

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18472 BR

## Thema

Entwicklung von Asphalten für zukünftige schwerste Verkehrsbelastungen

## Berichtszeitraum

01. Januar 2016 bis 30. Juni 2018

## Forschungsvereinigung

Deutsches Asphaltinstitut e. V. (DAI)

## Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau

Dresden, September 2018

---

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmüt Wellner

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

## **Inhaltsverzeichnis**

**I. Projektdarstellung und Sachbericht**

**II. Schlussbericht der Forschungsstelle TU Dresden**

# I Projektdarstellung und Sachbericht

## Inhaltsverzeichnis

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Einleitung und Zielstellung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2.</b> | <b>Arbeitspakete und Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und erreichte Ziele</b>  | <b>2</b>  |
| <b>3.</b> | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>52</b> |
| <b>4.</b> | <b>Sachbericht</b>  | <b>55</b> |
| 4.1       | Personaleinsatz und Angemessenheit der Arbeit   | 55        |
| 4.2       | Leistungen Dritter  | 56        |
| 4.3       | Darstellung des wissenschaftlichen-technischen Nutzens und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten | 56        |
| 4.3.1     | Wissenschaftlich-technischer Nutzen   | 56        |
| 4.3.2     | Wirtschaftlicher Nutzen   | 57        |
| 4.4       | Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft   | 58        |
| 4.4.1     | Beschreibung der bereits durchgeführten Transfermaßnahmen   | 58        |
| 4.4.2     | Beschreibung der geplanten Transfermaßnahmen  | 59        |
| 4.5       | Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzept  | 59        |

## 1 Einleitung und Zielstellung

Die Beanspruchung der Straßenbefestigungen in Deutschland wird aufgrund der Verkehrsentwicklung in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Die prognostizierte Steigerung des Schwerverkehrsanteils im Bundesfernstraßennetz, die Erhöhung der Achslasten, die Nutzung von Super-Singlereifen mit hohen Reifeninnendrücken stellen immer höhere Anforderungen an die Straßenbaustoffe und somit deren optimierte Zusammensetzung zu leistungsfähigen Baustoffgemischen hinsichtlich ihrer Gebrauchseigenschaften. In Deutschland werden Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt dagegen größtenteils auf der Grundlage empirisch gewonnener Erkenntnisse dimensioniert und ausgeführt. Die Festlegung der Dicken der gebundenen und ungebundenen Schichten von Straßenbefestigungen erfolgt unter Anwendung der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen [RStO 2012]. Des Weiteren wird das Gebrauchsverhalten der Baustoffgemische dieser Schichten indirekt über ihre Zusammensetzung und einige wenige leistungsbezogene Prüfverfahren beschrieben.

Um die noch vorhandenen Ressourcen effizienter nutzen und ein weitgehend sicheres und dauerhaftes Verkehrsnetz bieten zu können, ist es von großer Bedeutung die einzelnen Befestigungsschichten von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt ihrer Beanspruchung entsprechend zu konzipieren. Dies ist jedoch insbesondere bei Asphaltdeckschichtgemischen eine Optimierungsaufgabe. Geeignete Werkzeuge für die die Prognose der strukturellen Substanz auf der Grundlage materialtechnischer und stochastisch abgesicherter Kennwerte stellen die Verfahren der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten [RDO 2009] und die Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise [RSO Entwurf 2018], letztere jedoch nur für Asphalttragschichten, dar. In einer Weiterentwicklung an der Professur für Straßenbau der TU Dresden konnten diese Verfahren sowohl für die Anwendung in den Schichten der Asphaltdecke angepasst als auch ein Verfahren zur Prognose der Spurrinnenentwicklung in allen Asphaltsschichten entwickelt werden [Dragon 2015].

Hauptziel des Forschungsvorhabens ist es, über die Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzungen von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtgemischen auf deren Gebrauchseigenschaften eine Herangehensweise für die Asphaltkonzeption von diesen Gemischen für zukünftige schwerste Verkehrsbelastung unter Verwendung von gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfverfahren zu entwickeln. Somit sollen Asphaltgemische entworfen werden, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anforderungen optimiert sind.

## **2 Arbeitspakete und Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und erreichte Ziele**

### **Arbeitspaket 1: Materialbeschaffung, Vorbereitung der Materialien, Wahl der Mischgutzusammensetzung**

In die Untersuchungen wurden als Asphaltdeckschichtgemische ein Splittmastixasphalt mit einem Größtkorn von 11 mm (SMA 11 S) unter zweifacher Variation der Korngrößenverteilung sowie als Asphaltbindergemische ein stetig gestufter Asphaltbeton (AC 16 B S SG) und ein Bindergemisch nach dem Splittmastixprinzip (SMA 16 B S) mit jeweils einem Größtkorn von 16 mm einbezogen. Bevor die Zusammensetzungen der verschiedenen Asphaltgemische endgültig festgelegt werden konnte, erfolgten die Untersuchungen der verwendeten Gesteine auf ihre Korngrößenverteilung, die Rohdichten, die Kornform und des PSV-Wertes, sowie die Ermittlung der Bindemittelkennwerte der verwendeten Polymermodifizierten Bitumen.

Als Gesteinsmaterial für die unterschiedlichen Gesteinskörnungen wird Grauwacke verwendet, welche im sächsischen Raum abgebaut wird. Die benötigten Proben für die verschiedenen Untersuchungen wurden direkt am Asphaltmischwerk in Dresden entnommen. An diesem Asphaltmischwerk in Dresden erfolgte ebenfalls die Herstellung der Asphaltmischgüter. Die verwendeten Gesteinskörnungen erfüllen die Anforderungen der TL-Gestein-StB 07 und sind somit für den Einsatz im Straßenbau zulässig. Die Ergebnisse der Gesteinsprüfungen sind in Anlage 1 dargestellt.

In die Untersuchungen kamen zwei polymermodifizierte Bitumensorten zum Einsatz. