LEUTNER für ADSund ABS mit Romonta165

Tab. 3 Ergebnisse der statischen Schersteifigkeitsversuche nach LEUTNER für ADSund ABS mit Amidwachs166

LITERATURVERZEICHNIS

[1] AL SP-Asphalt 09 (Ausgabe 2009), Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2009

[2] AL "Zyklischer Scherversuch"- Schersteifigkeit, Teil 48, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2019

[3] RDO Asphalt 09: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2009

[4] RStO 12 – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2012

[5] TP Asphalt-StB, Teil 80: Abscherversuch, Forschungsgesellschaft für Straßenund Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2012

[6] TP Asphalt-StB 07,Teil 33,Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2007

[7] TP Asphalt-StB 07, Teil 30, Herstellung von Asphalt-Probekörpern mit dem Marshall-Verdichtungsgerät (MVG), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2007

[8] TP Asphalt-StB 07: Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2007.

[9] ZTV Asphalt 07 - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2007

[10] Technische Prüfvorschrift für Asphalt, Teil 24 Spaltzug-Schwellversuch – Beständigkeit gegen Ermüdung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2018 [11] Technische Prüfvorschrift für Asphalt, Teil 26 Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2018

[12] Ascher, D: Einfluss des Schichtenverbundes auf die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen, Manuskript zur Dissertation, TU Dresden, unveröffentlicht, Bearbeitungsstand 2011

[13] Blasl, A.; Kraft, J.; Wellner, F.:

Performance prediction of asphalt mixes with high RA contents using the German design approach, 8th International EATA Conference, Granada, Spanien, 2019

[14] Blasl, A.; Zeißler, A.; Wellner, F.:

Case study: Crack propagation in situ vs. service life prediction, International Symposium on Frontiers of Road and Airport Engineering iFRAE (online conference), Delft, Niederlande, 2021

[15] Bommert, F.: Einfluss von Wachsen auf den Schichtenverbund und die Haftung des Abstreusplittes bei Gussasphalt, Teil 1: Mechanische Laboruntersuchungen, Schlussbericht zum AP 01 351, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, 2002

[16] Canestrari, F., Santagata, E.: Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements, The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, No. 1, 39-46, March 2005

[17] Crispino, M., Festa, B., Giannattasio, P., Nicolosi, V.: Evaluation of the interaction between the asphalt concrete layers by a new dynamic test, 8th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Washington State University, pp. 741-754, Seattle, 1997

[18] DE BONDT, A.H. : Anti-reflective Cracking Design of (Reinforced), Asphaltics Overlays, Dissertation, Delft University of Technology, 1999

[19] Harrigan, E., Sousa, J., Solaimanian, M., Weissman, S.: Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool, Strategic Highway Research Program SHRP-A-698, Washington DC, 1994

[20] Ingenieurgesellschaft für Dimensionierung und Analyse von Verkehrsflächen GmbH (IDAV GmbH), Dresden 2018

[21] Johannsen, K.: Prüfung und Bewertung des Verbundzustandes von Asphaltbefestigungen, Dissertation, Dresden 2012 [22] Mohammad, L. N., Wu, Z., Raqib, A.: Investigation of the Behavior of Asphalt Tack Coat Interface Layer, Louisiana Transportation Research Center, 2005

[23] Mohammad, L. N., Elseifi, M. A.,/ Bae, A. et al.: Optimization of Tack Coat for HMA Placement, NCHRP REPORT 712, TRB, 2012

[24] Müller, A.: Baustoffrecycling, Entstehung - Aufbereitung - Verwertung, Seite 170, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2018

[25] Oeser, Markus; Wang, Dawei; Liu, Pengfei; Wellner, Frohmut; Reinhardt, Uwe: Rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen über ein Finite Elemente Modell - Verbesserung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (2017), Nr. 1125

[26] Raab,C., Partl, M.N.: Methoden zur Beurteilung des Schichtenverbundes von Asphaltbelägen, ASTRA-Projekt FA 12/94, 1999

[27] Romanoschi, S., Metcalf, J.: The characterization of pavement layer interfaces Ninth, International Conference on Asphalt Pavements, Denmark 2002

