



---

**ENTWICKLUNG VON GUMMIMODIFIZIERTEN  
BINDEMITTELN UND DEREN EINSATZ IN  
ASPHALTSTRASSENBEFESTIGUNGEN  
IM FREISTAAT SACHSEN**

---

**Impressum:**

Auftraggeber:

Freistaat Sachsen

Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr

Abteilung Verkehr

Herausgeber:

LISt Gesellschaft für Verkehrswesen und ingenieurtechnische Dienstleistungen mbH Rochlitz  
ein Unternehmen des Freistaates Sachsen

Autoren:

Dr.-Ing. Tobias Lerch

(LISt GmbH)

Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner

Dipl.-Ing. Juliane Kraft

(TU Dresden – Professur für Straßenbau)

Erschienen:

Rochlitz, Stand 04/2018

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>7</b>
1.1	Motivation und Zielstellung	7
1.2	Forschungsmethodisches Vorgehen	7
<b>2</b>	<b>BEHANDLUNG DER THEMATIK IN DER LITERATUR</b>	<b>9</b>
2.1	Baustoffgemisch Asphalt	9
2.1.1	Auf eine Asphaltbefestigung einwirkende Belastung und daraus resultierende Beanspruchung	9
2.1.2	Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen	9
<b>3</b>	<b>BITUMENUNTERSUCHUNGEN</b>	<b>11</b>
3.1	Untersuchungsmethodik	11
3.1.1	Experimentelles Vorgehen	11
3.1.2	Untersuchte Bindemittelvarianten	11
3.2	Voruntersuchungen	11
3.2.1	Bestimmung der optimalen Mischzeit	11
3.2.2	Einfluss von Additiven	13
3.3	Einfluss von Gummimenge und Partikelgröße auf die Bitumeneigenschaften	15
3.3.1	Konventionelle Bindemittelprüfungen	15
3.3.2	Performanceorientierte Bindemittelprüfungen	16
3.4	Auswahl der Gummi-Bitumen-Varianten für die Asphaltuntersuchungen	21
<b>4</b>	<b>ASPHALTUNTERSUCHUNGEN</b>	<b>23</b>
4.1	Untersuchungsmethodik	23
4.1.1	Experimentelles Vorgehen	23
4.1.2	Untersuchte Asphaltgemische	23
4.1.3	Herstellung der Probekörper	25
4.1.4	Laborversuche	25
4.2	Gebrauchsverhaltensorientierte Asphaltmischgutkonzeption	30
4.2.1	Konzept	30
4.2.2	Auswertung	30
4.3	Ergebnisse der Laborversuche	32
4.3.1	Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen	32
4.3.2	Ermüdungsfunktionen	33
4.3.3	Kryogene Zugspannungen	34
<b>5</b>	<b>DIMENSIONIERUNGSBERECHNUNGEN</b>	<b>36</b>
5.1	Allgemeines	36
5.2	Annahmen für die Dimensionierungsberechnungen	36
5.3	Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen	38
5.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	40

<b>6</b>	<b>FAZIT</b>	<b>42</b>
6.1	Empfehlungen für den Einsatz von gummimodifizierten Bindemitteln und deren Einsatz in Asphaltbefestigungen	42
6.2	Ausblick	43
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>44</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>46</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>47</b>
	<b>ANLAGENVERZEICHNIS</b>	<b>50</b>

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abb.	Abbildung
Abs.	Abschnitt
ABS	Asphaltbinderschicht
AC	Asphaltbeton
ADS	Asphaltdeckschicht
AG	Auftraggeber
AL Sp-Asphalt	Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalt mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung
ATS	Asphalttragschicht
AÜ	Achsübergänge
BM	Bindemittel
B-Zahl	dimensionierungsrelevante Beanspruchung äquivalenter 10t-Achsübergänge
DSR	Dynamisches Scherrheometer
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke – Kfz-Verkehr
DTV <sup>(SV)</sup>	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke – Schwerverkehr
E GmBA	Empfehlungen zu gummimodifizierten Bitumen und Asphalten
EKL	Entwurfsklassen nach den RAL
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FSS	Frostschutzschicht
GmA	Gummimodifizierter Asphalt
GmB	Gummimodifiziertes Bitumen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MPK	Marshall-Probekörper
MSCRT	Multiple Stress Creep and Recovery Test
NWP	Nachweispunkt
OPA	Offenporiger Asphalt
PmB	polymermodifizierten Bindemittel
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Splitt Mastix Asphalt
Tab.	Tabelle
TP Asphalt-StB Teil 24	Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 24: Spaltzug-

	Schwellversuch - Beständigkeit gegen Ermüdung
TP Asphalt-StB Teil 26A	Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 26A: Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit
RDO Asphalt	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht
RSO Asphalt	Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
SZSV	Spaltzug-Schwellversuch

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Motivation und Zielstellung

Der Erhalt und die Anpassung unserer Verkehrswege in Form von Straßen ist ein wichtiger Bestandteil einer modernen Infrastruktur, welche die Grundlage für eine leistungsfähige Gesellschaft bildet. Die rohstoffintensiven Asphaltbefestigungen gehören dabei zu den am weitesten verbreiteten Bauweisen. Somit kommt der Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Asphaltbauweise bei gleichzeitiger Verbesserung der Ressourceneffizienz besondere Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund sind alternative Wege für einen ökologischen und ressourcenschonenden sowie ökonomischen Bau von Straßenverkehrsbefestigungen mit langen Nutzungsdauern zu entwickeln. Dies hat zudem positive Auswirkungen auf die ökonomisch sekundären Folgen in Form von geringerem Instandhaltungsaufwand bzw. geringerer Nutzungsunterbrechung der Infrastruktur durch Erhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahmen.

Vor diesem Hintergrund gibt es sowohl national als auch international Bestrebungen dem Asphalt Gummigranulat, hergestellt aus Altreifen, zuzusetzen, um so die Gebrauchseigenschaften zu verbessern und längere Nutzungsdauern der Asphaltbefestigungen zu ermöglichen. Gleichzeitig kann ein Downgrading der in den Altreifen gebundenen Rohstoffe wie Mineralöle und Naturkautschuk vermieden werden. Die nicht erneuerbaren Ressourcen werden im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) hochwertig wiederverwendet und nicht der untergeordneten energetischen Verwertung zugeführt. Trotz der positiven wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen bei der Verwendung von gummimodifizierten Asphaltgemischen (GmA), hat dieser Baustoff bisher nur Anwendung in einzelnen Pilotprojekten in Deutschland gefunden und lässt sich mit den bisherigen Erfahrungen nicht ohne weiteres in eine reguläre Anwendung überführen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung und Optimierung gummimodifizierter bituminöser Bindemittel für die Verwendung in Asphaltstraßenbefestigungen als dauerhafte und nachhaltige Bauweise im Freistaat Sachsen sowie die Entwicklung von geeigneten Mischgutkonzeptionen für GmA. Zudem sollen Einsatzmöglichkeiten von GmA aufgezeigt und Empfehlungen zur Verwendung von GmA in Straßenbefestigungen des Freistaates Sachsen erarbeitet werden.

## 1.2 Forschungsmethodisches Vorgehen

Das Vorgehen gliedert sich in 3 Hauptteile. Im ersten Teil erfolgt ein ausführliches Literatur- und Quellenstudium zum Entwicklungsstand gummimodifizierter Asphaltgemische unter Berücksichtigung von Forschungsaktivitäten und Erfahrungen auf nationaler und internationaler Ebene. Außerdem werden in Form einer Zusammenfassung und

Systematisierung die Erfahrungen und die Zustandsentwicklungen sowohl an den Untersuchungsstrecken in Sachsen als auch an den sonstigen Strecken im Freistaat recherchiert.

Vor dem gewonnenen Erfahrungshintergrund und den Rechercheergebnissen erfolgen im zweiten Hauptteil umfangreiche Bitumenuntersuchungen mit dem Ziel, gummimodifizierte Bitumen zu definieren, die in die weiteren Asphaltuntersuchungen einbezogen werden. Neben konventionellen Bitumenuntersuchungen werden auch performanceorientierte Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) an den Bitumen durchgeführt. Grundbitumen für die Modifizierung ist das in Deutschland vorrangig verwendete Straßenbaubitumen 50/70. Hinsichtlich der Gummimodifizierung wird sowohl der Einfluss der Größe als auch der Zugabemenge der Gummipartikel untersucht. Dafür werden Gummi-Bitumen-Gemische mit Zugabemengen von 10, 15 und 20 % mit jeweils drei Partikelgrößen (klein (0 – 0,4 mm), mittel (0 – 0,6 mm), groß (0 – 1,0 mm)) hergestellt. Als Referenzvariante wird zusätzlich ein polymermodifiziertes Bitumen (PmB 25/55-55) in die Untersuchungen einbezogen, um zu prüfen, ob sich durch die Gummimodifizierung ähnliche Eigenschaftsverbesserung gegenüber unmodifizierten Straßenbaubitumen einstellen.

Der dritte Teil beschreibt die zu untersuchenden Asphaltvarianten, die Bestimmung des Ermüdungs- und Steifigkeitsverhaltens mit dem Spaltzug-Schwellversuch sowie die Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung einer fiktiven Asphaltbefestigung mit festgelegten Randbedingungen. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und Einsatzmöglichkeiten von GmA in Straßenbefestigungen des Freistaates Sachsen aufgezeigt.



Abb. 1-1 Projektstruktur

## 2 BEHANDLUNG DER THEMATIK IN DER LITERATUR

### 2.1 Baustoffgemisch Asphalt

#### 2.1.1 Auf eine Asphaltbefestigung einwirkende Belastung und daraus resultierende Beanspruchung

Eine Asphaltbefestigung besteht aus unterschiedlichen Schichten, die verschiedenen Beanspruchungen standhalten müssen. Die Deckschicht ist den Einflüssen aus Wetter und Verkehr direkt ausgesetzt. Zudem soll die Oberfläche einer Verkehrsbefestigung eine gute Griffigkeit haben, eben sein und keine bzw. nur begrenzt Spurrinnen während der Nutzungsdauer entwickeln. Die Binderschicht ist verantwortlich für die Lastverteilung und darüber hinaus einer hohen Schubbeanspruchung ausgesetzt. Auch die Tragschicht trägt zur Lastverteilung bei und schützt die darunter liegenden Schichten vor zu hohen Spannungen und daraus folgenden Schäden. Außerdem treten die größten verkehrslast- und temperaturbedingten (horizontalen) Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht auf unter der Voraussetzung der Schichtenverbund in der Befestigung ist unbeschädigt. Folglich liegt der Nachweispunkt für das Ermüdungsversagen gemäß den [ RDO Asphalt 09] an der Unterseite der Tragschicht in der Lasteinleitungsachse. Nach der Hypothese von Minor werden die hervorgerufenen Teilschädigungen durch unterschiedliche Achslasten und Temperaturzustände zur Gesamtschädigung akkumuliert. Letztlich kommt es zur Ermüdungsrissbildung, wenn die vorhandenen Lastwechsel die Anzahl der ertragbaren Lastwechselzahl erreicht. Dies entspricht einem Ermüdungsstatus von 100 % und definiert das rechnerische Ende der Nutzungsdauer der Asphaltbefestigung. Bei der Auswahl eines Bindemittels für ein Asphaltgemisch sind die zu erwartenden Beanspruchungen zu berücksichtigen. Es sei darauf verwiesen, dass das Materialverhalten eines Asphaltgemisches nicht ausschließlich von den Eigenschaften des Bindemittels abhängt. So haben unter anderen auch die Sieblinie oder das Adhäsionsverhalten einen Einfluss.

#### 2.1.2 Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen

Für die Asphaltbauweise ist mit den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht [ RDO Asphalt 09] in Deutschland ein Regelwerk geschaffen worden, welches den Grundstein für eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Dimensionierung von Asphaltstraßenkonstruktionen legt. Diese Verfahrensweise ermöglicht es erstmalig, die Dicken der einzelnen Konstruktionsschichten des Straßenoberbaus in Abhängigkeit von den unterschiedlichen mechanischen Kenngrößen der eingesetzten Asphaltgemische, der Verkehrsbelastung und den klimatischen Einflüssen zu dimensionieren. Die für den Dimensionierungsprozess relevanten Materialeigenschaften sind die temperaturabhängigen Steifigkeitsmoduln sowie die dehnungsabhängigen Ermüdungslastwechselzahlen.

Knapper werdende natürliche Ressourcen und neue Vertragsformen erhöhen auch im Straßenbau den Druck innovativen Baumaterialien und Bauweisen zu entwickeln. Solche Innovationen lassen sich mit der Empirie der [ RStO 12] allerdings nicht realisieren [DRAGON 2015]. Mit der Einführung der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht [ RDO Asphalt 09] wurde erstmals eine rechnerische Dimensionierung unter Berücksichtigung individueller Materialkennwerte möglich. So ist es mit Hilfe des in den [ RDO Asphalt 09] beschriebenen Verfahrens möglich die Dicken der Befestigungsschichten des gebundenen Oberbaus in Abhängigkeit von mechanischen Kenngrößen der verwendeten Asphaltgemische, der zu erwartenden Verkehrsbelastung sowie klimatischer Einflüsse zu berechnen.

Die für den Dimensionierungsprozess relevanten Asphalteeigenschaften sind die temperaturabhängigen Steifigkeitsmoduln, beschrieben durch die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion sowie die dehnungsabhängigen Ermüdungslastwechselzahlen, dargestellt durch die Ermüdungsfunktion.

Beide Materialeigenschaften werden gemäß des in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Prüfverfahrens mit dem Spaltzug-Schwellversuch ermittelt. Gummimodifizierung im Asphaltstraßenbau

## 3 BITUMENUNTERSUCHUNGEN

### 3.1 Untersuchungsmethodik

#### 3.1.1 Experimentelles Vorgehen

Das Ziel der Bitumenuntersuchungen ist es, geeignete Bindemittel für die Asphaltuntersuchungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gummipartikelgrößen und Zugabemengen zu bestimmen. Dafür ist es zunächst erforderlich die optimalen Einmischbedingungen in Vorversuchen festzulegen. Im Anschluss daran erfolgt die Auswertung der konventionellen und performanceorientierten Bindemittelprüfungen. Dafür wurden neben den gemeinhin bekannten Bitumenkennwerten, wie z.B. der Erweichungspunkt Ring und Kugel oder der Nadelpenetrationswert, auch Ergebnisse mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) ermittelt. Untersuchungen mit dem DSR ermöglichen es u.a. das plastische Verformungsverhalten oder die Beständigkeit gegen Ermüdung der Bindemittelvarianten gebrauchsvorhaltensorientiert prüftechnisch anzusprechen. Letztlich werden die Auswahl der Bitumenvarianten für die Asphaltuntersuchung sowie der entsprechende Bewertungshintergrund diskutiert.

#### 3.1.2 Untersuchte Bindemittelvarianten

Das Referenz- und gleichzeitig Grundbitumen für die Modifizierung war das in Deutschland vorrangig verwendete Straßenbaubitumen 50/70. Hinsichtlich der Gummimodifizierung wurden sowohl der Einfluss der Größe als auch der Zugabemenge der Gummipartikel untersucht. Dafür wurden Gummi-Bitumen-Gemische mit Zugabemengen von 10, 15 und 20 % mit jeweils drei Partikelgrößen (klein (0 – 0,4 mm), mittel (0 – 0,6 mm), groß (0 – 1,0 mm)) geprüft. Die verwendeten Gummiprodukte wurden ausschließlich aus LKW-Reifen durch kryogene Vermahlung gewonnen. Die Herstellung der Gummi-Bitumen-Gemische erfolgte im Straßenbaulabor der TU Dresden gemäß den Vorgaben der [E GmBA] bei 180 °C und einer Rührgeschwindigkeit von 200 U/min<sup>-1</sup>. Die optimalen Mischzeiten in Abhängigkeit der Partikelgröße wurden in Voruntersuchungen ermittelt (vgl. 3.2.1). Als Referenzvariante wurde zusätzlich ein polymermodifiziertes Bitumen (PmB 25/55-55) in die Untersuchungen einbezogen, um zu prüfen, ob sich durch die Gummimodifizierung ähnliche Eigenschaftsverbesserung gegenüber unmodifizierten Straßenbaubitumen einstellen. Für die anschließende Auswertung der Untersuchungen wurde eine einheitliche Beschriftung der einzelnen Varianten eingeführt. Dabei werden die Referenzvarianten mit 50/70 bzw. PmB bezeichnet und die Gummivarianten jeweils durch Sieblinie und Zugabemenge in Prozent beschrieben.

### 3.2 Voruntersuchungen

#### 3.2.1 Bestimmung der optimalen Mischzeit

Bevor die Gummi-Bitumen-Gemische für die Bitumenuntersuchungen hergestellt werden konnten, war es zunächst erforderlich die Mischbedingungen in Voruntersuchungen zube-

stimmen. Im Allgemeinen ist der Einmisch- und Reaktionsprozess von der Mischzeit, der Tempertaur, der rotationsgeschwindigkeits des Rührers sowie der Partikelgröße und den Eigenschaften des Gummis (ggf. additiviert oder im Nassverfahren vormodifiziert) abhängig, wobei die Faktoren nicht unabhängig voneiner sind ( [NEUTAG 2015], [LO PRESTI 2013]). Soweit definiert wurden für den Mischprozess die Vorgaben der [ E GmBA] mit einer Temperatur von 180 °C und einer Rührgeschwindigkeit von 200 U/min<sup>-1</sup> übernommen und es musste lediglich die optimale Mischzeit in Abhängigkeit von der Partikelgröße bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurde das Straßenbaubitumen 50/70 im Ofen auf eine Temperatur von 180 °C erhitzt, wobei eine Zeitdauer von 2 Stunden nicht überschritten wurde. Anschließend wurde die entsprechend Gummivariante mit der Mixvorrichtung, abgebildet in Abb. 3-1, eingemischt. Die Probenahme erfolgte stets in kontinuierlichen Zeitabständen während des Mischvorgangs zur Bestimmung des Nadelpenetrationswertes, des Erweichungspunktes nach Ring und Kugel sowie des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels bei 60 °C. Näheres zu den Prüfverfahren ist in Abschnitt 4 ausgeführt.