[28] Sanders, P.J., Brown, S. F., Thom N. H.: Reinforced asphalt for crack and rut control, 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, CAPSA, 1999

[29] Sholar, G., Page, G., Musselmann, J. u.a.: Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats, Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists, Volume 73, 2004

[30] Wellner, F., Ascher, D.: Untersuchungen zur Wirksamkeit des Haftverbundes und dessen Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen, Schlussbericht zum AiF-Projekt Nr. 13589 BR/1, Dresden, 2007

[31] Wellner, F, Hristov, B.: Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt, Teil 1, IGF-Forschungsvorhaben 17634 BG, Dresden, 2016

[32] West, R. C, Zhang, J, Moore, J: Evaluation of Bond Strength between Pavement Layers, NCAT Report 05-08, The Alabama Department of Transportation, 2005

[33] Wistuba, M.; Renken, P.: Walzasphalte mit viskositätsverändernden Zusätzen - Entwicklung und Optimierung der Eignungs- und Kontrollprüfungsverfahren und Bestimmung der Einflüsse auf die performance-orientierten Asphalteigenschaften, Schlussbericht zum AiF-Projekt Nr. 15589 N, Braunschweig, 2012 [34] Zeißler, A. Rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise - Möglichkeiten und Perspektiven. Habilitationsschrift. Technische Universität Dresden. 2021

ANLAGEN
Anlage 1:	Kontrollprüfungen	aller Asphaltgemis	che (zu Abschnitt 3.1)
-----------	-------------------	--------------------	------------------------

Kornzusammensetzung des Ge-						
ste	einskö	rnur	ngsgem	nisches		
mm	Rüc	K-	Durch	1- Massa@/		
111111	stan	d	gang			
16,00				Kion		
11,20	0,9)	100	Ries		
8,00	43,9	9	99,1	72.5		
5,60	27,7	7	55,1	72,5		
2,00	4,4		27,4			
1,00	2,6		22,9	Sand		
0,71	5,5		20,3			
0,125	2,3		14,9	16,2		
0,063	1,4		12,6			
<0,063	11,2		11,2	Füller		
				11,2		
Asphaltmischgut						
Rohdic	Rohdichte		/cm ³	2,462		
Raumd	ichte	ç	/cm ³	2,391		
Hohlra	um-	V	ol%	2,9		
geha	alt					

Kontrollprüfung SMA 8 S 25/55-55A



Bindemitteleigenschaften					
Ring u. Kugel	С°	61,0			
Nadelpenetration	0,1mm	26			

Abb. A 1: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Referenzvariante SMA 8S 25/55-55A

Kontrollprüfung SMA 8 S 25/55-55A_2% Sasobit

	Pi al al al	9 0		
Korn	zusamn einsköri	nensetzun nunasaem	g des Ge- isches	100 SMA 8 S 25/55-55A_2%
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%	Sasobit $\overline{\otimes}80$ - \bullet - HK oben
16,00			King	$ \underline{2}^{70} - \bullet - HK$ unten
11,20	11,0	100	Kies	
8,00	38,0	89,0	77 1	
5,60	28,1	51,0	77,1	
2,00	5,3	22,9		
1,00	1,6	17,6	Sand	is 20
0,71	2,8	16,0		
0,125	2,0	13,2	12,8	
0,063	1,2	11,0		063 125 3,71 2,71 11,25
<0,063	10,1	10,1	Füller	Siehnennöffnungsweite [mm]
			10,1	
	Asph	altmischg	ut	Bindemitteleigenschaften
Rohdio	chte	g/cm³	2,464	Ring u. Kugel °C 81,6
Raumd	ichte	g/cm³	2,345	Nadelpenetraion 0,1mm 26,0
Hohlra	um-	Vol%	4,9	
geha	alt			

Abb. A 2: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 25/55-55A _2% Sasobit

Kornz ste	usamm inskörn	ensetzung ungsgemi	g des Ge- sches		100 90	SMA 8 S 25	5/55-55A_3%	
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%	N%]	80	$- \bullet - HK oben$		
16,00			Kies	<u> </u>	60	– • – HK unten		li
11,20	2,0	100	- Ries	ang	50			h
8,00	45,7	98,0	72.2	chg	30			
5,60	24,6	52,3	12,5	Ju -	20			
2,00	3,7	27,7		iebo	20			
1,00	2,1	24,0	Sand	⊡	10			
0,71	4,2	21,9						
0,125	2,6 17,7		14,1		0	т г т	5 7	586
0,063	1,5	15,1			,12,06		÷	5, 11,
<0,063	13,6	13,6	Füller					
13,6				Siebnennöff	nungsweite	[mm]		
Asphaltmischgut					Bindemittel	eigenscha	aften	
Rohdid	Rohdichte g/cm ³		2,435		R	ting u. Kugel	С°	83,0
Raumd	ichte	g/cm ³	2,394		Na	delpenetration	0,1mm	26,0
Hohlra	um-	Vol%	1,7					
geha	alt							

Kontrollprüfung SMA 8 S 25/55-55A_3% Sasobit

Abb. A 3: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 25/55-55A _3% Sasobit

Kontrollprüfung SMA 8 S 25/55-55A_2% Romonta

Hohlraum-

gehalt

Vol.-%

Kornz	zusamme einskörnu	ensetzung Inasaem	g des Ge- isches		100 -		5/55-55A_2%	
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%		90 - 80 - 70 -	Romonta – • – HK oben		
16,00			King	1	2,0	– • – HK unten		
11,20	9,0	100	Kies					
8,00	37,1	91	72.5	-				1
5,60	27,4	53,9	73,5	-	2 40 -			.•
2,00	6,6	26,5		-			ا بالتقسقة	
1,00	2,0	19,9	Sand	Ö	<u> スプロー</u>			
0,71	3,5	17,9			10			
0,125	2,2	14,3	15,6		0 -			<u> </u>
0,063	1,2	12,1				,121,		5,6 11,3
<0,063	10,8	10,8	Füller		c	Siebnenr	nöffnungswe	ite [mm]
			10,8					
	Aspha	tmischg	Jt]		Bindemittel	eigenscha	aften
Rohdi	chte	g/cm ³	2,439		R	ing u. Kugel	°C	64,4
Raumd	lichte	g/cm ³	2,387		Nac	lelpenetration	0,1mm	27,0

Abb. A 4: Sieblinie, N	lischgut- und Bindemitteleig	genschaften der As	sphaltdeckschicht ?	SMA 8S
25/55-55A _2% Rom	onta			

2,1

64,4

27,0



Kontrollprüfung SMA 8 S 25/55-55A_3% Romonta

Abb. A 5: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 25/55-55A _3% Romonta

Kontrollrüfung SMA 8 S 25/55-55A_2% Amidwachs

gehalt

Kornz	usamme	ensetzung Inasaemi	g des Ge- isches	100 SMA 8 S 25/55-55A_2%
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%	$ \begin{bmatrix} 30 \\ 80 \\ 570 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Amidwachs \\ - HK oben \end{bmatrix} $
16,00			King	$ \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{O} = HK$ unten
11,20	6,8	100	ries	
8,00	40,2	93,2	72.5	
5,60	26,6	53,0	73,5	
2,00	5,6	26,5		
1,00	2,0	20,9	Sand	
0,71	4,3	18,8		
0,125	2,7	14,5	16,1	
0,063	1,4	11,8		,069 ,125 5,6 11,25
<0,063	10,4	10,4	Füller 10,4	Siebnennöffnungsweite [mm]
	Aspha	Itmischau	Jt	Bindemitteleigenschaften
Rohdie	chte	g/cm ³	2,436	Ring u. Kugel °C 82,6
Raumd	ichte	g/cm ³	2,395	Nadelpenetration 0,1mm 25,0
Hohlra geha	ium- alt	Vol%	1,7	

Abb. A 6: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 25/55-55A _2% Amidwachs