Abb. 3-1 Mixvorrichtung im Labor



Abb. 3-2 Gummi-Bitumen-Gemisch während des Mischvorgangs

Als Indikator für die optimale Mischzeit diente der maximale komplexe Schermodul, welcher jeweils auf Grundlage von nach definierten Mischzeiten entnommenen Proben bestimmt wurde. Begründen lässt sich der Anstieg des komplexen Schermoduls mit dem Reaktionsprozess des Gummis im Bitumen. Dieser wird in der Literatur wie folgt beschrieben: Zum einen werden die Gummipartikel angelöst und zum anderen vergrößern sie sich, in dem aromatische Öle des Bitumens in die Polymerketten des Gummis aufgenommen werden. Dieser Prozess führt zu einem Erweichen und Aufquellen der Gummipartikel ([CHEOVITS et al. 1982]). Im Laufe des Mischvorgangs vergrößern sich die Gummipartikel kontinuierlich und der Abstand zwischen einzelnen Partikeln im Bindemittel verringert sich, wodurch eine gelartige Struktur entsteht und die Viskosität folglich zunimmt ([HEITZMANN 1992]). Dauert der Mischprozess jedoch zu lang an, setzt die Depolymerisation des Gummis ein und der Gummi-Bitumen-Verbund wird wieder zerstört ( [LO PRESTI 2013]). Herkömmliche Bitumenkennwerte wie der Erweichungspunkt Ring und

Kugel sowie der Nadelpenetrationswert haben sich als ungeeignet für die Bestimmung der optimalen Mischzeit herausgestellt, da beide Kennwerte nur geringe Änderungen in Abhängigkeit von der Mischzeit aufzeigen und keinem Trend in Abhängigkeit von der Mischzeit folgen (vgl. Abb. 3-3). Dahingegen stellt sich über die Mischzeit ein deutliches Maximum für den komplexen Schermodul ein, wie es in Abb. 3-4 beispielhaft für die großen Partikel dargestellt ist. Alle weiteren Versuchsergebnisse können Anlage 1.1 entnommen werden. Letztlich wurden die Gummi-Bitumen-Gemische für alle weitere Untersuchungen mit den optimalen Mischzeiten – bestimmt durch das Maximum des komplexen Schermoduls – in Abhängigkeit der Partikelgröße hergestellt: klein: 50 min., mittel: 60 min und groß: 100 min.

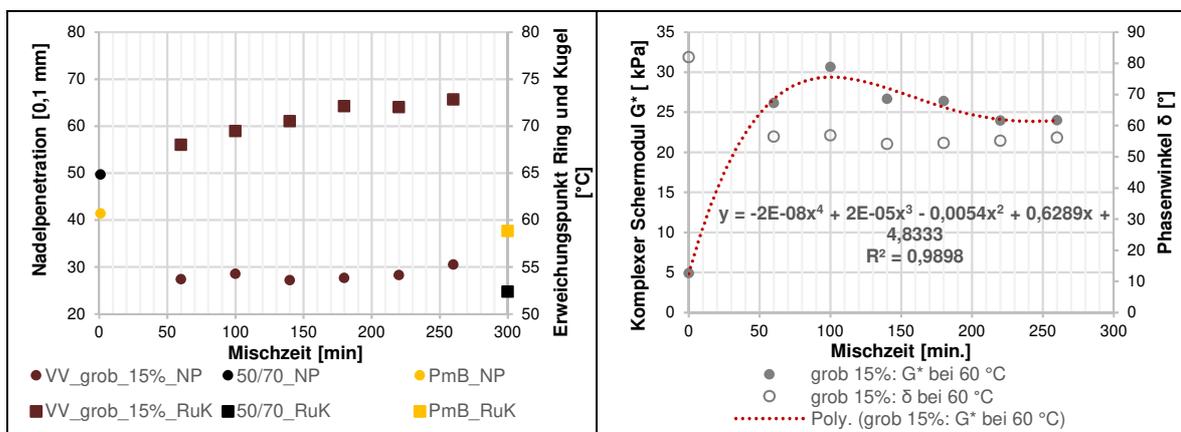


Abb. 3-3 Änderung von Nadelpenetrationswert und Erweichungspunkt Ring und Kugel in Abhängigkeit der Mischzeit

Abb. 3-4 Änderung von komplexen Schermodul und Phasenwinkel Ring und Kugel in Abhängigkeit der Mischzeit

### 3.2.2 Einfluss von Additiven

In der Praxis ist es üblich Additive während des Mischvorgang zuzugeben mit dem Ziel den Anlöse- und Reaktionsprozess zu unterstützen. In die Untersuchungen wurden Sasobit und Vestenamer einbezogen. Sasobit ist ein langkettiger Kohlenwasserstoff hergestellt mit der Fischer-Tropsch Synthese. Mit Sasobit können die Misch- und Einbautemperaturen um bis zu 30 K gesenkt werden. Denn Sasobit ist im Bitumen oberhalb von 115 °C komplett löslich und reduziert die Viskosität deutlich. Erst ab 90 °C bildet Sasobit während des Abkühlens eine versteifend wirkende Gitterstruktur im Bitumen ([Sasol]). Es wurden 3 M.-% Sasobit bezogen auf die Bitumenmasse zugegeben. Vestenamer ist ein teilkristalliner Kautschuk, der auch als Trans-Octenamer Rubber (TOR) bezeichnet wird. Vestenamer wird als Verarbeitungshilfsmittel für die Kautschukindustrie, zur Herstellung von Masterbatches, als Verträglichkeitsverbesserer in Kautschukblends sowie beim Recycling von Altgummi eingesetzt ([Evonik]). Es wurden 4,5 M.-% Vestenamer bezogen auf die Gummimasse zugegeben.

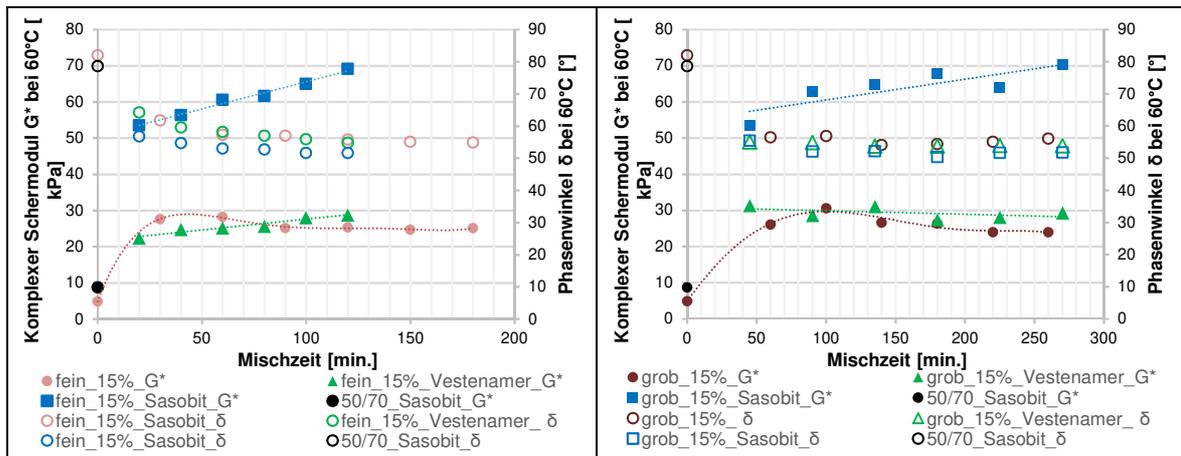


Abb. 3-5 Einfluss von Sasobit und Vestenamer auf den Gummi-Bitumen-Mischvorgang unter Verwendung der feinen Gummipartikel

Abb. 3-6 Einfluss von Sasobit und Vestenamer auf den Gummi-Bitumen-Mischvorgang unter Verwendung der groben Gummipartikel

Abb. 3-5 und Abb. 3-6 zeigen den Einfluss von Sasobit und Vestenamer auf den Gummi-Bitumen-Mischvorgang unter Verwendung der feinen (links) und groben (rechts) Gummipartikel. Zunächst fällt auf, dass der Einfluss der Additive auf den komplexen Schermodul größer sind als auf den Phasenwinkel, der sich für die additivierten Proben kaum ändert. Vestenamer hat keinen signifikanten Einfluss auf die Größe des Schermoduls, führt aber zu einem konstanteren Verlauf über die Mischzeit. Das zeitabhängige Maximum des Schermoduls kann bei den Vestenamer-additivierten Proben nicht festgestellt werden. Es ist von einer Stabilisierung des Mischprozesses auszugehen. Sasobit hingegen erhöht den Schermodul und damit die Viskosität der Bitumen signifikant. Die zuvor beschriebene versteifende Wirkung im Gebrauchstemperaturbereich tritt ein. Dies trifft allerdings nicht nur für die gummimodifizierten Bitumen zu, sondern auch für das Straßenbaubitumen 50/70. Die Referenzvariante ist jeweils bei 0 min. Mischzeit dargestellt. Bei der Referenz- und den Gummivarianten handelt es sich jeweils ca. um eine Verdopplung des komplexen Schermoduls. Auffällig ist außerdem, dass der Wert des komplexen Schermoduls mit zunehmender Mischzeit weiter ansteigt. Während Vestenamer den Nadelpenetrationswert und den Erweichungspunkt Ring und Kugel nicht beeinflusst hat, wurde bei der Zugabe von Sasobit ein deutlicher Anstieg des Erweichungspunktes von 21,5 °C und eine Absenkung des Nadelpenetrationswertes um 4 1/10mm festgestellt. Die folgenden Untersuchungen zur Bewertung des Einflusses der Größe als auch der Zugabemenge der Gummipartikel auf die Bitumeneigenschaften werden ohne Zugabe von Additiven durchgeführt, um jegliche zusätzliche Einflüsse auszuschließen. Der Einsatz von Additiven in der Praxis kann dennoch sinnvoll sein und sollte bei der Entwicklung von marktreifen Produkten abgewogen werden.

### 3.3 Einfluss von Gummimenge und Partikelgröße auf die Bitumeneigenschaften

#### 3.3.1 Konventionelle Bindemittelprüfungen

Für die Referenz- und Gummimodifizierten Bitumen wurden Nadelpenetrationswert nach [DIN EN 1426], Erweichungspunkt Ring und Kugel nach [DIN EN 1427], elastische Rückstellung nach [DIN EN 13398] und Brechpunkt nach Fraaß nach [DIN EN 12593] bestimmt. Die einzelnen Bitumenprüfverfahren sind hinreichend bekannt, daher wird auf die Prüfmodalitäten an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Die Ergebnisse sind in den Abb. 3-7 bis Abb. 3-10 dargestellt. Mit zunehmenden Gummigehalt steigt der Erweichungspunkt Ring und Kugel an während der Wert der Nadelpenetration abnimmt. Ein Zusammenhang zwischen den Prüfergebnissen und der Partikelgröße kann nicht abgeleitet werden. Im Vergleich zum Grundbitumen 50/70 und dem polymermodifizierten Bitumen steigt der Erweichungspunkt an und der Wert der Nadelpenetration sinkt ab. Dies kann als Erweiterung des Gebrauchstemperaturbereichs durch die Gummimodifizierung interpretiert werden. Während das Straßenbaubitumen 50/70 kaum elastische Eigenschaften aufzeigt, steigen die Werte der elastischen Rückstellung für die gummimodifizierten Bitumen deutlich an. Die Werte der Gummi-Bitumen mit hohen Zugabemengen und großen Partikelgrößen (15 % mittel und grob, 20 % alle Partikelgrößen) erreichen sogar die des polymermodifizierten Bitumens. Es sei darauf verwiesen, dass die Wiederholpräzision für gummimodifizierte Bitumen oftmals nicht erreicht wird. Die Bestimmung des Brechpunktes nach Fraas war für einige Varianten nicht möglich, da auf der unebenen Oberfläche der Gummibitumenproben – vor allem bei größeren Partikeln und einer hohen Zugabemenge – kein Riss durch das Prüfgerät detektiert werden konnte. Auf eine Interpretation der gewonnenen Ergebnisse wird verzichtet, da auch bei diesen Werten Unsicherheit über die Glaubhaftigkeit der Ergebnisse existiert. Dieser Versuch wird als ungeeignet für Gummimodifizierte Bitumen eingestuft.

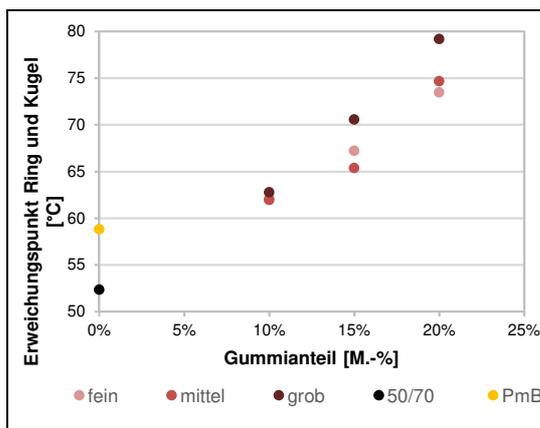


Abb. 3-7 Ergebnisse der Prüfung des Erweichungspunktes Ring und Kugel

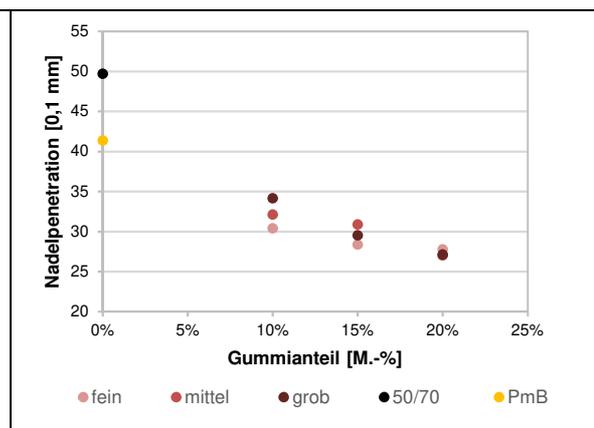


Abb. 3-8 Ergebnisse der Prüfung der Nadelpenetration

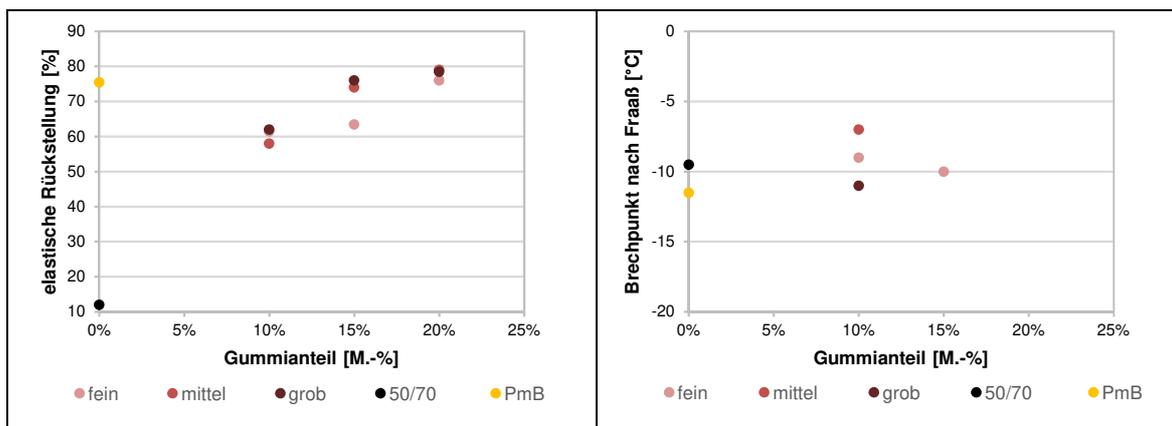


Abb. 3-9 Ergebnisse der Prüfung der elastischen Rückstellung

Abb. 3-10 Ergebnisse der Prüfung des Brechpunktes nach Fraaß

### 3.3.2 Performanceorientierte Bindemittelprüfungen

Bis heute werden bituminöse Bindemittel mit konventionellen Bitumenuntersuchungen charakterisiert und in Sorten eingeteilt. Die Eigenschaften – vor allem von modifizierten Bindemitteln – können mit diesen Untersuchungen allerdings nur unzureichend beschrieben werden, so dass es seit geraumer Zeit Bestrebungen gibt die rheologischen Eigenschaften von Bitumen zu untersuchen. Im Zuge des Strategic Highway Research Program (SHRP) wurden performanceorientierte Prüfverfahren entwickelt, die es ermöglichen, die Gebrauchseigenschaften von Bitumen mit dem DSR physikalisch eindeutig zu erfassen. Im Ergebnis erster nationaler Forschungsarbeiten, hielten im Jahre 2001 die DSR-Tests auch Einzug in das deutsche Regelwerk [HAGNER 2013]. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden ebenfalls DSR Untersuchungen durchgeführt, um gebrauchsvorhaltensorientierte Bitumeneigenschaften wie den komplexen Schermodul und den Phasenwinkel sowie die Beständigkeit gegen plastische Verformung und Ermüdung zu bestimmen.

#### 3.3.2.1 DSR T-Sweep

Für die Referenz- und Gummimodifizierten Bitumen wurden der komplexe Schermodul sowie der Phasenwinkel nach [AL DSR-Prüfung T-Sweep 14] bestimmt. Dafür wurden die Bitumenproben oszillierend mit einer vorgegeben Deformation bei einer Frequenz von 1,59 Hz und in einem Temperaturbereich von 30 und 90 °C in Intervallen von 10 K belastet. Die Deformation ist dabei so gewählt, dass die Bitumen im linear-viskoelastischen Bereich geprüft werden. Es wurde ein Platte-Platte-System mit einem Durchmesser von 25 mm sowie einem Spaltabstand von 1 mm für die Referenzbitumen und 2 mm für die gummimodifizierten Bitumen verwendet. Der komplexe Schermodul  $G^*$  beschreibt den Widerstand der untersuchten Bitumenprobe gegen die im Versuch erzwungene Verformung und ist der Quotient aus maximaler Schubspannung und maximaler Verformung. Der komplexe Schermodul  $G^*$  ist eine viskositätsbeschreibende Kenngröße. Der Phasenwinkel beschreibt die zeitliche Verschiebung zwischen der aufgetragenen Belastung und der resultierenden Belastung bzw. Verformung der Probe. Der Phasenwinkel beschreibt

das viskoelastische Verhalten der Bindemittel. Erfolgt die Reaktion unmittelbar, also rein elastisch, ist der Phasenwinkel  $0^\circ$ . Im Falle rein viskosem Verhalten beträgt der Phasenwinkel  $90^\circ$ .