Kornz ste	zusamme einskörnu	nsetzung Ingsgemi	des Ge- sches	100 90 SMA 8 S 25/55-55A_3%
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%	$\begin{array}{c} Amidwachs \\ \hline \\ $
16,00			Kies	$\begin{bmatrix} 2 \\ 6 \end{bmatrix} = \mathbf{O} = HK$ unten
11,20	3,1	100	ries	
8,00	45,2	96,9	70.6	
5,60	22,3	51,7	70,0	
2,00	1,7	29,4		
1,00	1,4	27,7	Sand	
0,71	5,7	26,3		
0,125	5,1	20,7	16,6	
0,063	2,9	15,6		.063 .125 .125 .5,6 .5,6 .5,6 .11,25
<0,063	12,7	12,7	Füller	
			12,7	
Asphaltmischgut			it	Bindemitteleigenschaften
	1.4	/ 2	0 1 5 1	

Kontrollprüfung SMA 8 S 25/55-55A_3% Amidwachs

AsphaltmischgutRohdichteg/cm³2,451Raumdichteg/cm³2,414Hohlraum-Vol.-%1,5gehalt

Bindemitteleigenschaften				
Ring u. Kugel	С°	84,0		
Nadelpenetration	0,1mm	26,0		

Abb. A 7: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 25/55-55A _3% Amidwachs

Kontrollprüfung SMA 8 S 50/70

Kornzusammensetzung des Ge-						
steinskörnungsgemisches						
mm	Rück	-	Durch-	Masso%		
	stand	t	gang	101833670		
16,00				Kies		
11,20	8,0		100	Ries		
8,00	36,6		92,0	70.2		
5,60	25,6		55,4	70,2		
2,00	6,4		29,8			
1,00	2,4		23,4	Sand		
0,71	5,1		20,9			
0,125	3,2		15,8	19,1		
0,063	1,9		12,6			
<0,063	10,7		10,7	Füller		
				10,7		
Asphaltmischgut						
Rohdie	chte		g/cm ³	2,428		
Raumd	ichte		g/cm ³	2,390		
Hohlra	um-		Vol%	1,5		

gehalt



Bindemitteleigenschaften						
Ring u. Kugel	С°	63,2				
Nadelpenetration	0,1mm	29,0				

Abb. A 8: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Referenzvariante SMA 8S 50/70

Kornz ste	usamm inskörn	ensetzung ungsgemi	∣des Ge- sches	100 90
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%	Sasobit 80 HK oben
16,00			Kies	$\begin{bmatrix} 2 \\ - \end{bmatrix} = \mathbf{H} \mathbf{K}$ unten
11,20	8,2	100	Ries	
8,00	38,5	91,8	72.5	
5,60	25,8	53,3	72,5	
2,00	5,3	27,5		
1,00	2,0	22,3	Sand	
0,71	4,5	20,2		
0,125	3,2	15,7	16,8	
0,063	1,7	12,5		,063 ,125 5,6 11,25
<0,063	10,8	10,8	Füller 10,8	Siebnennöffnungsweite [mm]
	Aspha	altmischgu	ıt	Bindemitteleigenschaften
Rohdichte g/cm ³ 2,441		2,441	Ring u. Kugel °C 79,2	
Raumdichte g/cm ³ 2,406		2,406	Nadelpenetration 0,1mm 23	

Kontrollprüfung SMA 8 S 50/70_3% Sasobit

gehalt Abb. A 9: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 50/70_3% Sasobit

1,4

Kontrollprüfung SMA 8 S 50/70 3% Romonta

Vol.-%

Hohlraum-

				_				
Kornz ste	usamr	nensetzung nungsgem	g des Ge- isches		100 T		•	5 50
mm	Rück stanc	- Durch- gang	Masse%	[%]	90 - ₹80 -	- (Romont HK ober	ta n
16,00			King	2	<u> </u>	- (🕒 🗕 HK unte	en
11,20	4,7	100	- Kies					
8,00	37,9	95,3	71.2					
5,60	28,8	57,5	71,3		540			
2,00	5,3	28,7			230 +			-F
1,00	2,1	23,4	Sand	Ū	520	_		
0,71	4,6	21,3			10		-	
0,125	3,3	16,7	16,8		0 +	+		+
0,063	1,6	13,4			063	125	12.0	
<0,063	11,8	11,8	Füller 11,8		ó	Ó	Siebnennö	öffn
	Asph	altmischg	ut] [Bir	ndemittel	eig
Rohdie	chte	g/cm ³	2,428	1	Ri	ng u.	Kugel	
Raumd	ichte	g/cm ³	2,388] [Nad	elpei	netration	(
Hohlra geha	ium- alt	Vol%	1,7					