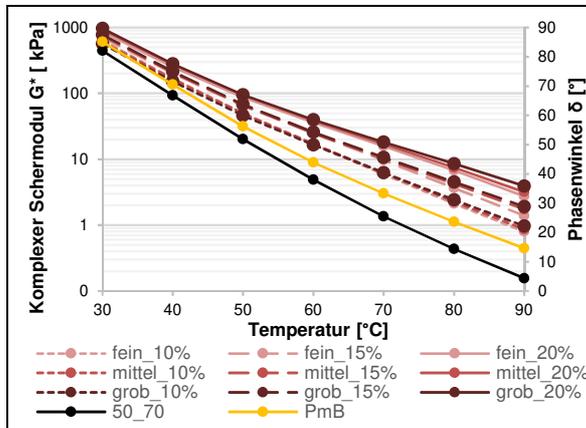


Abb. 3-11 Ergebnisse des DSR T-Sweep für den komplexen Schermodul

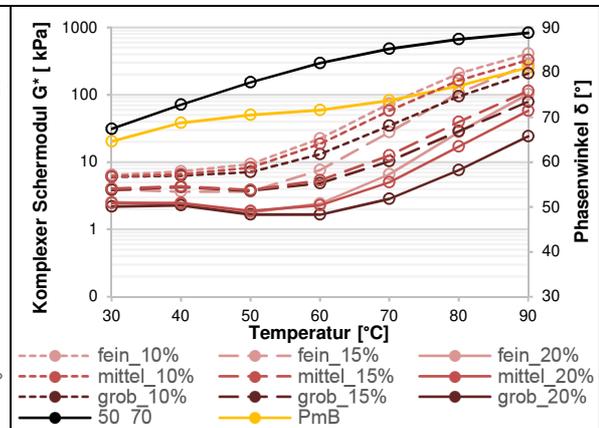


Abb. 3-12 Ergebnisse des DSR T-Sweep für den Phasenwinkel

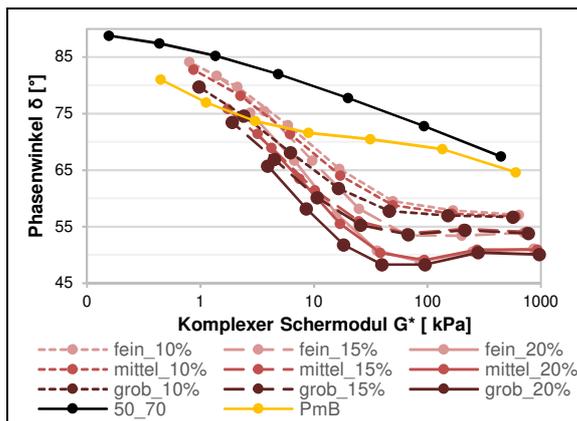


Abb. 3-13 Darstellung der Ergebnisse im Black-Diagramm

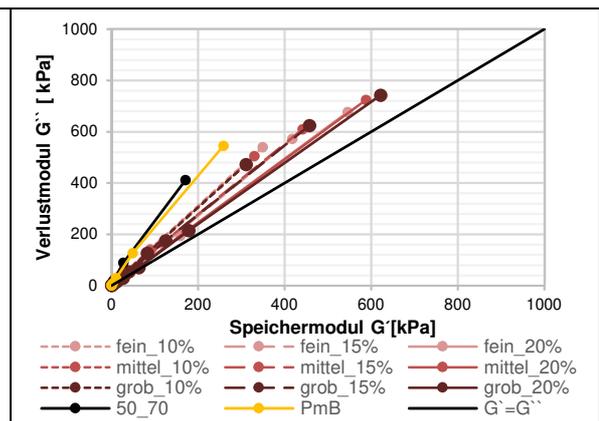


Abb. 3-14 Darstellung der Ergebnisse im Cole-Cole-Diagramm

Abb. 3-11 und Abb. 3-12 beinhaltet die Darstellungen des komplexen Schermoduls sowie des Phasenwinkels jeweils in Isochronen über den gesamten betrachteten Temperaturbereich. Im Vergleich zu den Referenzbitumen führt eine steigende Zugabemenge an Gummi zu einem immer größer werdenden Schermodul und einer Abnahme des Phasenwinkels, das zu einem deutlich elastischeren Materialverhalten führt. Dabei hat die Partikelgröße einen größeren Einfluss auf den Phasenwinkel, während der Schermodul kaum von den drei untersuchten Partikelgrößen abhängt. Es sei darauf verwiesen, dass die Isochronen des Phasenwinkels bei allen gummimodifizierten Bitumen einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Die Werte des Phasenwinkels sind im Temperaturbereich zwischen 30 und 50 °C - für die großen Partikel sogar bis 60 °C - relativ konstant. Daraus lässt sich eine geringe Empfindlichkeit gegen klimatische Einflüsse im hohen Gebrauchstemperaturbereich ableiten.

Das BLACK-Diagramm stellt den Logarithmus des komplexen Schermoduls  $G^*$  als Funktion des Phasenwinkels  $\delta$  dar. Der Vorteil dieser Darstellung in Abb. 3-13 liegt in der von

der Belastungsfrequenz und der Temperatur unabhängigen Interpretation der Messergebnisse [HAGNER 2003]. Die Funktion nimmt für jedes Bindemittel einen charakteristischen Verlauf im BLACK-Diagramm. So können, wie von [HAGNER 2003] und [Airey 2002] in Veröffentlichungen bestätigt, Informationen u.a. über die Modifikation des Bindemittels getroffen werden. Während der Funktionsverlauf des unmodifizierten Straßenbaubitumens fast linear ist, sind bei den modifizierten Bitumenproben Unstetigkeiten erkennbar. Die polymer- und Gummimodifizierten Varianten können anhand der charakteristischen Verläufe gut identifiziert bzw. unterscheiden werden. [Airey 2002] beschreibt dies als den Verlust der Zeit-Temperaturäquivalenz von modifizierten Bitumen.

Der komplexe Schermodul  $G^*$  setzt sich aus dem Speichermodul  $G'$ , welcher den elastischen Anteil entspricht, und dem Verlustmodul  $G''$ , welcher den viskosen Anteil enthält, zusammen. Beide Anteile können über trigonometrische Funktionen mit dem komplexen Schermodul  $G^*$  und dem Phasenwinkel  $\delta$  berechnet werden. In der Darstellung des Cole-Cole-Diagramms in Abb. 3-14 wird der Verlustmodul über den Speichermodul aufgetragen und bietet die Möglichkeit, elastische und viskose Anteile gegenüber zu stellen. Alle Wertepaare aus Speicher- und Verlustmodul liegen oberhalb der Geraden  $G'=G''$  und die untersuchten Bitumen haben dementsprechend überwiegend viskose Eigenschaften. Darüberhinaus wird auch deutlich, dass durch größere Gummimengen die elastischen Anteile steigen.

### 3.3.2.2 MSCRT

Um die Beständigkeit gegen plastische Verformung bzw. Spurrinnenbildung der Referenz- und Gummimodifizierten Bitumen zu bestimmen wurden Multiple Stress Strain Recovery (MSCR) Tests nach [AL MSCR-Prüfung 12] durchgeführt. Die Bitumenproben wurden für eine Dauer von einer Sekunde mit konstanter Scherspannung belastet. Anschließend folgt eine Erholungsphase von 9 Sekunden Dauer. Je Messung werden zehn Kriech- und Erholungszyklen bei drei Scherspannungen von  $\tau = 0,1$  kPa,  $\tau = 1,6$  kPa und  $\tau = 3,2$  kPa durchlaufen. Die Prüfungen wurden bei einer Temperatur von 60 °C und einem Plattendurchmesser von 25 mm durchgeführt. Für die Referenzvarianten wurde eine Spaltbreite von 1 mm gewählt und für die Gummi-Bitumen-Gemische 2 mm. Als Prüfergebnis wurden die Mittelwerte der Rückformung (R) und Nachgiebigkeit (Jnr) je Spannungsniveau berechnet. Dabei ist eine hohe durchschnittliche prozentuale Rückformung mit einem kleinen durchschnittlichen nicht rückformbaren Bereich als günstiges plastisches Verformungsverhalten mit einem hohen Widerstand gegen Spurrinnenbildung im Asphaltgemisch zu interpretieren. Die Ergebnisse der MSCR-Tests sind in Abb. 3-15 und Abb. 3-16 für eine Scherspannung von  $\tau = 3,2$  kPa dargestellt. Alle weiteren Versuchsergebnisse können Anlage 2.2 entnommen werden. Es sei darauf verwiesen, dass seit 2016 eine neue Version der Arbeitsanleitung zur Verfügung steht, die nur noch die Messung der zehn Kriech- und Erholungszyklen bei einer Scherspannung von  $\tau = 3,2$  kPa vorsieht. Die nachfolgende Interpretation der Prüfergebnisse kann auf alle weiteren Laststufen übertragen werden. Es ist zu erkennen, dass sowohl ein Anstieg der Gummizugabemenge als auch eine Vergrößerung der Partikel zu einer Zunahme der Rückformung und Abnahme der Nachgiebigkeit führen. Im Vergleich zum Straßenbaubitumen 50/70 weisen al-

le Gummi-Bitumen-Gemische einen größeren Widerstand gegen plastische Verformungen auf. Das polymermodifizierte Bitumen weist in etwa die gleichen Rückformungen wie die Gummi-Bitumen mit 20 % der feinen Partikel und 10 % der mittleren Partikel auf. Allerdings hat das PmB 25/55-55 einen größeren nicht rückformbaren Bereich als alle Gummi-Varianten. Letztlich weist das Gummi-Bitumen-Gemisch mit einer Zugabemenge von 20 % der groben Körnung den größten Widerstand gegen plastische Verformungen bzw. Spurrinnenbildung auf.

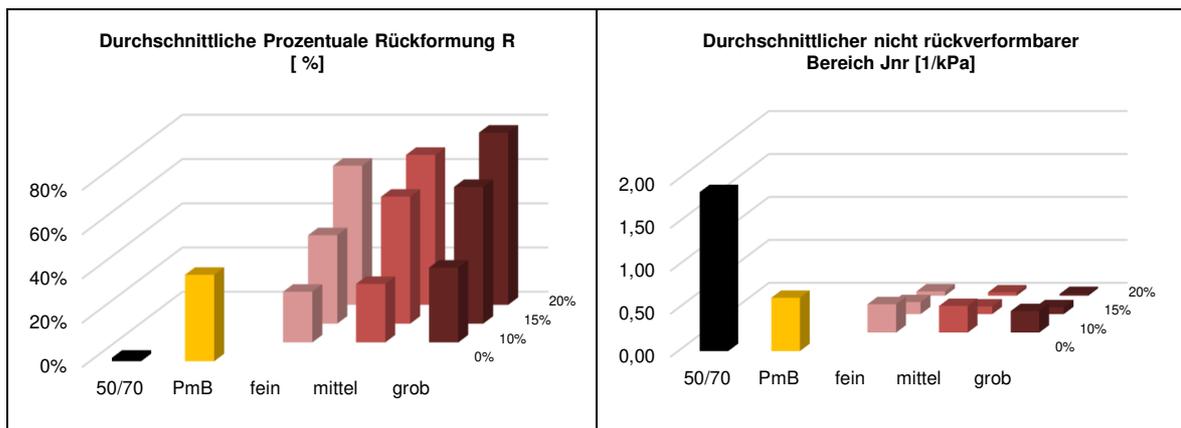


Abb. 3-15 Ergebnisse der MSCR-Prüfung für die durchschnittliche prozentuale Rückformung

Abb. 3-16 Ergebnisse der MSCR-Prüfung für den nicht rückformbaren Bereich

### 3.3.2.3 Ermüdungsverhalten

Die Beständigkeit gegen Ermüdung der Referenz- und Gummi-Bitumen-Varianten wurde in Anlehnung an das Verfahren für die Beschreibung des Ermüdungsverhaltes von Asphalten bestimmt. Gemäß [ AL Sp-Asphalt 09] und [ TP Asphalt-StB Teil 24] wird die Anzahl der Lastwechsel bis zur Ermüdungsrisssbildung basierend auf dem Konzept der dissipierenden Energie bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird das Produkt der Anzahl der Lastwechsel und des komplexen Schermoduls (bzw. des E-Moduls für Asphalt) gebildet und über die Anzahl der Lastwechsel aufgetragen. Das Maximum dieser Funktion wird als Zeitpunkt der Makrorissbildung interpretiert und die zugehörige Lastwechselzahl stellt die maximal ertragbaren Lastwechsel bei dem jeweils aufgebrauchten Belastungsniveau dar. Bei der Bestimmung des Ermüdungsverhaltens mit den DSR wird die Bitumenprobe mit einer zyklischen Scherspannung bei 20 °C und einer Frequenz von 10 Hz belastet. Es wird ein Platte-Platte-Messsystem mit einem Durchmesser von 8 mm und einem Spaltabstand von 2 mm verwendet. Für jedes Belastungsniveau einer Bitumenvariante wird die zum definierten Versagenszeitpunkt ermittelte Lastwechselzahl  $N$  der dazugehörigen elastischen Anfangsdeformation  $d_{Anf.}$ , hier definiert als die Dehnung zum Zeitpunkt des 1.000 Lastwechsels, in doppellogarithmischer Darstellung gegenübergestellt. Zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphalten wird die elastische Anfangsdehnung um den 100. LW herangezogen. Das verwendete DSR weist allerdings leichte regelungsschwierigkeiten zu Bwinn des Versuchs auf, sodass die Deformation zur Erstellung der Ermüdungsfunktionen bei einer höheren Lastwechselzahl ermittelt wurden, um so bessere

Bestimmtheitsmaße für die Funktion zu erzielen. In Anlehnung an das Verfahren zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens von Asphalt dient als funktionaler Ansatz für die Ermüdungsfunktion der Bitumen nachfolgende Gleichung:

$$N = a_1 \cdot d_{Anf}^{a_2} \tag{1}$$

dabei sind:

- $N$  Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen [-]
- $d_{Anf}$  Deformation beim 1.000 Lastwechsel (analog zur elastischen Anfangsdehnung bei Ermüdungsuntersuchungen an Asphaltgemischen) [%]
- $a_1, a_2$  Regressionsparameter [-]

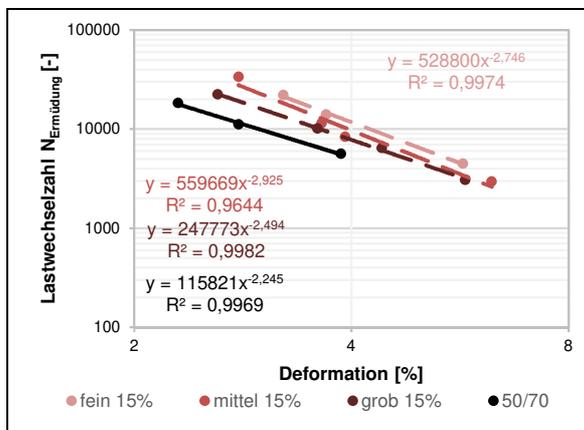


Abb. 3-17 Ermüdungsfunktionen der Grundbitumen und der 15%-Gummivarianten

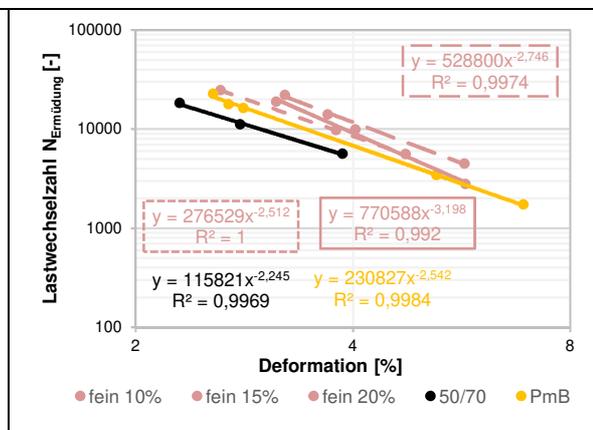


Abb. 3-18 Ermüdungsfunktionen des Grundbitumen und der feinen Gummipartikel

Abb. 3-17 beinhaltet die Ermüdungsfunktion der Referenzvariante mit Straßenbaubitumen sowie die Gummi-Varianten mit 15 % Zugabemenge. Während alle Gummi-Varianten größere Lastwechselzahlen bis zum zuvor definierten Ermüdungskriterium als die Referenzvariante aushalten, zeigt die Variante mit den feinen Gummipartikeln das günstigste Ermüdungsverhalten. Vergleichbare Ergebnisse liegen auch für die Varianten mit 10 % und 15 % Gummizugabemenge vor. Die Versuchsergebnisse aller weiteren Ermüdungsversuche sind in Anlage 2.2 enthalten. Abb. 3-18 sind folglich die Ermüdungsfunktionen der Gummi-Bitumen-Gemische mit feinen Partikeln aller drei Zugabemengen im Vergleich zu den beiden Referenzvarianten dargestellt. Die Gummi-Varianten weisen ein günstigeres Verhalten gegen Ermüdung auf als die Referenzvarianten, wobei das polymermodifizierte Bitumen mehr Lastwechsel aushält als das Straßenbaubitumen. Letztlich zeigt das Gummi-Bitumen mit feinen Partikeln bei einer Zugabemenge von 15 % die beste Beständigkeit gegen Ermüdung.

### 3.4 Auswahl der Gummi-Bitumen-Varianten für die Asphaltuntersuchungen

Eine Asphaltbefestigung besteht aus unterschiedlichen Schichten, die verschiedenen Belastungen standhalten müssen (vgl. 2.1.1). Bei der Auswahl eines Bindemittels für ein Asphaltgemisch sind die zu erwartenden Beanspruchungen entsprechend zu berücksichtigen. Es sei darauf verwiesen, dass das Materialverhalten eines Asphaltgemisches nicht ausschließlich von den Eigenschaften des Bindemittels abhängt. So haben unter anderem auch die Sieblinie oder das Adhäsionsverhalten einen Einfluss.

Wie bereits erwähnt, gibt es seit geraumer Zeit Bestrebungen die rheologischen Eigenschaften von Bitumen zu untersuchen. Im Zuge des Strategic Highway Research Program (SHRP) wurden nicht nur performanceorientierte Prüfverfahren entwickelt, sondern auch ein Bewertungshintergrund erarbeitet. Gemäß den Untersuchungen des SHRP gilt der Kennwert  $G^*/\sin(\delta)$  als Kriterium für den Einfluss des Bitumens auf den plastischen Verformungswiderstand des Asphaltgemisches. Es wird angenommen, ein großer Kennwert führt zu einem hohen Widerstand gegen plastische Verformungen. Da die Standfestigkeit des Asphalts mit steigender Temperatur abnimmt, werden zur Ermittlung des Kennwertes die Prüfergebnisse bei 60 °C verwendet. Abb. 3-19 zeigt das SHRP-Kriterium für den Verformungswiderstand für alle untersuchten Bitumen. Es wird deutlich, dass sich ein Anstieg der Gummizugabemenge positiv auf das plastische Verformungsverhalten auswirkt. Außerdem nimmt der Einfluss der Partikelgröße mit der Zugabemenge zu. Während der Kennwert für die 10 % Gummi-Bitumen für alle drei Partikelgrößen quasi gleich ist, gibt es bei 20 % Zugabemenge eine Steigerung des Widerstandes gegen plastische Verformungen mit der Partikelgröße. Alle Gummi-Bitumen-Varianten sind gemäß des Kennwertes resistenter gegen bleibende Verformungen als die zwei Referenzvarianten. Die Interpretation des SHRP-Kriteriums ist konsistent zu den Ergebnissen der MSCR-Prüfungen. Die Gummi-Bitumenvariante mit 20 % der groben Partikel zeigt den größten Widerstand gegen plastische Verformungen und wäre folglich am geeignetsten für den Einsatz in Asphaltdeckschichtgemischen hinsichtlich des plastischen Verformungsverhaltens.