Bindemitteleigenschaften						
Ring u. Kugel	°C	62,7				
Nadelpenetration 0,1mm 26						

Abb. A 10: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 50/70_3% Romonta

Korn ste	zusamm einskörn	ensetzung ungsgemi	g des Ge- isches	100 90 SMA 8 S 50/70_3%
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%	$\begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ 80 \\ \hline \\ 70 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ - \\ \text{HK oben} \\ \hline \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \hline \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \\ \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Amidwachs} \\ \end{array} \\ $
16,00			Kies	$\begin{bmatrix} 2 \\ 6 \end{bmatrix} - \bullet - HK$ unten
11,20	2,8	100	Ries	
8,00	37,1	97,2	70.2	
5,60	30,4	60,1	70,2	
2,00	5,8	29,8		
1,00	2,3	24,0	Sand	
0,71	4,6	21,6		
0,125	3,3	17,0	17,8	
0,063	1,7	13,7		063 125 5,6 11,2 11,2 11,2
<0,063	12,0	12,0	Füller	Siehnennöffnungsweite [mm]
			12,0	
	Aspha	Itmischgu	ıt	Bindemitteleigenschaften

Kontrollprüfung SMA 8 S 50/70_3% Amidwachs

Asphaltmischgut						
Rohdichte	g/cm³	2,400				
Raumdichte	g/cm³	2,381				
Hohlraum-	Vol%	0,8				
gehalt						

Bindemitteleigenschaften						
Ring u. Kugel °C 78,2						
Nadelpenetration	0,1mm	28				

Abb. A 11: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphaltdeckschicht SMA 8S 50/70_3% Amidwachs

Kontrollprüfung AC 16 B S (25/55-55A)

Kornzusammensetzung des Ge-							
steinskörnungsgemisches							
mm	Rück-	Durch-	Masse%				
	stand	gang	101233070				
16,00	9,5	100	Kies				
11,20	20,9	90,5	Ries				
8,00	15,8	69,5	72.0				
5,60	26,7	53,8	12,9				
2,00	5,4	27,1					
1,00	2,7	21,7	Sand				
0,71	5,5	19,0					
0,125	2,6	13,5	17,3				
0,063	1,1	10,9					
<0,063	9,8	9,8	Füller				
			9,8				

Asphaltmischgut					
Rohdichte	g/cm³	2,558			
Raumdichte	g/cm³	2,351			
Hohlraum-	Vol%	8,1			
gehalt					



Bindemitteleigenschaften							
Ring u. Kugel	С°	65,2					
Nadelpenetration	0,1mm	28,0					

Abb. A 12: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Referenzvariante AC 16 BS 25/55-55A