In den Untersuchungen des SHRP wurde auch ein Kriterium zur Bewertung des Ermüdungswiderstandes entwickelt. Demnach sollte sich ein Bitumen, das leicht verformbar und gleichzeitig möglichst elastisch ist – also einen kleinen komplexen Schubmodul sowie Phasenwinkel im unteren und mittleren Gebrauchstemperaturbereich hat – sich positiv auf das Versagen des Asphaltgemisches durch Materialermüdung auswirken. Das SHRP-Kriterium zur Bewertung des Ermüdungswiderstandes ist der Kennwert  $G^* \cdot \sin(\delta)$  bzw. das Verlustmodul bei 30°C, welches möglichst gering sein sollte. Abb. 3-20 zeigt das SHRP-Kriterium für den Ermüdungswiderstand für alle untersuchten Bitumen ab. Demnach wäre das Straßenbaubitumen deutlich ermüdungsresistenter als das polymermodifizierte Bitumen. Allein diese Tatsache lässt Zweifel an der Gültigkeit des Kriteriums aufkommen. Aus Untersuchungen an Asphaltgemischen mit Straßenbaubitumen und PmB ist bekannt, dass der Einsatz polymermodifizierter Bindemittel in der Regel zu höheren ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Versagen führt. Das SHRP-Kriterium zum Ermü-

dungswiderstand wird auch von [HAGNER 2003] kritisch betrachtet. Durch die Alterung von Bindemitteln nimmt der Verlustmodul überwiegend ab. Folgt man dem Gedanke des SHRP-Kriteriums für den Ermüdungswiderstand, wären gealterte Asphalte resistenter gegen Dauerbeanspruchung als Asphaltgemisch mit frischem bzw. jüngerem Bindemittel. Dies deckt sich nicht mit den Erfahrungen aus der Praxis. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden zur Bewertung des Widerstandes gegen Ermüdung der Bitumen die Ergebnisse der Ermüdungsversuche in Anlehnung an die Untersuchungen zum Asphalt herangezogen. Bei diesen Versuchen wurde ein Versagen der Bitumenproben unter wiederholter Beanspruchung beobachtet. Dies kommt den tatsächlich auftretenden Beanspruchungen in der Asphaltbefestigung am nächsten. Demnach wäre das Gummimodifizierte Bitumen mit den feinen Partikeln und einer Zugabemenge von 15 % am resistensten gegen Ermüdung.

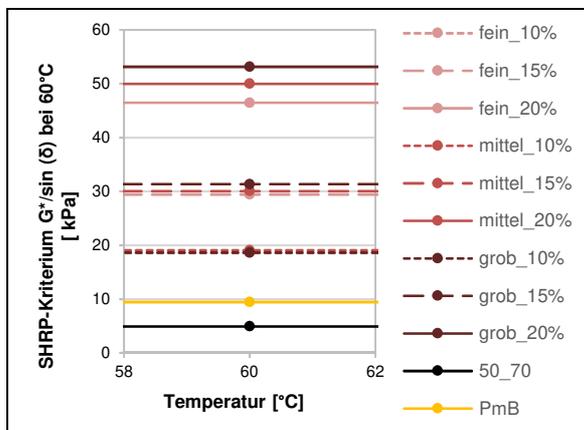


Abb. 3-19 SHRP-Kriterium  $G^*/\sin(\delta)$  für den Verformungswiderstand

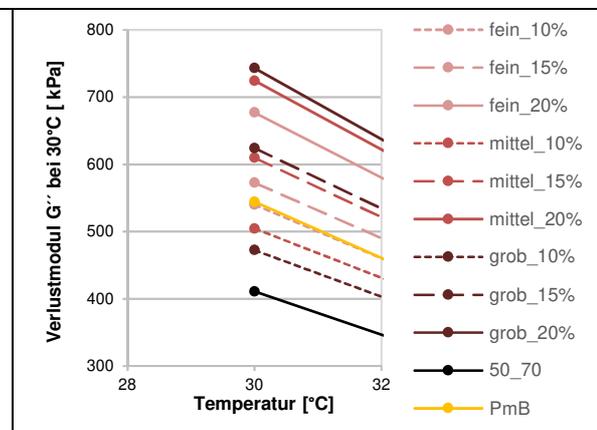


Abb. 3-20 SHRP-Kriterium  $G^* \cdot \sin(\delta)$  für den Ermüdungswiderstand

Da in der Praxis aktuelle mehr Schäden durch Rissbildung in der gesamten Asphaltbefestigung als Spurrinnenentwicklung auftreten, wurde im projektbegleitenden Ausschuss entschieden, sowohl die Trag- als auch Deckschichtgemische mit den feinen Gummipartikeln zu modifizieren und die optimale Zugmenge zu ermitteln.

## 4 ASPHALTUNTERSUCHUNGEN

### 4.1 Untersuchungsmethodik

#### 4.1.1 Experimentelles Vorgehen

Das Ziel der Asphaltuntersuchungen besteht darin, den Einfluss der Gummimodifizierung auf die dimensionierungsrelevanten Materialeigenschaften zu beschreiben. Dafür ist es zunächst erforderlich die Zusammensetzung der Asphaltgemische festzulegen. Nach umfangreichen Untersuchungen von [DRAGON et al. 2011] hat die Veränderung der Asphaltmischgutzusammensetzung einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltbefestigungen. So wurde auch in diesem Forschungsprojekt zunächst der optimale Bindemittelgehalt über die gebrauchsverhaltensorientierte Asphaltmischgutkonzeption ermittelt und anschließend die Zusammensetzung der Gummimodifizierten Asphaltgemische nach dem Ansatz von [NEUTAG 2015] festgelegt. Das Kapitel beschreibt neben der Mischgutkonzeption auch die Durchführung und Auswertung der Versuche zur Ansprache des dimensionierungsrelevanten Materialverhaltens mittels Spaltzug-Schwellversuch (SZSV).

#### 4.1.2 Untersuchte Asphaltgemische

Die Untersuchungen erfolgten an vier Asphaltbetonen für Tragschichten der Sorte AC 22 T S sowie für fünf Deckschichten der Sorte AC 11 D S. Die Asphaltvarianten werden jeweils mit Referenzbindemitteln und drei Gummi-Bitumen-Varianten hergestellt. Die angestrebte Sieblinie und die verwendete Gesteinskörnung wurden zu Beginn jeweils für die Deck- und Tragschichtgemische festgelegt und in den Untersuchungen nicht variiert. Entgegen der üblichen Praxis wurden die Tragschichtgemische ohne Ausbauasphalt hergestellt, um so eventuelle Einflüsse durch das RC-Material auszuschließen und zunächst ausschließlich Rückschlüsse auf die Gummimodifizierung schließen zu können. Tab. 4-1 gibt einen Überblick über alle untersuchten Asphaltgemische. Die optimalen Bindemittelgehalte für die Referenzvarianten wurden mit dem von [DRAGON et al. 2011] entwickelten Verfahren zur gebrauchsverhaltensorientierten Mischgutzusammensetzung im Labor bestimmt (siehe 4.2). Der Gesamtbindemittelgehalt, welcher sich für die Gummi-Varianten aus Bitumen und Gummi zusammensetzt, wurde anschließend nach dem Ansatz von [NEUTAG 2015] bestimmt: bei einer fünfprozentigen Steigerung der Gummizugabemenge wird der Bindemittelgehalt um 0,2 M.-% angehoben. Die Bitumenmenge ergibt sich aus der Differenz von Gesamtbindemittelgehalt und Gummizugabemenge. Die resultierenden Gesamtbindemittelgehalte sowie die jeweiligen Anteile an Gummi und Bitumen sind für alle Asphaltgemische in Abb. 4-3 und Abb. 4-4 dargestellt. Für die anschließende Auswertung der Untersuchungen wurde eine einheitliche Beschriftung der einzelnen Varianten eingeführt. Dabei wird zunächst mit DS bzw. TS in Deck- und Tragschichtgemische unterschieden. Darauffolgend wird die Bezeichnung durch eine Verweis auf das jeweilige Bindemittel ergänzt: 50/70 und PmB weisen jeweils die Referenzvarian-

ten aus, während 10, 15 und 20% die Gummi-modifizierten Asphaltgemische mit dem entsprechend eingemischten Gummianteil unterscheiden.

	Deckschicht	Tragschicht
Mischgutsorte	AC 11 DS	AC 22 TS
Referenzbindemittel	50/70 und PmB 25/55-55	50/70
Gummivarianten	fein : 10, 15 und 20 %	fein : 10, 15 und 20 %
RC-Anteil	0 %	0 %
Gestein	Hornfels	Hornfels
Füller	Kalksteinfüller	Kalksteinfüller
Sieblinie nach [ TL Asphalt-StB 07]	mittlere Sieblinie	mittlere Sieblinie
Anzahl Varianten	4	5

Tab. 4-1 Übersicht Mischgutvarianten

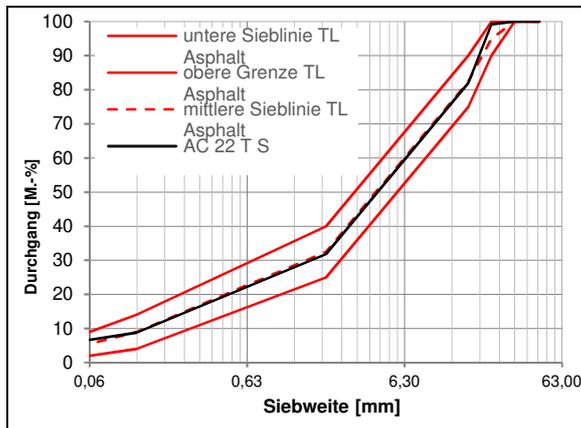


Abb. 4-1 Gewählte Sieblinie der Asphalttragschichtgemische

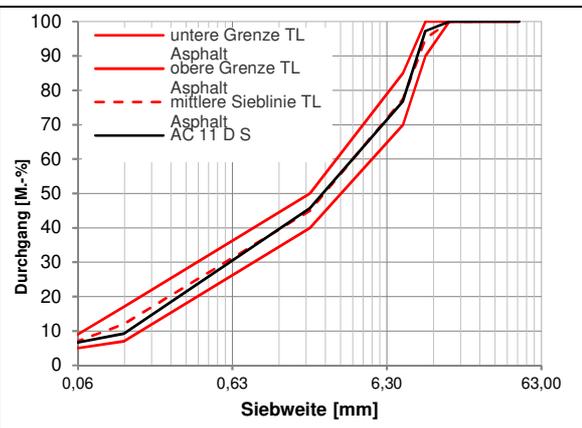


Abb. 4-2 Gewählte Sieblinie der Asphaltdeckschichtgemische

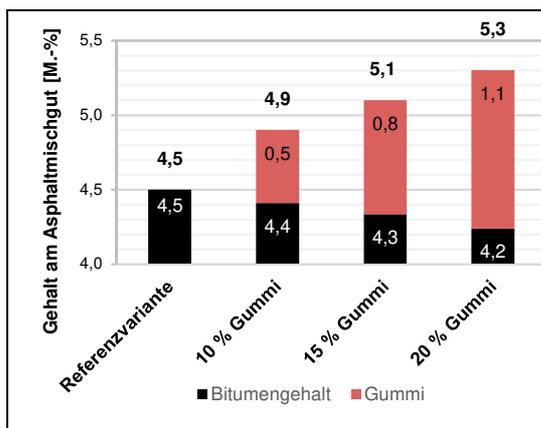


Abb. 4-3 Ermittelte Bindemittelgehalte der Asphalttragschichtgemische

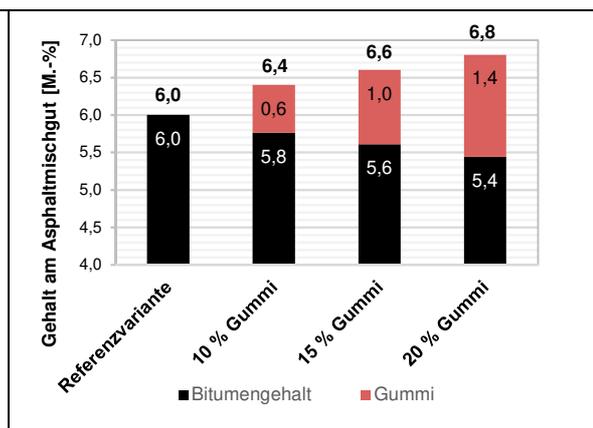


Abb. 4-4 Ermittelte Bindemittelgehalte der Asphaltdeckschichtgemische

### 4.1.3 Herstellung der Probekörper

Die Herstellung der Probekörper für die Spaltzug-Schwellversuche (SZSV) zur Ermittlung der optimalen Bindemittelgehalte der Referenzvarianten erfolgte im Straßenbaulabor der TU Dresden. Die notwendigen Asphaltplatten mit den Abmessungen  $B \times L \times H = 260 \text{ mm} \times 320 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}/60 \text{ mm}$  wurden im Walzsektor-Verdichtungsgerät gemäß TP Asphalt, Teil 33 (TP Asphalt-StB 07 Teil 33) bei einer Temperatur von  $135 \text{ °C}$  für Asphaltgemische mit Straßenbaubitumen bzw.  $145 \text{ °C}$  für Asphaltgemische mit polymermodifiziertem Bitumen verdichtet. Das Asphalteinwaagegewicht für eine Platte wurde unter Verwendung der zuvor bestimmten Raumdichte am Marshall-Probekörper und des gewünschten Verdichtungsgrades berechnet. Die Probekörper, deren Durchmesser und Höhe entsprechend Tab. 4-2 abhängig vom Größtkorn sind, wurden anschließend aus den Asphaltplatten durch Bohren herausgetrennt.

Die im Anschluss untersuchten Asphaltvarianten mit Referenz- und Gummimodifizierten Bindemitteln werden alle in der Mischanlage hergestellt und anschließend mit dem Fertiger in Versuchsfeldern eingebaut. Um das Materialverhalten möglichst realitätsnah hinsichtlich der Verdichtungsbedingungen abzubilden, wurden die Probekörper aus Bohrkernen gewonnen, die aus den Testfeldern entnommen wurden. Die Bohrkernentnahme erfolgte jeweils vor Verkehrsbelastung der einzelnen Abschnitte, sodass noch keine nutzungsbedingte strukturelle Veränderung der Asphalte in der Befestigung stattgefunden hatte. Die Anzahl der zu entnehmenden Bohrkern richtet sich nach den Vorgaben der entsprechenden Technischen Prüfvorschriften für den SZSV: 10 Bohrkern zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion nach (TP Asphalt-StB Teil 24 Entwurf 2016) und 4 Bohrkern zur Bestimmung der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion nach (TP Asphalt-StB Teil 26A Entwurf 2016). Die Probekörper, deren Durchmesser und Höhe entsprechend Tab. 4-2 abhängig vom Größtkorn sind, wurden anschließend aus den Kernen durch Sägen und Bohren herausgetrennt.

Abmessung	Einheit	AC 22 T S	AC 11 D S
Probekörper Höhe	mm	$60,0 \pm 2,0$	$40,0 \pm 2,0$
Probekörper Durchmesser	mm	$150,0 \pm 2,0$	$100 \pm 2,0$

Tab. 4-2 Probekörperabmessungen die Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche nach den technischen Prüfvorschriften [ TP Asphalt-StB Teil 24] und [ TP Asphalt-StB Teil 26A]

### 4.1.4 Laborversuche

#### 4.1.4.1 Versuchsdurchführung

Im Spaltzug-Schwellversuch wird eine zylindrische Probekörperscheibe zwischen zwei diametral gegenüberliegenden Lasteinleitungsschienen mit einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwellbelastung belastet. Die Messung der horizontalen Verformung erfolgt durch induktive Wegaufnehmer, die in einem Halterahmen am Probekörper angebracht sind. In Abb. 4-5 ist der Versuchsaufbau eines Spaltzug-Schwellversuches dargestellt. Infolge der Probekörperform und der linienförmigen Lasteinleitung auf der Mantelfläche bildet sich im Probekörper in vertikaler und horizontaler Richtung ein inhomogener Span-

nungszustand aus. Anhand von Berechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode konnte gezeigt werden, dass in der Mitte des Probekörpers über einen Bereich von ca. 70% des Probekörperdurchmessers die bei vertikaler Belastung entstehende horizontale Zugspannung nahezu konstant ist. An den Lasteinleitungsstellen treten in horizontaler Richtung Druckspannungen auf. Die vertikalen Druckspannungen sind geometriebedingt im Probekörpermittelpunkt am geringsten und an den Lasteinleitungsstellen am größten (siehe Abb. 4-6). Im Probekörpermittelpunkt beträgt das Verhältnis zwischen vertikaler Druck- und horizontaler Zugspannung 3 : 1 [WELLNER et al. 2007].



Abb. 4-5 Versuchsaufbau Spaltzug-Schwellversuch

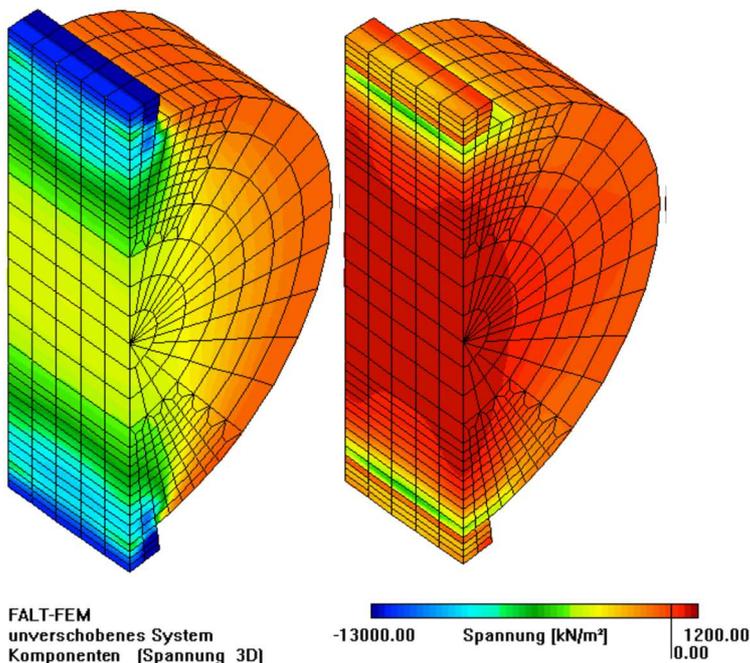


Abb. 4-6 Horizontaler und vertikaler Spannungszustand im Spaltzug-Schwellversuch [OESER et al.2005]

Vorteile dieses Versuches sind die einfache Probekörperherstellung und -vorbereitung. Es können sowohl Marshallprobekörper, als auch (besser) Bohrkerne aus Platten, hergestellt mit dem Walzsektorverdichter im Labor oder entnommen aus Straßenbefestigungen, ver-

wendet werden. Die Belastung erfolgt ausschließlich über Druckkräfte. Außerdem können die zur Auswertung notwendigen Horizontalverformungen direkt am Probekörper bestimmt werden.

Nach dem aktuellen Stand der Technik werden die Steifigkeitsmodul-Temperatur- und Ermüdungsfunktionen gemäß den [ AL Sp-Asphalt 09] mit dem Spaltzug-Schwellversuch ermittelt. Mit den Entwürfen der technischen Prüfvorschriften [ TP Asphalt-StB Teil 26A] zur Bestimmung der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion sowie [ TP Asphalt-StB Teil 24] zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion stehen nunmehr Vorschriften mit an den Stand der Wissenschaft angepassten Prüfbedingungen und Auswertansätzen in der Entwurfsversion zur Verfügung. Die genannten Technischen Prüfvorschriften finden im Rahmen des Projektes Anwendung. Die Prüfbedingungen sind in Tab. 4-3 zusammengefasst.

Prüfbedingungen	Steifigkeit	Ermüdung
Temperatur [°C]	-10 / 5 / 20	20
Frequenz [Hz]	0,1 / 0,3 / 1 / 5 / 10	10
Unterspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	0,035	0,035
Zulässige horizontale Anfangsdehnung [% <sub>o</sub> ]	0,05 bis 0,1	0,05 bis 0,2
Anzahl an Wiederholungen	4	3

Tab. 4-3 Prüfbedingungen SZSV

#### 4.1.4.2 Bestimmung der Steifigkeits-Temperaturfunktion

Zur Bestimmung der Steifigkeits-Temperaturmodulfunktion der einzelnen Asphaltgemische wurden Multistage-Versuche bei drei Temperaturen und fünf Frequenzen durchgeführt. In Anlehnung an die [ AL Sp-Asphalt 09] erfolgt zunächst die Bestimmung des Faktors  $\alpha_T$  durch Verschiebung der für jede Prüftemperatur ermittelten Isotherme mittels des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips nach dem Ansatzes von Arrhenius (Gleichung 2) für eine Referenztemperatur  $T_{Ref}$  von 20°C. Als Regressionsfunktion für die Berechnung der Hauptkrurve wird zweckmäßig eine Sigmoid-Funktion (Gleichung 3) vorgeschlagen.

$$\log \alpha_T = \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref.}} \right) \quad (2)$$

dabei sind:

$\alpha_T$	Verschiebungsfaktor [-]
$E_a$	Aktivierungsenergie [J/mol]
$R$	universelle Gaskonstante mit $R = 8.314$ J/mol
$T$	absolute Temperatur [K]
$T_{Ref.}$	absolute Referenztemperatur [K]

$$E^* = y_0 + \frac{w}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{z}\right)}} \quad (3)$$

dabei sind:

$y_0$	Schnittpunkt der Funktion mit der Ordinatenachse [N/mm <sup>2</sup> ]
$x_0$	Schnittpunkt der Funktion mit der Abszissenachse [-]
$x$	beliebiger Wert auf der Abszissenachse [-]
$w$	materialspezifischer Regressionsparameter [N/mm <sup>2</sup> ]
$z$	materialspezifischer Regressionsparameter [-]

Nach [AL Sp-Asphalt 09] kann für den Term  $m=E_a/R$  für Asphaltgemische mit Straßenbaubitumen der Wert 25.000 angesetzt werden. Aussagen zur Größenordnung des Wertes  $m$  für Asphaltgemische mit (polymer-)modifiziertem Bitumen werden in der [AL Sp-Asphalt 09] nicht getroffen. Daher scheint es für die untersuchten Materialien sinnvoll, dem Ansatz der [TP Asphalt-StB Teil 26A] zu folgen und den Verschiebungsfaktor material-spezifisch zu bestimmen. Darüber hinaus können Werte für den Steifigkeitsmodul bei Temperaturen von mehr als 20 ° C aufgrund von sehr hohen Verformungen an der Lastangriffsfläche, die zu verfälschten Ergebnissen führen können, nicht mit SZSV bestimmt werden. [AL Sp-Asphalt 09] schlägt hierfür nur die Berechnung durch Extrapolation vor und verweist darauf, dass insbesondere bei Temperaturen > 50°C unplausible Steifigkeitsmoduln berechnet werden können. Daher erfolgt gemäß [TP Asphalt-StB Teil 26A] die Bestimmung eines minimalen und maximalen Steifigkeitsmoduls anhand des formellen Zusammenhanges zwischen im Versuch aufgezeichnetem Phasenwinkel und ermitteltem Steifigkeitsmodul. Mögliche Regressionsansätze und eine ausführliche Herleitung werden von [ZEIBLER 2015] diskutiert. Die Masterkurven wurden letztlich nach Gleichung 4 und 5 berechnet:

$$E_i = |E|_{min} + \frac{|E|_{max} - |E|_{min}}{1 + e^{(b_1 \cdot x_i^* + b_0)}} \quad (4)$$

mit:

$$x_i^* = \log_{10} \cdot \left( e^{m \left( \frac{1}{T_i + 273,15} - \frac{1}{T_R + 273,15} \right)} \cdot f_i \right) \quad (5)$$

dabei sind:

$ E _{min},  E _{max}$	Grenzwerte des absoluten E-Moduls [N/mm <sup>2</sup> ]
$ E _i$	absoluter E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
$T_R$	Referenztemperatur [°C]
$T_i$	absolute Temperatur [°C]
$f_i$	Frequenz [Hz]
$m$	materialspezifischer Parameter für Temperaturshift [-]
$b_1, b_0$	Regressionsparameter [-]

#### 4.1.4.3 Bestimmung der Ermüdungsfunktion

Das Ermüdungsverhalten von Asphaltgemischen wird üblicherweise durch eine Versuchsreihe bestimmt, die aus mindestens neun Probekörpern besteht, die bei drei verschiedenen Belastungsniveaus geprüft werden. Die SZSV zur Bestimmung des Ermüdungsverhal-

tens werden bei einer Temperatur von 20 ° C und einer Frequenz von 10 Hz bis zum Versagen der Probe durchgeführt. Gemäß [ AL Sp-Asphalt 09] und [ TP Asphalt-StB Teil 24] muss die Anzahl der Lastzyklen bis zur Rissbildung (Ermüdung) mit dem von [HOPMAN et al. 1989] auf Basis des Konzepts der dissipierten Energie entwickelten Verfahren bestimmt werden. Dafür ist das Produkt der Anzahl der Belastungszyklen und des Steifigkeitsmoduls gegen die Anzahl der Belastungszyklen aufzutragen. Das Maximum einer solchen Funktion zeigt die Bildung von Makrorissen und führt zu der erforderlichen Anzahl von Belastungszyklen bis zum Versagen. Sobald die entsprechende Anzahl von Belastungszyklen für jede Probe bestimmt worden ist, wird die Anzahl der Zyklen bis zum Versagen gegen die gemessenen anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen in doppellogarithmischer Darstellung gegenübergestellt. Als Regressionsfunktion für die daraus zu bildenden Ermüdungsfunktionen empfiehlt sich folgender Ansatz:

$$N_{Makro} = a_1 \cdot e_{el,anf}^{a_2} \tag{6}$$

dabei sind:

- $N_{Makro}$  Anzahl Lastwechsel bis zum Makroriss [-]
- $e_{el,anf}$  anfängliche, elastische Anfangsdehnung [‰]
- $a_1, a_2$  materialspezifische Regressionsparameter [-]

#### 4.1.4.4 Berechnung der kryogenen Zugspannungen

Kryogene Zugspannungen sind aufgrund behinderter Dehnung infolge Temperaturabsenkungen auftretende Zwängungsspannungen. Bei entsprechenden Temperaturen sind neben den verkehrslastbedingten Zugspannungen auch kryogene Zugspannungen zu beachten. Gemäß den [ RDO Asphalt 09] werden diese bei jedem zweiten Lastwechsel bei Temperaturen kleiner 5 °C berücksichtigt. Das Tieftemperaturverhalten kann durch Abkühlversuche nach [TP Asphalt-StB Teil 46 A] prüftechnisch angesprochen oder mit Gleichung in Abhängigkeit des Steifigkeitsmoduls bei – 20 °C rechnerisch abgeschätzt werden [WELLNER et al. 2013]:

$$\sigma_{Kryo}(T) = \frac{\left( \frac{E_{(-20^\circ C)}^{4,3568}}{30,371^{3,3568}} \right)}{10.000} * \frac{(0,001093 * T^2 - 0,100096 * T + 0,748643)}{3,2} \tag{7}$$

dabei sind:

- $\sigma_{Kryo}(T)$  kryogene Spannungen (Definitionsbereich -20 °C bis 20 °C)
- $E_{(-20^\circ C)}$  Elastizitätsmodul (-20 °C, 10 Hz)
- $T$  Temperatur [°C]

## 4.2 Gebrauchsverhaltensorientierte Asphaltmischgutkonzeption

### 4.2.1 Konzept

Da konventionellen Prüfverfahren der indirekten Ansprache der Asphalteeigenschaften reichen oft nicht mehr aus, um das Gebrauchsverhalten von Asphaltgemischen in Verkehrsflächenbefestigungen prognostizieren zu können. So wurde im Rahmen der Forschungsarbeit von [DRAGON et al. 2011] ein System der Asphaltkonzeption unter Verwendung von gebrauchsvorhaltensorientierten Asphaltprüfungen vorgeschlagen, da das Gebrauchsverhalten einer Asphalttragschicht bei der rechnerischen Dimensionierung einer Asphaltbefestigung entscheidend für die Nachweisführung des Schadenskriteriums Ermüdungsrissbildung ist. Die von [DRAGON et al. 2011] entwickelte gebrauchsvorhaltensorientierte Asphaltmischgutkonzeption umfasst folgende Schritte:

- Festlegung der Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches
- Herstellung von Asphaltprobemischungen mit verschiedenen Bindemittelgehalten
- Bestimmung der Ermüdungsfunktion- und der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Asphaltprobemischungen
- Durchführung von Dimensionierungsberechnungen anhand einer fiktiven Verkehrsfläche mit festgelegten dimensionierungsrelevanten Eingangsgrößen
- Bestimmung des optimalen Bindemittelgehalts anhand der Dimensionierungsberechnungen

Weitere Überlegungen und Empfehlungen sind den Ausführungen von [DRAGON et al. 2011] zu entnehmen. Das beschriebene Verfahren wurde für Asphalttragschichtgemische entwickelt, da bei der rechnerischen Dimensionierung gemäß [RDO Asphalt 09] der Nachweis des Schadenskriteriums Ermüdungsrissbildung für Asphaltbefestigungen an der Unterseite der Asphalttragschicht zu erbringen ist, da hier im Bereich der Lastachse die größten horizontalen Biegezugdehnungen auftreten. Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden jedoch auch Deckschichtgemische betrachtet, so dass bei der Auswertung der Dimensionierungsberechnungen ein weiterer Nachweispunkt zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens der Deckschichtmaterialien berücksichtigt wird. Ergänzende Ausführungen zur Wahl der Nachweispunkte können Kapitel 6.1 entnommen werden.

### 4.2.2 Auswertung

Die Herstellung der Probekörper für die Spaltzug-Schwellversuche zur Ermittlung der optimalen Bindemittelgehalte der Referenzvarianten erfolgte im Labor jeweils mit einer mittleren Sieblinie nach [TL Asphalt-StB 07] (vgl. Abb. 4-1 und Abb. 4-2) und unter Variation der Bindemittelgehalte:

- DS mit Straßenbaubitumen 50/70: 4,5, 5,5, 6,5 und 7,5 M.-%,
- DS mit polymermodifiziertem Bitumen: 4,5, 5,5, 6,5 und 7,5 M.-% und
- TS mit Straßenbaubitumen 50/70: 3,5; 4,5, 5,5 und 6,5 M.-%

Anschließend erfolgte die Bestimmung der Ermüdungs- und Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion entsprechend den in Kapitel 4.1.4 erläuterten Prüfbedingungen und Auswertungsansätzen.

Um Ermüdungsbständigkeit der einzelnen Asphaltgemische zu beurteilen, wurde eine fiktive Befestigung mit konstanter Schichtdicke und Belastung mit unterschiedlichen Asphaltmaterialien betrachtet. Zur Ermittlung des Ermüdungsstatus der Tragschichtgemische wurde eine Deckschichtvariante eingesetzt und die Tragschichtmaterialien variiert. Analog erfolgten die Berechnungen für die Deckschichtgemische. Die Dimensionierungsberechnungen zur Bestimmung der optimalen Bindemittelgehalte der Referenzvarianten erfolgten an einem Konstruktionsaufbau einer Bk1,0 mit einer frostsicheren Dicke des Oberbaus von 75 cm:

- 4 cm Asphaltdeckschicht,
- 14 cm Asphalttragschicht und
- 57 cm Frostschutzschicht.

Die materialspezifischen Kennwerte der einzelnen Asphaltdeck- und Asphalttragschichtgemische der Steifigkeitsmodul-Temperatur- sowie Ermüdungsfunktionen und weitere Eingangparameter für die Dimensionierungsberechnungen sind in Anhang 3 aufgeführt.

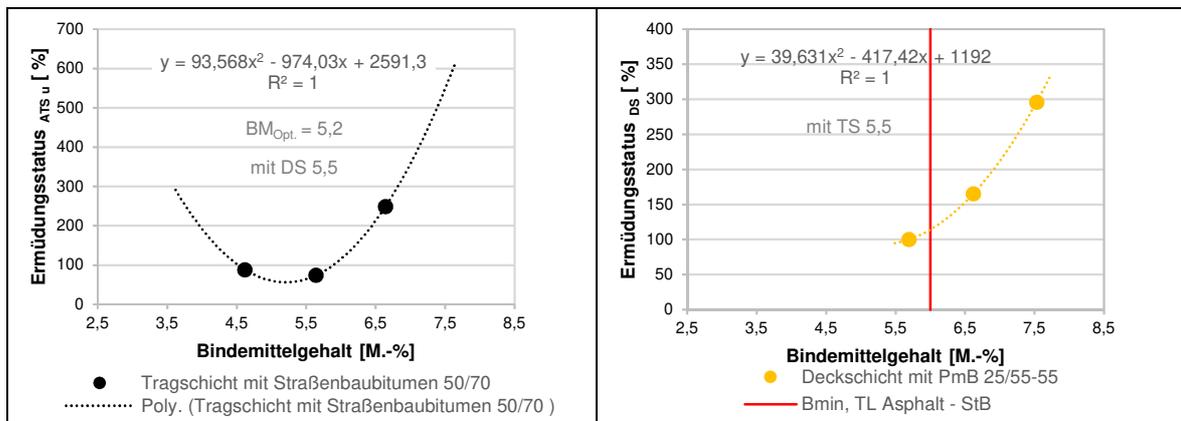


Abb. 4-7 Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen mit Variation der Tragschichtgemische, NWP Tragschicht

Abb. 4-8 Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen mit Variation der Deckschichtgemische, NWP Deckschicht

Abb. 4-7 können die ermittelten Ermüdungsstatus unter Variation der Tragschichtgemische im Konstruktionsaufbau aufgetragen über die entsprechende Bindemittelgehalte entnommen werden. Aus der Darstellung geht hervor, dass bei einem Bindemittelgehalt von 5,2 M.-% der geringste Ermüdungsstatus nach 30 Jahren Nutzungsdauer an der Unterseite der Asphalttragschicht zu erwarten ist. Vor dem Hintergrund die Bindemittelgehalte in den Gummimodifizierten Gemischen weiter anzuheben um der Viskositätssteigerung entgegenzuwirken, legte der Projektbegleitende Ausschuss einen Bindemittelgehalt von 4,5 M.-% für Tragschichtreferenzvariante mit Straßenbaubitumen fest. Dieser Bindemittelgehalt entspricht zwar nicht dem rechnerischen Optimum, aber der Ermüdungsstatus von 100 % und der damit gleichzusetzende Ausfall der Verkehrsflächenbefestigung am Ende

der Nutzungszeit wird nicht überschritten. Abb. 4-8 können die Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen der Deckschichtgemische mit PmB entnommen werden. Abweichend von den Tragschichtgemischen ergibt sich kein optimaler Bindemittelgehalt. Ein vergleichbares Ergebnis wurde auch für die Deckschichten mit Straßenbaubitumen ermittelt. Letztlich wurde ein Mindestbindemittelgehalt von 6,0 M.-% für die Herstellung der Referenzdeckschichtmaterialien gemäß [ TL Asphalt-StB 07] festgelegt.

### 4.3 Ergebnisse der Laborversuche

Die materialspezifischen Kennwerte der einzelnen Asphaltdeck- und Asphalttragschichtvarianten für die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion wurden anhand von Multistage-Versuchen bei Prüftemperaturen von -10 °C, 5 °C und 20 °C sowie den Belastungsfrequenzen von 0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 5 Hz und 10 Hz ermittelt. Weiterhin waren für die Prognoserechnungen (siehe Abschnitt 5) die Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der verschiedenen Asphaltvarianten bei einer Temperatur von 20 °C und einer Belastungsfrequenz von 10 Hz erforderlich. Die Kryogenen Spannungen wurden wie zuvor beschrieben nicht prüftechnisch ermittelt, sondern berechnet. Die Ergebnisse der Einzelversuche zur Bestimmung der Masterfunktion und die Ergebnisse der Ermüdungsversuche können der Anlage 4.2 entnommen werden.

#### 4.3.1 Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen

Die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche zur Untersuchung des Steifigkeitsverhaltens der Asphalttrag- und Deckschichtgemische sind in Abb. 4-9 und Abb. 4-10 sowie Tab. 4-4 zusammengefasst. Die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen der Tragschichtgemische in Abb. 4-9 zeigen im mittleren und tiefen Temperaturbereich keinen signifikanten Einfluss der Gummimodifizierung. Die Gummimodifizierten Asphaltgemische weisen kaum einen geringeren Steifigkeitsmodul auf als die Referenzvariante mit Straßenbaubitumen auf. Der Einfluss der Gummimodifizierung zeigt sich allerdings deutlich bei tiefen Temperaturen. Während die Masterkurven der 10 % unterhalb und der 15 % Gummi-Variante sogar deutlich unterhalb der Referenzvariante verlaufen, kreuzt die 20 % Gummi-Variante die anderen Funktionen in diesem Temperaturbereich und weist einen signifikanten Anstieg der Steifigkeiten auf. Hinsichtlich der Deckschichtgemische ist in Abb. 4-10 erkennbar, dass die PmB- und Gummivarianten deutlich geringere Steifigkeiten als die Variante mit Straßenbaubitumen über den gesamten Temperaturbereich aufweisen. Auch hier ist auffällig, dass die Variante mit einem Gummianteil von 20 % im Gesamtbindemittel im Vergleich zu den anderen Varianten einen deutlichen Steifigkeitsanstieg im Tieftemperaturbereich aufzeigt.