Kornzusammensetzung des Ge-								
steinskörnungsgemisches								
~~~	Rück		Durch-	Massa%	<u>مر</u>			
	stan	d	gang	IVIA330	·/0			
16,00	9	,3	100	King				
11,20	25	,1	90,7	Kies	ang ang			
8,00	14	,6	65,6	74 0				
5,60	25	,8	50,9	77,0	, nb			
2,00	4	,6	25,1		Sieb			
1,00	2	,3	20,5	Sano	t   t			
0,71	4	,7	18,2					
0,125	2	,5	13,5	15,3	3			
0,063	1	,2	11,0					
<0,063	9	,8	9,8	Fülle	r			
9,8								
	Asp	hal	tmischg	ut				
Rohdichte g/cm ³ 2,564								

g/cm³

Vol.-%

Raumdichte

Hohlraum-

gehalt



Bindemitteleigenschaften						
Ring u. Kugel	°C	83,4				
Nadelpenetration	0,1mm	27,0				

#### Abb. A 13: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphalbinderschicht AC 16 BS 25/55-55A_3% Sasobit

#### Kontrollprüfung AC 16 B S (25/55-55A)_3%Romonta

2,386

7,0

Kornzusammensetzung des Ge- steinskörnungsgemisches						
	Rück-	Durch-	Magaa0/			
	stand	gang	IVIdSSE 70			
16,00	3,8	100	King			
11,20	34,2	96,2	ries			
8,00	10	62,0	75.6			
5,60	27,6	52	73,0			
2,00	3,3	24,4				
1,00	1,5	21,1	Sand			
0,71	4,1	22,6				
0,125	2,9	17,6	13,5			
0,063	1,7	14,7				
<0,063	10,9	13	Füller			
			10,9			

100 [%M] But 60		• • • •	<ul> <li>AC 16 E</li> <li>Romon</li> <li>HK obe</li> <li>HK unto</li> </ul>	3S 25/55 ta n en	-55A_:	3%		<b>•</b> •••••••••••••••••••••••••••••••••••
Siebdurchga 00 05 00				بيوييه ا		<i>,</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,		
0	<b>\$</b> :	-		+ +	-+			-+-+
	0,063	0,125	Siebi	1 1 nennöfl	∾ fnung:	ہ م م sweite	11,2 o 11,2 o 16,0	22,4 22,4 31,5

Aspl	B	i		
Rohdichte	g/cm ³	2,543	Ring	u
Raumdichte	g/cm ³	2,363	Nadelp	e
Hohlraum-	Vol%	7,1		
genalt				

Bindemitteleigenschaften						
Ring u. Kugel	°C	66,4				
Nadelpenetration	0,1mm	26,0				

Abb. A 14: Sieblinie, Mischgut- und Bindemitteleigenschaften der Asphalbinderschicht AC 16 BS 25/55-55A_3% Romonta

#### Kontrollprüfung AC 16 B S (25/55-55A)_3% Sasobit

g/cm³

Vol.-%

Raumdichte

Hohlraum-

Kornz ste	usamme inskörn	ensetzung ungsgemi	l des Ge- sches	100 90 AC 16 BS 25/55-55A_3%
mm	Rück- stand	Durch- gang	Masse%	$\begin{array}{c c} & & & \\ \hline \\ \hline$
16,00	3,8	100	Kies	$\begin{bmatrix} \geq 70 \\ c_0 \end{bmatrix} = \bullet = HK unten$
11,20	34,2	96,2	Kies	
8,00	14,2	62,0	74.0	
5,60	22,7	47,8	74,9	
2,00	4,0	25,1		
1,00	1,9	21,1	Sand	
0,71	4,1	19,3		
0,125	3,7	15,2	14,6	
0,063	1,0	11,4		063 125 5,66 11,25 11,25 22,46
<0,063	10,5	10,5	Füller	
			10,5	Siebrienhofflungsweite [mm]
	Aspha	Itmischgu	ıt	Bindemitteleigenschaften
Rohdie	chte	g/cm ³	2,555	Ring u. Kugel °C 81,4

#### Kontrollprüfung AC 16 B S (25/55-55A)_3%Amidwachs

Nadelpenetration

2,388

6,5

26,0

0,1mm



Anlage 2: Übersicht der Versuchsergebnisse für jede Materialkombination (zu Abschnitt 4.1.1)

Abb. A 16: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Referenzvariante S MA 8 S (25/55-55A) und AC 16 BS (25/55-55A)



Abb. A 17: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit



Abb. A 18: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A)



Abb. A 19: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit



Abb. A 20: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs



Abb. A 21: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A)



Abb. A 22: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs



Abb. A 23: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta



Abb. A 24: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A)



Abb. A 25: Schersteifigkeiten und Mittelwert S MA 8 S (25/55-55A) und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta



### Anlage 3: Ergebnisse der Schersteifigkeiten für die Laborvarianten (zu Abschnitt 4.1.2)





Abb. A 27: Schersteifigkeiten und Mittelwert der im Labor hergestellten Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A)





Abb. A 28: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C60BP4-S/ 200g/m²



Abb. A 29: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C60BP4-S/ 300g/m²



Abb. A 30: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C60BP4-S/ 400g/m²



Abb. A 31: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C40B5-S 200g/m²



Abb. A 32: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C40B5-S 300g/m²



Abb. A 33: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C40B5-S 400g/m²



Abb. A 34: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta und Emulsion C60BP4-S/ 200g/m²







Abb. A 36: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta und Emulsion C60BP4-S/ 400g/m²



Abb. A 37: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta und Emulsion C40B5-S 200g/m²



Abb. A 38: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta und Emulsion C40B5-S 300g/m²



Abb. A 39: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta und Emulsion C40B5-S 400g/m²



Abb. A 40: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C60BP4-S/ 200g/m²



Abb. A 41: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C60BP4-S/ 300g/m²



Abb. A 42: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C60BP4-S/ 400g/m²



Abb. A 43: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C40B5-S 200g/m²



Abb. A 44: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C40B5-S 300g/m²



Abb. A 45: Schersteifigkeiten und Mittelwert der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C40B5-S 400g/m²

### Anlage 5: Ergebnisse der statischen Abscherversuche nach LEUTNER (zu Abschnitt 4.1.3)

Tab.1 Ergebnisse der statischen Schersteifigkeitversuche nach LEUTNER für ADS und ABS mit Sasobit

	Durchmesser	Scherweg	Scherkraft	Soll
Kennzeichnung	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]
		- Dec	icht	
PK 3-1	149,8	4,21	37,09	
PK 3-2	150,1	4,36	36,43	15
Mittelv	wert	4,29	36,76	
PK 12-1	149,9	3,93	36,06	
PK 12-2	149,8	4,51	35,29	15
Mittelv	wert	4,22	35,68	
PK 13-1	150,2	4,47	37,64	
PK 13-2	149,7	3,95	33,59	15
Mittelwert		4,21	35,62	
PK 14-1	149,8	4,66	33,32	
PK 14-2	150,1	6,17	35,49	15
Mittelwert		5,42	34,41	
PK 15-1	150,2	4,82	35,44	
PK 15-1	149,9	5,40	32,39	15
Mittelv	wert	5,11	33,92	
PK 16-1	149,6	4,65	35,26	
PK 16-2	149,9	4,03	38,50	15
Mittelv	wert	4,34	36,88	

	Durchmesser	Scherweg	Scherkraft	Soll
Kennzeichnung	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]
		- De	ckschicht / Bindersch	icht
BK 9/1	149,8	4,08	39,77	
BK 9/2	150,1	4,32	41,64	15
Mittelv	vert	4,20	40,71	
BK 17/1	149,9	4,15	40,76	
BK 17/2	149,8	4,64	42,89	15
Mittelv	vert	4,40	41,83	
BK 18/1	150,2	4,16	36,63	
BK 18/2	149,7	3,74	39,16	15
Mittelwert		3,95	37,90	
BK 19/1	149,8	4,53	36,74	
BK 19/2	150,1	4,68	39,31	15
Mittelwert		4,61	38,03	
BK 20/1	150,2	5,21	36,33	
BK 20/2	149,9	4,59	34,51	15
Mittelv	vert	4,90	35,42	
BK 21/1	149,6	4,01	30,48	
BK 21/2	149,9	3,68	34,12	15
Mittelv	vert	3,85	32,30	

## Tab. 2 Ergebnisse der statischen Schersteifigkeitsversuche nach LEUTNER für ADS und ABS mit Romonta

	Durchmesser	Scherweg	Scherkraft	Soll
Kennzeichnung	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]
		Dee	icht	
BK 6/1	149,8	4,48	44,16	
BK 6/2	150,1	4,06	41,59	15
Mittelv	vert	4,27	42,88	
BK 22/1	149,9	3,39	31,27	
BK 22/2	149,8	4,01	35,72	15
Mittelv	vert	3,70	33,50	
BK 23/1	150,2	3,92	39,59	
BK 23/2	149,7	3,72	36,84	15
Mittelwert		3,82	38,22	
BK 24/1	149,8	3,92	39,59	
BK 24/2	150,1	3,72	36,84	15
Mittelwert		3,82	38,22	
BK 25/1	150,2	4,01	38,96	
BK 25/2	149,9	3,47	35,60	15
Mittelv	vert	3,74	37,28	
BK 26/1	149,6	3,40	37,53	
BK 26/2	149,9	3,19	35,84	15
Mittelv	vert	3,30	36,69	

## Tab. 3 Ergebnisse der statischen Schersteifigkeitsversuche nach LEUTNER für ADS und ABS mit Amidwachs



Anlage 6: Ergebnisse der Schersteifigkeitsuntersuchungen bei Verwendung unterschiedlicher Bindemittel (zu Abschnitt 4.1.4)

Abb. A 46: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C60BP4-S 200g/m²



Abb. A 47: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (50/70) mit Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) mit Sasobit und Emulsion C60BP4-S 200g/m²



Abb. A 48: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta und Emulsion C60BP4-S 200g/m²



Abb. A 49: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (50/70) mit Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) mit Romonta und Emulsion C60BP4-S  $200g/m^2$ 



Abb. A 50: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C60BP4-S 200g/m²



Abb. A 51: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (50/70) mit Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) mit Amidwachs und Emulsion C60BP4-S  $200g/m^2$ 

# Anlage 7: Ergebnisse der Schersteifigkeitsuntersuchungen bei 2 M.-% und 3 M.-% Zusatz sowie 0°C, 10°C und 30°C der Asphaltbindeschichtunterlage (zu Abschnitt 4.1.5)



Abb. A 52: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) bei 0  $^{\circ}\mathrm{C}$ 