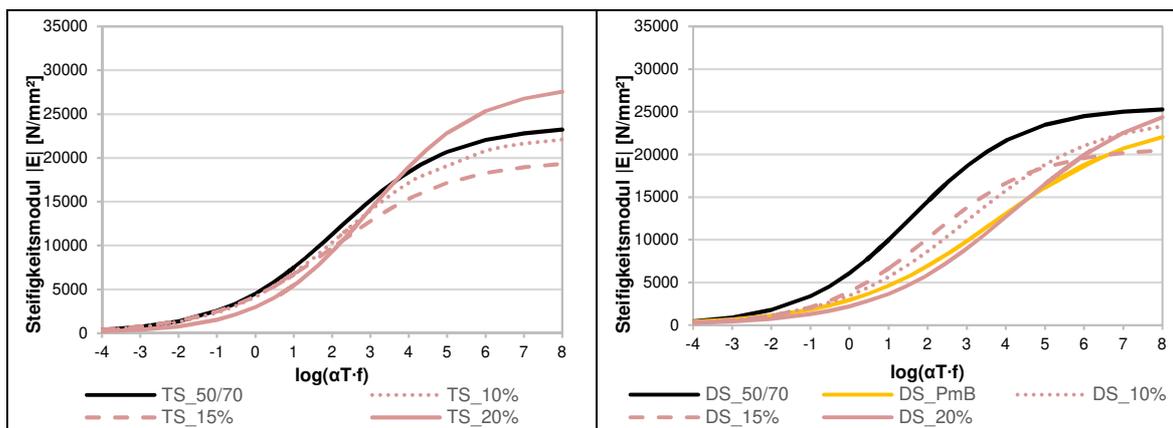


Abb. 4-9 Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für Tragschichtgemische

Abb. 4-10 Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für Deckschichtgemische

Material		$E_{min}$	$E_{max}$	$m$	$b_1$	$b_0$	$T_R$
		[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[°C]
Tragschichtgemische	50/70	0	23676	22674	-0,676	1,448	20
	10 %	0	22586	18918	-0,662	1,494	20
	15 %	0	19754	18422	-0,637	1,303	20
	20 %	0	28324	20523	-0,715	2,146	20
Deckschichtgemische	50/70	0	25531	18009	-0,718	1,161	20
	PmB	0	24278	32070	-0,535	1,986	20
	10 %	0	24470	25778	-0,601	1,806	20
	15 %	0	20761	22751	-0,717	1,475	20
	20 %	0	27130	30606	-0,576	2,435	20

Tab. 4-4 Parameter der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen

### 4.3.2 Ermüdungsfunktionen

Die Ermüdungsfunktionen der in die Untersuchungen einbezogenen Asphaltgemische sind in Abb. 4-11 und Abb. 4-12 gegenüber gestellt. Eine Zusammenfassung der Regressionsparameter erfolgt in Tab. 4-5. Das Tragschichtgemisch mit 15 % Gummianteil zeigt im Vergleich zu den anderen Gummivarianten vor allem bei kleineren elastischen Anfangsdehnungen eine deutlich bessere Ermüdungsbeständigkeit. Während die Funktionen der Referenzvariante mit Straßenbaubitumen und die 10 % Gummivariante quasi deckungsgleich verlaufen, führt die Gummimodifizierung mit 20 % zu einer geringeren ertragbaren Anzahl an Lastwechseln – also einem ungünstigerem Ermüdungsverhalten – als die Referenzvariante. Die Funktionen der Deckschichtgemische lassen auf keinen Zusammenhang zwischen Ermüdungsverhalten und Gummimodifizierung schließen. Die Ergebnisse zeigen nahezu keinen Unterschied hinsichtlich der ertragbaren Lastwechsel bis zur Ermüdungsrissbildung der Gemische mit 10, 15 und 20 % Gummianteil sowie der Referenzvariante mit Straßenbaubitumen. Lediglich die Deckschicht mit polymermodifiziertem Bindemittel zeigt im Vergleich zu den anderen Gemischen eine leicht größere Ermü-

dungsbeständigkeit über den gesamten Dehnungsbereich. Unabhängig davon, kann resümiert werden, dass der Einfluss des Bindemittels auf das Ermüdungsverhalten in den untersuchten Deckschichtgemischen kleiner ist als bei den Tragschichtgemischen.

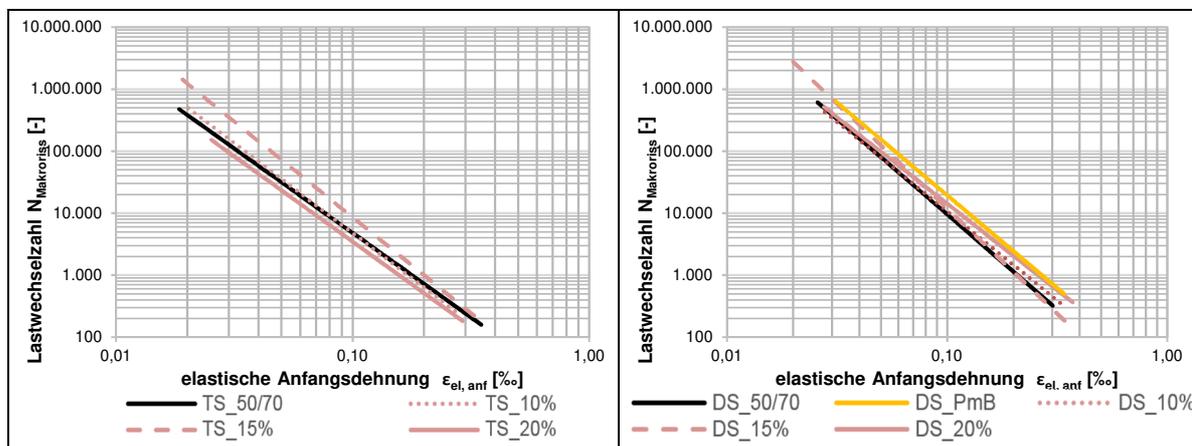


Abb. 4-11 Ermüdungsfunktionen für Tragschichtgemische

Abb. 4-12 Ermüdungsfunktionen für Deckschichtgemische

Material		Parameter (@ 20°C; 10 Hz)		Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>
		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	
Tragschichtgemische	50/70	9,057	-2,723	0,975
	10 %	5,950	-2,903	0,978
	15 %	6,912	-3,091	0,942
	20 %	6,142	-2,751	0,981
Deckschichtgemische	50/70	8,120	-3,071	0,945
	PmB	19,653	-2,994	0,964
	10 %	14,226	-2,878	0,943
	15 %	4,823	-3,389	0,975
	20 %	22,964	-2,792	0,971

Tab. 4-5 Parameter der Ermüdungsfunktionen

### 4.3.3 Kryogene Zugspannungen

Entsprechend den [RDO Asphalt 09] werden bei jedem zweiten Lastwechsel bei Temperaturen kleiner 5 °C auch kryogene Spannungen berücksichtigt. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden die kryogenen Spannungen mit Gleichung [WELLNER et al. 2013] berechnet. Die auftretenden kryogenen Spannungen in Abhängigkeit der Temperatur der untersuchten Asphaltgemische sind in Abb. 4-13 und Abb. 4-14 zusammengefasst. Die Reihung der Materialien ist für die Deck- und Tragschichtgemische gleich. Das günstigste Tieftemperaturverhalten mit den geringsten kryogenen Spannungen zeigen die 15 % Gummivarianten gefolgt von dem Mischgut mit 10 % Gummianteil im Bindemittel. Die 10 % Gummivariante und die Deckschicht mit PmB verhalten sich bei tiefen Temperaturen gleich. Größere kryogene Spannungen treten im Asphaltbeton mit Straßenbaubitumen auf. Das ungünstigste Materialverhalten hat jeweils die 20 % Gummivariante.

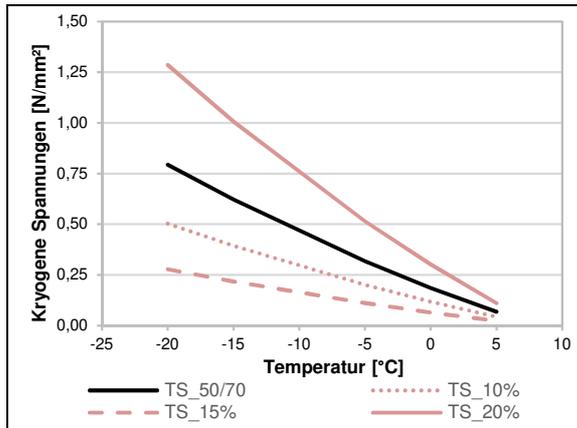


Abb. 4-13 Kryogene Zugspannungen für Tragschichtgemische

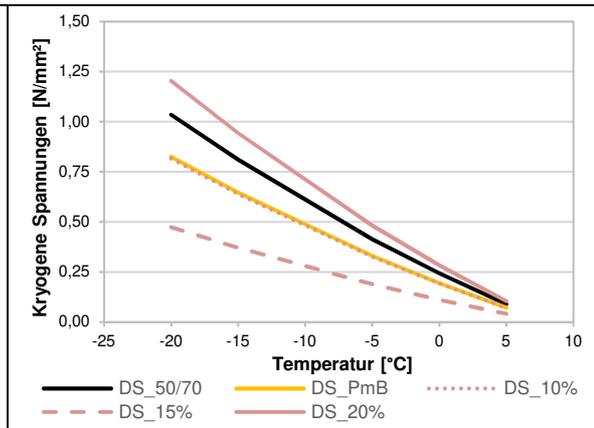


Abb. 4-14 Kryogene Zugspannungen für Deckschichtgemische

## 5 DIMENSIONIERUNGSBERECHNUNGEN

### 5.1 Allgemeines

Für die Asphaltbauweise ist mit den „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht – RDO Asphalt“ in Deutschland erstmals ein Regelwerk geschaffen worden, welches den Grundstein für eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Dimensionierung von Asphaltstraßenkonstruktionen legt. Diese Verfahrensweise ermöglicht es, die Dicken der einzelnen Konstruktionsschichten des Straßenoberbaus in Abhängigkeit von den unterschiedlichen mechanischen Kenngrößen der eingesetzten Asphaltgemische, der Verkehrsbelastung und den klimatischen Einflüssen zu dimensionieren. Die Ermittlung der für den Dimensionierungsprozess relevanten Materialeigenschaften wird in Kapitel 4 erläutert. Das Ziel der Dimensionierungsberechnungen ist es, Kenntnisse über die Auswirkungen der unterschiedlichen Gummianteile in den Asphaltmischgutsorten auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltbefestigungen zu erlangen und anhand von Nutzungsdauerprognosen einen optimalen Gummigehalt in den Asphaltdeck- und Tragschichtgemischen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird mit dem Verfahren der [ RDO Asphalt 09] die Nutzungsdauer von fiktiven Verkehrsflächenbefestigungen mit den untersuchten Asphaltmischgutsorten berechnet.

### 5.2 Annahmen für die Dimensionierungsberechnungen

Die Dimensionierungsberechnungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Asphaltgemische mit Gummimodifizierten Bindemitteln sowie der Referenzvarianten erfolgten an einem Konstruktionsaufbau einer Bk10 mit einer frostsicheren Dicke des Oberbaus von 80 cm:

- 4 cm Asphaltdeckschicht
- 22 cm Asphalttragschicht
- 54 cm Frostschutzschicht

Entsprechend der gewählten Eingangsparameter, zusammengefasst in Tab. 5-1, ergibt sich eine B-Zahl von 6,7 Mio. äquivalenten 10-t AÜ für eine Nutzungsdauer von 30 Jahren. Außerdem werden das dimensionierungsrelevante Aschlastkollektiv BAB Mischverkehr für anbaufreie Straße mit der Verbindungsfunktionsstufe II „überregional“ sowie die Temperaturzone 3 für das Gebiet des Freistaates Sachsen zum Ansatz gebracht.

Für die Dimensionierung wurden zwei Nachweispunkte gewählt (vgl. Abb. 5-1):

- 1. Nachweispunkt: Unterseite der Asphalttragschicht
- 2. Nachweispunkt: Oberseite der Asphaltdeckschicht

Der Nachweis an der Unterseite der Asphalttragschicht erfolgt in der Lasteinleitungsfläche unter Berücksichtigung der horizontalen Biegezugdehnungen. Zur Ermittlung des Ermü-

ungsstatus der einzelnen Tragschichtgemische nach einer geplanten Nutzungsdauer von 30 Jahren wurde stets die Deckschichtvariante mit polymermodifiziertem Bindemittel im Konstruktionsaufbau verwendet, um jegliche Einflüsse, die aus unterschiedlichen Beanspruchungen der Deckschicht durch abweichendes Steifigkeitsverhalten der eingesetzten Deckschichtmaterialien resultieren, auszuschließen. Analog wurde für die Ermittlung der Ermüdungstatus in den Deckschichtvarianten jeweils die Referenztragschicht mit Straßenbaubitumen eingesetzt. An der Oberseite der Asphaltdeckschicht erfolgt der Ermüdungsnachweis 165 mm neben der Lastachse, da an dieser Stelle die größten vertikalen Zugdehnungen auftreten [Kamratowsky et al. 2017]. Der Ermüdungsnachweis für die Deckschicht wird analog zu dem Verfahren der [ RDO Asphalt 09] für den Ermüdungsnachweis der Tragschicht geführt.

Kenngröße	Einheit	Eingangswert Befestigungsaufbau
Bundesstraße	[-]	RQ 11, EKL 3
DTV	[Kfz/24h]	8.000
SV-Anteil	[%]	5 ( $f_A = 4,0$ )
DTV <sup>SV</sup>	[Kfz/24h]	400 ( $p = 0,02$ )
Nutzungszeitraum	[a]	30
B-Zahl	[AÜ (10t)]	6.778.449
Belastungsklasse	[-]	Bk10
Achslastkollektiv	[-]	BAB Mischverkehr ( $q_{Bm} = 0,25$ )
Fahrstreifenanzahl	[-]	2 ( $f_1 = 0,5$ )
Fahrstreifenbreite	[m]	3,5 ( $f_2 = 1,10$ )
Höchstlängsneigung	[%]	2 bis unter 4 ( $f_3 = 1,02$ )
Frostempfindlichkeitsklasse	[-]	F3
Frosteinwirkungszone	[-]	Zone 3
Dicke des frostsicheren Oberbaus <sup>1)</sup>	[cm]	80
Dicke Asphaltdeckschicht	[cm]	4
Dicke Asphalttragschicht	[cm]	22
Dicke FSS	[cm]	54
FSS EV <sub>2</sub> -Wert	[N/mm <sup>2</sup> ]	120
Boden EV <sub>2</sub> -Wert	[N/mm <sup>2</sup> ]	45
Schichtenverbund <small>Asphaltschichten</small>	[%]	100
Schichtenverbund <small>ungebunden</small>	[%]	0

Tab. 5-1 Eingangsparemeter Dimensionierungsberechnungen

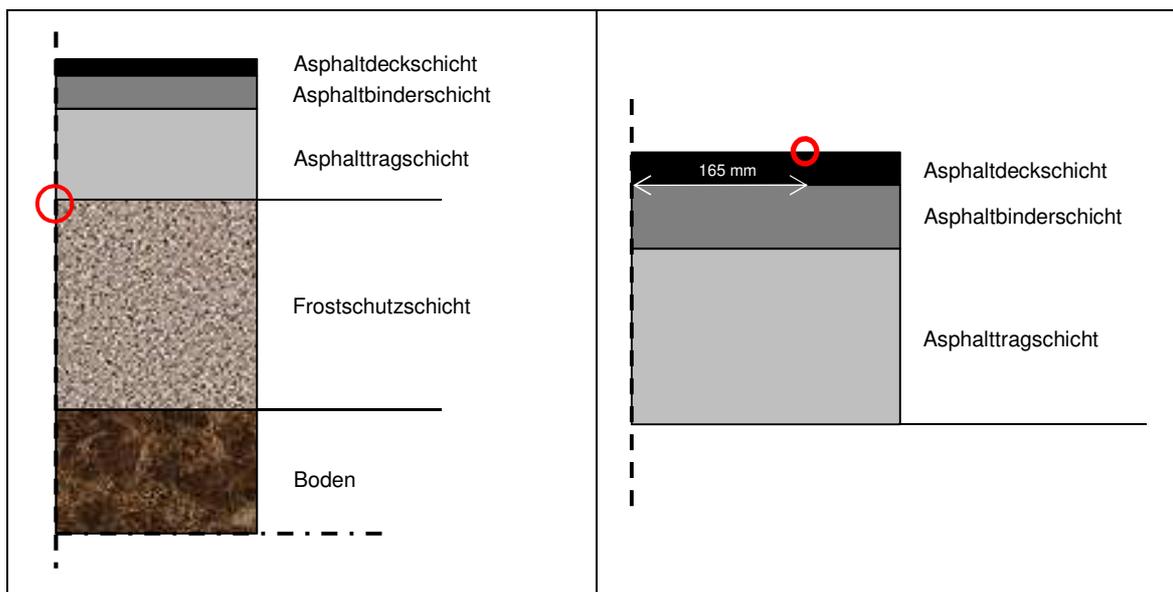


Abb. 5-1 Nachweispunkte zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens der Deck- und Tragschichtgemische

### 5.3 Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen

Die zuvorbeschriebenen relevanten Materialeigenschaften sowie die gewählten Belastungen aus Klima und Verkehr dienen als Eingangsparameter für die folgenden Dimensionierungsberechnungen. Die Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen für den Ermüdungsnachweis an der Unterseite der Asphaltbefestigungen sind in Abb. 5-2 zusammengefasst. Bei den Tragschichtgemischen zeigt sich ein sehr deutlicher Einfluss der Gummimodifizierung in Abhängigkeit von der Gummimenge. Während mit der Referenzvariante die Nutzungsdauer von 30 Jahren erzielt wird, erreicht die 15 % Gummi-Variante lediglich einen Ermüdungsstatus von 68 % zu diesem Zeitpunkt. Bei Verwendung einer Tragschicht mit 10 % Gummianteil im Bindemittel wird die angestrebte Nutzungsdauer unerschritten. Die 20 % Gummi-Tragschichtvariante erweist sich als ungeeignet mit einem enorm hohen Ermüdungsstatus und einem errechneten Ausfallzeitpunkt nach reichlich 10 Jahren. Wird nun der Ermüdungsstatus der Gummimodifizierten Tragschichtgemische über den Gummianteil aufgetragen, wie in Abb. 5-3 dargestellt, ergibt sich rechnerisch ein optimaler Gummigehalt von 13,5 % im Gesamtbindemittel. Ein vergleichbarer Trend zeigt sich auch bei den Deckschichtgemischen (vgl. Abb. 5-4). Die 15 % Gummi-Variante und die Referenzvariante mit PmB erreichen einen ähnlichen Ermüdungsstatus. Auch im Falle der Deckschichtgemische erweisen sich die 10 und 20%-Gummivarianten ungünstiger und weisen einen höheren Ermüdungsstatus im Vergleich zur 15%-Variante am Ende der avisierten Nutzungsdauer auf. Den geringsten Ermüdungsstatus erzielt die Deckschicht mit Straßenbaubitumen. Dies ist auf die deutlichen höheren Steifigkeiten zurückzuführen, welche zu geringeren elastischen Dehnungen in der Schicht führen bei kaum ungünstigerem Ermüdungsverhalten als bei den anderen Deckschichtgemischen. Aus Abb. 5-5 geht hervor, dass für die Deckschichtgemische der optimale Gummianteil im Bindemittel bei 14,3 % liegt.