Abb. A 53: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) bei 10  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 54: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) bei 30  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 55: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) bei 0  $^{\circ}C$ 



Abb. A 56: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) bei 10  $^\circ C$ 



Abb. A 57: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) bei 30  $^{\circ}C$ 



Abb. A 58: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) bei 0  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 59: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) bei 10  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 60: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 2% Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) bei 30  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 61: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) bei 0  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 62: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) bei 10  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 63: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Sasobit und AC 16 BS (25/55-55A) bei 30  $^{\circ}C$ 



Abb. A 64: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) bei 0  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 65: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) bei 10  $^{\circ}C$


Abb. A 66: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Romonta und AC 16 BS (25/55-55A) bei 30  $^\circ C$ 



Abb. A 67: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) bei 0  $^\circ C$ 



Abb. A 68: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) bei 10  $^{\circ}\text{C}$ 



Abb. A 69: Schersteifigkeiten der Variante S MA 8 S (25/55-55A) mit 3% Amidwachs und AC 16 BS (25/55-55A) bei 30  $^{\circ}\text{C}$ 

## Anlage 8: Steifigkeitsverläufe der Hauptversuchsphase für die Ermüdungskurven der dritten Stufe (zu Abschnitt 4.2.3)



Abb. A 70: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 25 %



Abb. A 72: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 50 %



Abb. A 74: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 75 %



Abb. A 71: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 37,5 %



Abb. A 73: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 62,5 %



Abb. A 75: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 25 %



Abb. A 76: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 37,5 %



Abb. A 78: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 62,5 %



Abb. A 80: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 25 %



Abb. A 77: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 50 %



Abb. A 79: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 75 %



Abb. A 81: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 37,5 %



Abb. A 82: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 50 %



Abb. A 84: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 25 %



Abb. A 86: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 50 %



Abb. A 83: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 62,5 %







Abb. A 87: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 62,5 %



Abb. A 88: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Referenz bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 75 %



Abb. A 90: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 37,5 %



Abb. A 92: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 62,5 %



Abb. A 89: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 25 %



Abb. A 91: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Romonta bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 50 %



Abb. A 93: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 25 %



Abb. A 94: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 37,5 %



Abb. A 96: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 62,5 %



Abb. A 95: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 50 %



Abb. A 97: Steifigkeitsverläufe der Einzelversuche der Variante Sasobit bei 0,45 MPa Normalkraft und der Amplitudenstufe 75 %