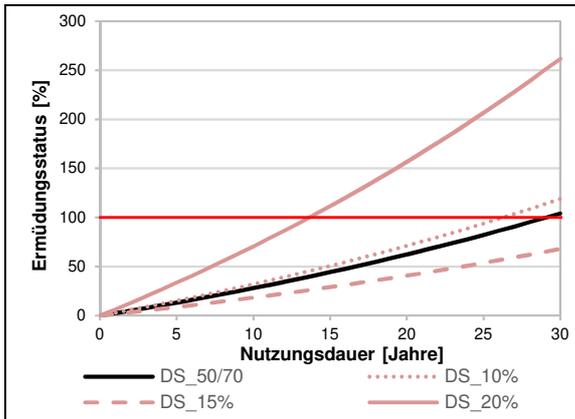


Abb. 5-2 Dimensionierungsergebnisse Tragschichtgemische, NWP Tragschicht

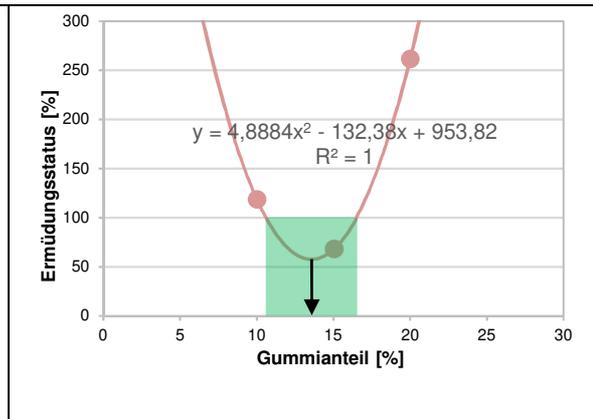


Abb. 5-3 Optimaler Bindemittelgehalt Tragschichtgemische

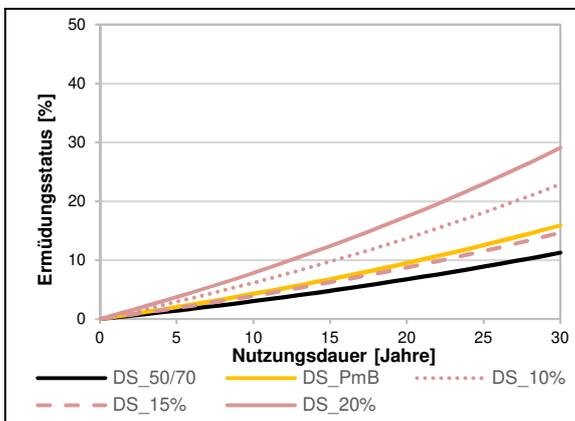


Abb. 5-4 Dimensionierungsergebnisse Deckschichtgemische, NWP Deckschicht

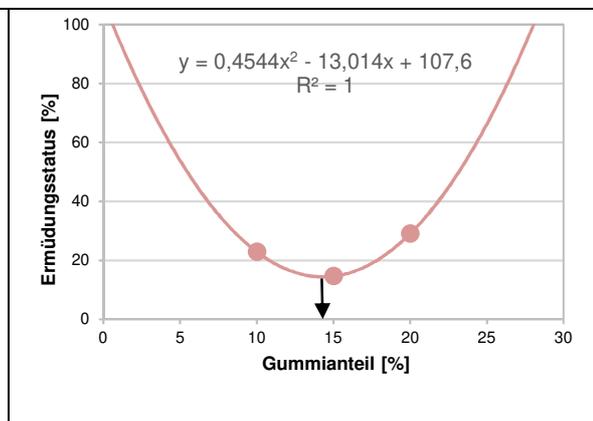


Abb. 5-5 Optimaler Bindemittelgehalt Deckschichtgemische

Letztlich erweisen sich die 15 % Gummi-Varianten sowohl für die Deck- als auch die Tragschichtgemische als beste hergestellte Varianten, da diese dem rechnerisch optimalen Bindemittelgehalten am nächsten kommen. Vergleicht man nun einen Konstruktionsaufbau mit diesen modifizierten Varianten mit einer Asphaltbefestigung aus herkömmlich verwendeten Materialien – Tragschicht mit Straßenbaubitumen und Deckschicht mit PmB – erreicht die modifizierte Befestigung einen Ermüdungsstatus von 62 % nach 30 Jahren und eine rechnerische Nutzungsdauer von über 40 Jahren, während mit den konventionellen Materialien ein Ermüdungsstatus von 100 % nach der angestrebten Nutzungsdauer erzielt wird (Abb. 5-6). Um auch mit dem gummimodifizierten Befestigungsaufbau den Ermüdungsstatus nach 30 Jahren zu erschöpfen, wäre eine Schichtdickenreduzierung von 2,5 cm notwendig. Werden im Zuge neuer Erhaltungsstrategien sehr langlebige Asphalttragschichten gefordert um die grundhafte Erneuerung einer Befestigung weit herauszuzögern, erweisen sich optimal Gummimodifizierte Tragschichten als wirtschaftliche Alternative: Aus Tab. 5-2 geht hervor, dass bei einer angestrebten Nutzungsdauer von 70 Jahren 4 cm weniger Tragschicht eingebaut werden könnten als bei einer unmodifizierten Referenzvariante. In der Praxis kann sowohl die Einsparung von Material durch

Schichtdickenreduzierung als auch die Verlängerung der Nutzungsdauer der Tragschicht von Interesse sein. Die Entscheidung, welche Strategie verfolgt wird, obliegt der ausschreibenden Straßenbaubehörde im Einklang mit dem avisierten Erhaltungsmangement. Es sei darauf verwiesen, dass die frostsichere Gesamtdicke des Oberbaus nicht reduziert werden darf. Wird die Dicke des Asphaltpakets reduziert, müssen die darunter liegenden ungebundenen Schichten entsprechend verstärkt werden.

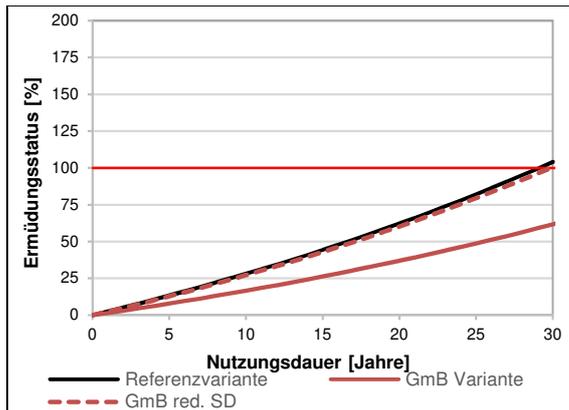


Abb. 5-6 Dimensionierungsergebnisse Deckschichtgemische, NWP Deckschicht

Kenngröße	Gummivariante	Referenzvariante
Material [-]	DS und TS jeweils mit 15% GmA	DS mit PmB, TS mit 50/70
Schichtdicken [cm]	4 cm DS, 27 cm TS, 49 cm FFS	4 cm DS, 31 cm TS, 45 cm FFS
Nutzungsdauer [Jahre]	72	71
Ermüdungsstatus nach 70 Jahren [%]	95,0	97,4

Tab. 5-2 Schichtdicken für langlebige Tragschichten

## 5.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Den Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt die Annahme zu Grunde, dass es keine Unterschiede hinsichtlich Personal- oder Maschinenbedarf gibt und die zeitlichen Abweichungen für die Herstellung und den Einbau von herkömmlichen und Gummimodifizierten Asphalten vernachlässigbar sind. Die Zusammensetzungen der Asphalte unterscheiden sich lediglich im Bindemittelgehalt, welcher insgesamt für die Gummimodifizierten Varianten höher ist, aber dennoch einen geringeren Bitumenanteil enthält, welcher wiederum durch die Modifizierung mit Gummi ergänzt wird. Weiterhin findet die mögliche Schichtdickenreduzierung für den Gummimodifizierten Aufbau bei der Ermittlung der Materialkosten für die Herstellung einer fiktiven Verkehrsbefestigung Berücksichtigung. Tab. 5-3 beinhaltet die Beispielrechnung. Unter Berücksichtigung der angegebenen Preise für die einzelnen Bindemittelvarianten ergibt sich keine Kosteneinsparung durch die Gummimodifizierung im Vergleich zu einen herkömmlichen Konstruktionsaufbau. Allerdings sind die Kosten für eine Gummimodifizierte Deckschicht bei gleicher Schichtdicke und vergleichbarem Ermüdungsstatus (vgl. Abb. 5-4) deutlich geringer als mit PmB.

Kosten GmB <sub>15%</sub> [€/t]	Kosten 50/70 [€/t]	Kosten PmB [€/t]
376	310	435
Kenngroße	Gummivariante	Referenzvariante
Material [-]	DS und TS jeweils mit 15% GmA	DS mit PmB, TS mit 50/70
Schichtdicken [cm]	4 cm DS, 19,5 cm TS	4 cm DS, 22 cm TS
Baulos	1 km Länge, 7,5 m Breite	
BM-Gehalt DS [M.-%]	6,6	6,0
BM-Gehalt TS [M.-%]	5,1	4,5
Anteil BM DS [t]	49,5	45,0
Anteil BM TS [t]	186,5	1858,6
Kosten BM [€]	88.736	77.111

Tab. 5-3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Mit den vorliegenden Daten können lediglich Aussagen zu den Material- bzw. Herstellungskosten getroffen werden. Darüberhinaus sind auch anfallenden Kosten für Instandsetzungs- und Erhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Zusätzlich ist die Verfügbarkeit des Straßennetzes von immenser Bedeutung für die monetäre Bewertung. Kürzere Intervalle zwischen Instandsetzungs- und Erhaltungsmaßnahmen führen zu nicht zu vernachlässigenden Nutzerausfallkosten durch Stauß und Behinderungen. Es ist daher von hohem volkswirtschaftlichen Interesse langlebige Verkehrsbefestigungen mit einem geringen Bedarf an baulichen Maßnahmen während der Nutzungsdauer herzustellen. Dementsprechend sind für eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung materialspezifische Schadensverläufe für die eingesetzten Mischgüter und gewählten Befestigungsaufbau zu berücksichtigen. Von Interesse sind dafür u.a. nutzungsdauerabhängige Funktionen zur Beschreibung des plastischen Verformungs- und Ermüdungsverhaltens sowie der Ebenheits- und Griffigkeitsentwicklung um technisch sinnvolle und wirtschaftlich effiziente Erhaltungskosten als Bewertungsgrundlage zu generieren. Der gesamte Bereich der monetären Bewertung von Asphaltstraßenbefestigungen bleibt im aktuell gültigen Regelwerk unberücksichtigt, obwohl die wirtschaftliche Bedeutung einer leistungsfähigen Infrastruktur bedeutend ist. Mit den vorliegenden Materialkennwertfunktionen und Kostensätzen ist eine gesamtwirtschaftliche Vergleichbarkeit mehrerer konkurrierender Asphaltbefestigungen im Rahmen des Projektes noch nicht möglich.

## 6 FAZIT

### 6.1 Empfehlungen für den Einsatz von gummimodifizierten Bindemitteln und deren Einsatz in Asphaltbefestigungen

Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt wurde der Einfluss der Gummimodifizierung auf die gebrauchungsverhaltenorientierten Materialeigenschaften von Bitumen und Asphaltgemischen untersucht. Außerdem wurden Erkenntnisse darüber erlangt, wie sich die unterschiedlichen Gummienteile in Asphaltmischgutsorten auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltbefestigungen auswirken und die optimalen Gummigehalte in den Asphaltdeck- und Tragschichtgemischen anhand von Nutzungsdauerprognosen ermittelt.

Zunächst erfolgten umfangreiche Bitumenuntersuchungen mit dem Ziel, gummimodifizierte Bitumen zu definieren, die in die weiteren Asphaltuntersuchungen einbezogen werden. Nach Auswahl der feinen Gummipartikel für die Asphaltuntersuchungen wurden Asphaltbetondeck- und Tragschichtgemische mit 10, 15 und 20% Gummizugabemenge im Bindemittel hergestellt. Mit Spaltzug-Schwellversuchen wurden anschließend die Materialsteifigkeit sowie das Ermüdungsverhalten untersucht. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse konnten weiterführende Dimensionierungs- und Prognoserechnungen unter Berücksichtigung der [ RDO Asphalt 09] durchgeführt werden, um die Nutzungsdauer und Schichtdicken verschiedener gummimodifizierter Asphaltbefestigungen zu ermitteln.

Anhand der untersuchten Gummimodifizierten Bindemittelvarianten hat sich gezeigt:

- Die Gummimodifizierung führt zu einer Erweiterung des Gebrauchstemperaturbereichs.
- Das Gummi-Bitumen-Gemisch mit einer Zugabemenge von 20 % der groben Körnung weist den größten Widerstand gegen plastische Verformungen bzw. Spurrinnenbildung auf.
- Das Gummi-Bitumen-Gemisch mit feinen Partikeln bei einer Zugabemenge von 15 % hat die beste Beständigkeit gegen Ermüdung.

Da in der Praxis aktuelle mehr Schäden durch Rissbildung in der gesamten Asphaltbefestigung als Spurrinnenentwicklung auftreten, wurde im projektbegleitenden Ausschuss entschieden, sowohl die Trag- als auch Deckschichtgemische mit den feinen Gummipartikeln zu modifizieren und die optimale Zugabemenge zu ermitteln.

Anhand der untersuchten Asphaltbetondeck- und Tragschichtgemische hat sich gezeigt:

- Die Gummimodifizierung führt zu einer Abnahme der Steifigkeiten (vor allem im Tief-temperaturbereich) sowie einer Zunahme der Ermüdungsresistenz.
- Ein optimaler Gummianteil im Bindemittel liegt knapp unter 15 M.-%. Zu hohe Zugabemengen können den positiven Modifizierungseffekt umkehren.

- Der Einfluss der Modifizierung hinsichtlich der Ermüdungsresistenz ist in Tragschichtgemischen größer als in Deckschichtgemischen.
- Durch den Einsatz von Gummimodifizierten Asphalten in Tragschichten ergibt sich die Möglichkeit der Verlängerung der Nutzungsdauer der Tragschicht bei gleicher Schichtdicke im Vergleich zu herkömmlichen Asphalttragschichtmaterialien. Alternativ kann auch die Schichtdicke der Gummimodifizierten Tragschicht reduziert werden, wenn eine bestimmte Nutzungsdauer avisiert wird.

Die Autoren gehen davon aus, dass unterschiedliche Gummiprodukte hinsichtlich der optimalen Zugabemenge und des Gebrauchsverhaltens allgemein variieren. Es wird empfohlen, die vorgestellten Untersuchungen zur Optimierung des Modifizierungseffektes vor dem Einsatz der Gemische in Straßenbefestigungen durchzuführen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen hinsichtlich der Material- bzw. Herstellkosten haben ergeben, dass sich zunächst keine Einsparung durch die Gummimodifizierung im Vergleich zu einem herkömmlichen Konstruktionsaufbau ergeben. Allerdings sind die Kosten für eine Gummimodifizierte Deckschicht bei gleicher Schichtdicke und vergleichbarem Ermüdungsstatus deutlich geringer als bei PmB. Durch eine ganzheitliche Betrachtung aller Kosten, d. h. die Einbeziehung der Herstellungs- und Erhaltungsaufwendungen unter Berücksichtigung entsprechender rechnerischer Verfahren zur Schadensentwicklung, wird der gesamte Lebenszyklus betrachtet und somit eine wesentlich praxisnähere Wirtschaftlichkeitsbewertung ermöglicht. Mit den vorliegenden Materielkennwertfunktionen und Kostensätzen ist eine gesamtwirtschaftliche Vergleichbarkeit mehrerer konkurrierender Asphaltbefestigungen noch nicht möglich.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die gebrauchungsverhaltenorientierten Eigenschaften von Bitumen und die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltbefestigungen durch den Einsatz Gummimodifizierter Bindemittel positiv beeinflusst werden können. Diese Erkenntnis bietet vor allem Potenzial, wenn Bauvorhaben auf Grundlage der [ RDO Asphalt 09] ausgeschrieben werden, da in diesem Fall nur Anforderungen an die zuerreichende Nutzungsdauer gestellt werden, insofern die ausschreibende Behörde keine weiteren Vertragsbedingungen festlegt.

## 6.2 Ausblick

Nachdem gezeigt wurde wie die Ermüdungsbeständigkeit von Gummimodifizierten Asphalttragschichtgemischen verbessert werden kann, sollte in weiterführenden Untersuchungen auch das plastische Verformungsverhalten sowie die Recyclingfähigkeit im Fokus stehen. Darüberhinaus wäre es für Deckschichtgemische von Interesse zu prüfen in wie fern der Modifizierungseffekt mit einer anderen Mischgutart erhöht werden kann. Speziell im Autobahnbereich wurden bereits Gummimodifizierte Offenporige Asphalte sehr erfolgreich eingesetzt. Die Untersuchungstrecken im Freistaat Sachsen haben zusätzlich die Eignung von Gummimodifiziertem SMA unter Beweis gestellt. Neben der Berücksichtigung anderer Mischgutarten sollten auch die Auswirkungen der Gummimodifizierung auf das plastische Verformungsverhalten untersucht werden.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1	Projektstruktur	8
Abb. 3-1	Mixvorrichtung im Labor	12
Abb. 3-2	Gummi-Bitumen-Gemisch während des Mischvorgangs	12
Abb. 3-3	Änderung von Nadelpenetrationswert und Erweichungspunkt Ring und Kugel in Abhängigkeit der Mischzeit	13
Abb. 3-4	Änderung von komplexen Schermodul und Phasenwinkel Ring und Kugel in Abhängigkeit der Mischzeit	13
Abb. 3-5	Einfluss von Sasobit und Vestenamer auf den Gummi-Bitumen-Mischvorgang unter Verwendung der feinen Gummipartikel	14
Abb. 3-6	Einfluss von Sasobit und Vestenamer auf den Gummi-Bitumen-Mischvorgang unter Verwendung der groben Gummipartikel	14
Abb. 3-7	Ergebnisse der Prüfung des Erweichungspunktes Ring und Kugel	15
Abb. 3-8	Ergebnisse der Prüfung der Nadelpenetration	15
Abb. 3-9	Ergebnisse der Prüfung der elastischen Rückstellung	16
Abb. 3-10	Ergebnisse der Prüfung des Brechpunktes nach Fraaß	16
Abb. 3-11	Ergebnisse des DSR T-Sweep für den komplexer Schermodul	17
Abb. 3-12	Ergebnisse des DSR T-Sweep für den Phasenwinkel	17
Abb. 3-13	Darstellung der Ergebnisse im Black-Diagramm	17
Abb. 3-14	Darstellung der Ergebnisse im Cole-Cole-Diagramm	17
Abb. 3-15	Ergebnisse der MSCR-Prüfung für die durchschnittliche prozentuale Rückformung	19
Abb. 3-16	Ergebnisse der MSCR-Prüfung für den nicht rückformbaren Bereich	19
Abb. 3-17	Ermüdungsfunktionen der Grundbitumen und der 15%-Gummivarianten	20
Abb. 3-18	Ermüdungsfunktionen des Grundbitumen und der feinen Gummipartikel	20
Abb. 3-19	SHRP-Kriterium $G^*/\sin(\delta)$ für den Verformungswiderstand	22
Abb. 3-20	SHRP-Kriterium $G^* \cdot \sin(\delta)$ für den Ermüdungswiderstand	22
Abb. 4-1	Gewählte Sieblinie der Asphalttragschichtgemische	24
Abb. 4-2	Gewählte Sieblinie der Asphaltdeckschichtgemische	24
Abb. 4-3	Ermittelte Bindemittelgehalte der Asphalttragschichtgemische	24
Abb. 4-4	Ermittelte Bindemittelgehalte der Asphaltdeckschichtgemische	24
Abb. 4-5	Versuchsaufbau Spaltzug-Schwellversuch	26
Abb. 4-6	Horizontaler und vertikaler Spannungszustand im Spaltzug-Schwellversuch [OESER et al.2005]	26
Abb. 4-7	Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen mit Variation der Tragschichtgemische, NWP Tragschicht	31

Abb. 4-8	Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen mit Variation der Deckschichtgemische, NWP Deckschicht	31
Abb. 4-9	Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für Tragschichtgemische	33
Abb. 4-10	Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen für Deckschichtgemische	33
Abb. 4-11	Ermüdungsfunktionen für Tragschichtgemische	34
Abb. 4-12	Ermüdungsfunktionen für Deckschichtgemische	34
Abb. 4-13	Kryogene Zugspannungen für Tragschichtgemische	35
Abb. 4-14	Kryogene Zugspannungen für Deckschichtgemische	35
Abb. 5-1	Nachweispunkte zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens der Deck- und Tragschichtgemische	38
Abb. 5-2	Dimensionierungsergebnisse Tragschichtgemische, NWP Tragchicht	39
Abb. 5-3	Optimaler Bindemittelgehalt Tragschichtgemische	39
Abb. 5-4	Dimensionierungsergebnisse Deckschichtgemische, NWP Deckschicht	39
Abb. 5-5	Optimaler Bindemittelgehalt Deckschichtgemische	39
Abb. 5-6	Dimensionierungsergebnisse Deckschichtgemische, NWP Deckschicht	40

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 5-1	Übersicht Mischgutvarianten	24
Tab. 5-2	Probekörperabmessungen die Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche nach den technischer Prüfvorschriften [ TP Asphalt-StB Teil 24] und [ TP Asphalt-StB Teil 26A]	25
Tab. 5-3	Prüfbedingungen SZSV	27
Tab. 5-4	Parameter der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen	33
Tab. 5-5	Parameter der Ermüdungsfunktionen	34
Tab. 6-1	Eingangsparameter Dimensionierungsberechnungen	37
Tab. 6-2	Schichtdicken für langlebige Tragschichten	40
Tab. 6-3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	41

## LITERATURVERZEICHNIS

[ **AL DSR-Prüfung T-Sweep 14**]. FGSV-Nr. : 722 "Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung im Temperatursweep". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, 2014.

[ **AL MSCR-Prüfung 12**]. FGSV-Nr. : 723 "Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)". Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, FGSV verlag, Köln, 2012.

[ **AL Sp-Asphalt 09**]. FGSV-Nr. : 430 "Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, 2009.

[ **DIN EN 12593**]. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß : Deutsche Fassung EN 12593:2015. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2015.

[ **DIN EN 13398**]. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen : Deutsche Fassung EN 13398:2010 . DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2010.

[ **DIN EN 1426**]. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration : Deutsche Fassung EN 1426:2015. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2015.

[ **DIN EN 1427**]. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren : Deutsche Fassung EN 1427:2015. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2015.

[ **E GmBA**]. FGSV-Nr. : 724 "Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, 2012.

[ **RDO Asphalt 09**]. FGSV-Nr. : 498 "Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, 2009.

[ **RSO Asphalt 14 E**]. Entwurf Stand : November 2014 "Richtlinien zur Beurteilung der strukturellen Substanz des Oberbaus von verkehrsflächen in Asphaltbauweise". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, 2014.

[ **RStO 12**]. FGSV-Nr. : 499 "Richtlinien für die Standartisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, 2012.

[ **TL Asphalt-StB 07**]. FGSV-Nr. : 797 "Technische Lieferbedingung für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen" Aushabe2007/Fassung 2013. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, 2007.

[ **TP Asphalt-StB Teil 24**]. Entwurf Stand : September 2016 "Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 24: Spaltzug-Schwellversuch - Beständigkeit gegen Ermüdung". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, 2016.

[ **TP Asphalt-StB Teil 26A**]. Entwurf Stand : September 2016 "Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 26 A: Spaltzug-Schwellversuch - Bestimmung der Steifigkeit". Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, 2016.

**[Airey 2002].** Airey, G. D. : "Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data". Road Materials and Pavement Design, Volume 3, Issue 4 - 2002, Published online 19 Sep 2011 <https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689933>.

**[CHEOVITS et al. 1982].** Cheovits, JG; Dunning, RL; Morris, GR. : "Characteristics of asphalt-rubber by the slide plate microviscometer" . Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 51, p. 240-61, 1982.

**[DRAGON 2015].** Dragon, I. : "Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf die Ermüdungsbeständigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt". Dissertation, Technische Universität Dresden, 2015.

**[DRAGON et al. 2011].** Wellner, F.; Dragon, I. : "Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf ihre primären Gebrauchseigenschaften" vom BMWI über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördertes Forschungsvorhaben Nr. 15624 BR/1, Schlussbericht, Technische Universität Dresden, 2001.

**[Evonik].** Website der Evonik Resource Efficiency GmbH : "VESTENAMER® Kautschuk mit einzigartigen Eigenschaften". Datenblatt, online veröffentlicht <http://www.vestenamer.com/sites/lists/RE/DocumentsHP/VESTENAMER%20-8012-DE.pdf> (09.04.2018).

**[HAGNER 2003].** Hagner, T. : "Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischen Scherrheometer". Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2003.

**[HAGNER 2013].** Hagner, T. : "Verfahren zur Festlegung geeigneter Beanspruchungen im Dynamischen Scherrheometer (DSR)". EUROBITUME: bitumenmagazin.de/lit1/viewfile.php?id=1956&name= Bitumen%202013%201956.pdf, 2013.

**[HEITZMANN 1992].** Heitzmann, M. : "Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier". Transportation research record 1339, 1992.

**[HOPMAN et al. 1989].** Hopman, P., P. Kunst, P. & Pronk, A. : "A Renewed Interpretation Model for Fatigue Measurement, Verification of Miner's Rule". 4th Eurobitume Symposium, Vol. 1 pp. 557-561, Madrid, Spain, 1989.

**[Kamratowsky et al. 2017].** Kamratowsky, E.; Wellner; F. : "Entwicklung von Asphalten für zukünftige schwerste Verkehrsbelastungen". 4. Dresdner Asphalttage, Dresden, Deutschland, 2017.

**[LO PRESTI 2013].** Lo Presti, D. : "Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review". Construction and Building Materials, Vol. 49, S. 863-881, 2013.

**[NEUTAG 2015].** Neutag, L. : "Entwicklung eines Optimierungssystems zur Konzeption von Asphaltmischungen für besondere Anwendungen unter Verwendung von recycelten Altreifen". Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2015.

**[OESER et al.2005].** Oeser, M.; Möller, B.; Werkmeister, S.; Wellner F. : "Numerical Simulation of Laboratory Tests on Asphalt - Comparison of the Direct Tensile and the Indirect Tensile Test". Transportation Research Board, 84th Annual Meeting, Washington D.C, USA, 2005.

**[Sasol].** Website Sasol Wax GmbH : "Sasobit®- bewährte Qualität für höchste Ansprüche". Datenblatt, online veröffentlicht [http://www.sasobit.de/files/downloads/de/sasobit/Produktinformationsbroschre\\_DE.pdf](http://www.sasobit.de/files/downloads/de/sasobit/Produktinformationsbroschre_DE.pdf) (09.04.2018).

**[WELLNER & RADENBERG 2013].** Wellner, F.; Ascher, D.; Radenberg, M.; Cetinkaya, R. : s.n.

**[WELLNER et al. 2007].** Wellner, F.; Leutner, R.; Oeser, M.; Weise, C.; Jähmig, J.; Lorenzl, H.; Schindler, K.; Mollenhauer, K.; Nolle, B.; Zander, U.; Rabe, R. : "Nachhaltiger Straßenbau – Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit

kleiner und mittelständiger Straßenbauunternehmen. Schlussbreicht, bergisch-Gladbach, 2007.

**[WELLNER et al. 2013]**. Wellner, F.; Ascher, D.; Radenberg, M.; Cetinkaya, R. : "Bestimmung des Alterungsverhaltens von Asphaltgemischen als Grundlage für die Dimensionierung und Prognose des Lebensdauer und Schadensentstehung". Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1091, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 2013.

**[ZEIBLER 2015]**. Zeißler, A. : "Untersuchungen zum spannungsabhängigen Materialverhalten von Asphalt". Dissertation, Technische Universität Dresden, 2015.

## **ANLAGENVERZEICHNIS**

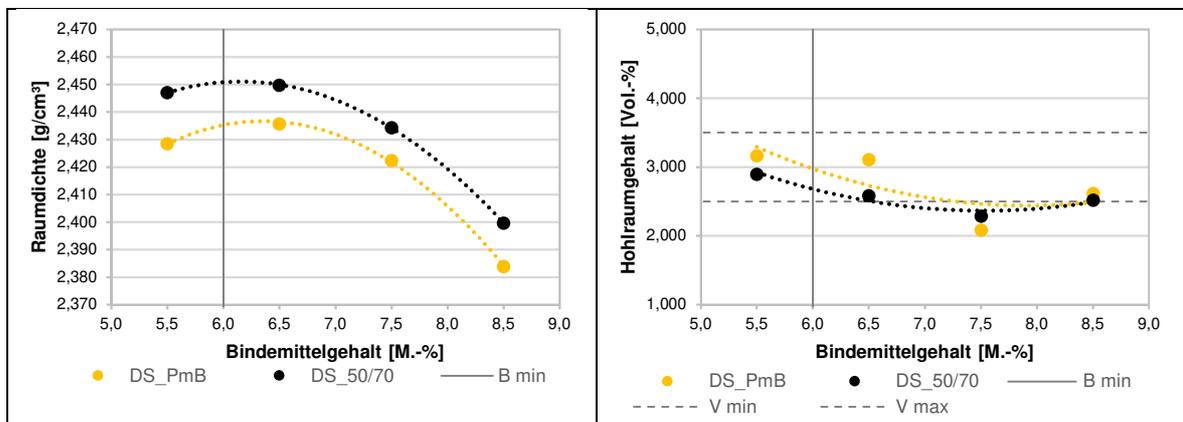
Anlage 1      GVO-Asphaltkonzeption

**Anlage 1 GVO-Asphaltkonzeption - Volumetrische Kennwerte**

**Volumetrische Kennwerte**

- Deckschicht: AC 11 D S
- Referenz-BM: PmB 25/55 – 55 und 50/70
- BM-Gehalte: 4,5; 5,5; 6,5 und 7,5 M.-%
- DS mit 7,5 M.-% wurde nicht mit SZSV geprüft

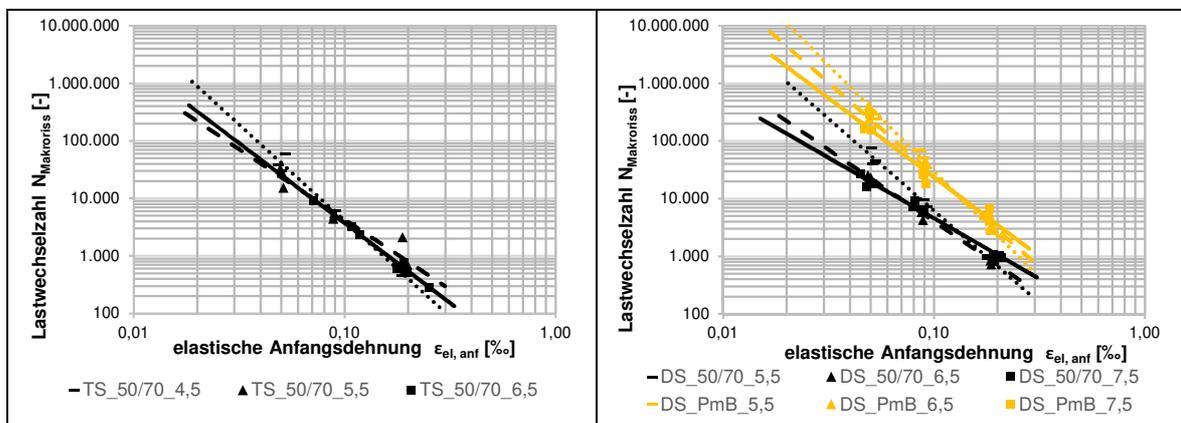
Name		DS_PmB 25/55-55			
BM-Gehalt	[M.-%]	5,5	6,5	7,5	8,5
Rohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,508	2,514	2,474	2,448
Raumdicke	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,429	2,436	2,422	2,384
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	3,165	3,112	2,085	2,618
VFB	[Vol.-%]	80,534	83,300	89,519	88,356
Name		DS_50/70			
BM-Gehalt	[M.-%]	5,5	6,5	7,5	8,5
Rohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,520	2,515	2,491	2,462
Raumdicke	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,447	2,450	2,434	2,400
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	2,897	2,585	2,288	2,519
VFB	[Vol.-%]	81,999	85,796	88,667	88,814





Anlage 1

Material		$E_{min}$	$E_{max}$	$m$	$b_1$	$b_0$	$T_R$
		[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[°C]
Tragschicht-gemische	50/70_4,5	0	31006	19213	-0,804	1,244	20
	50/70_5,5	0	40619	19348	-0,563	1,358	20
	50/70_6,5	0	34522	26834	-0,638	1,966	20
Deckschicht-gemische	50/70_5,5	0	34930	26409	-0,592	1,559	20
	50/70_6,5	0	31010	24831	-0,719	2,016	20
	50/70_7,5	0	26983	25105	-0,778	2,341	20
	PmB_5,5	0	33053	22772	-0,581	1,653	20
	PmB_6,5	0	29085	23162	-0,633	1,801	20
	PmB_7,5	0	25792	23306	-0,714	2,244	20



Material		Parameter (@ 20°C; 10 Hz)		Bestimmtheitsmaß
		$a_1$	$a_2$	$R^2$
Tragschicht-gemische	50/70_4,5	1,854	-3,341	0,981
	50/70_5,5	15,637	-2,439	0,923
	50/70_6,5	6,230	-2,775	0,989
Deckschicht-gemische	50/70_5,5	3,929	-3,195	0,990
	50/70_6,5	12,820	-2,495	0,992
	50/70_7,5	36,081	-2,102	0,986
	PmB_5,5	6,260	-3,676	0,911
	PmB_6,5	16,600	-3,194	0,975
	PmB_7,5	42,225	-2,745	0,957

### Eingangsgrößen für die Dimensionierungsrechnungen

Kenngroße	Einheit	Eingangswert Befestigungsaufbau
DTV	[Kfz/24h]	2.000
DTV <sup>SV</sup>	[Kfz/24h]	100
Nutzungszeitraum	[a]	30
B-Zahl	[AÜ (10t)]	1.389.872
Belastungsklasse	[-]	Bk1,0
Straßenklasse	[-]	Landes- und Kreisstraße
Achslasthäufigkeitsverteilung	[-]	BAB Mischverkehr
Fahrstreifenanzahl	[-]	2
Fahrstreifenbreite	[m]	2,75 bis 3,25
Höchstlängsneigung	[%]	2 bis unter 4
Frostempfindlichkeitsklasse	[-]	F3
Frosteinwirkungszone	[-]	Zone 3
Dicke des frostsicheren Oberbaus <sup>1)</sup>	[cm]	75
Dicke Asphaltdeckschicht	[cm]	4
Dicke Asphalttragschicht	[cm]	14
Dicke FSS	[cm]	57
FSS EV <sub>2</sub> -Wert	[N/mm <sup>2</sup> ]	120
Planum EV <sub>2</sub> -Wert	[N/mm <sup>2</sup> ]	45
SV Asphalt-schichten	[%]	100
SV ungebunden	[%]	0

<sup>1)</sup> Frosteinwirkungszone: III  
 Keine besonderen Klimaeinflüsse  
 Kein Grund- und Schichtenwasser bis in eine Tiefe von 1,5 m unter Planum  
 Geländehöhe bis Damm <= 2,0 m  
 Entwässerung der Fahrbahn und Randbereiche über Mulden, Gräben bzw. Böschungen

### Dimensionierungsrechnungen

Variante		Soll-BM M.-%	Ist-BM M.-%	Ermüdungsstatus nach 30 Jahren	NWP	
TS	50/70	4,5	4,62	88,40%	ATS	DS 5,5
		5,5	5,64	74,10%		
		6,5	6,64	249,10%		
DS	50/70	5,5	5,61	18,50%	ADS	TS 5,5
		6,5	6,5	51,30%		
		7,5	7,47	64,60%		
	PmB	5,5	5,69	3,90%		
		6,5	6,62	6,50%		
		7,5	7,53	11,60%		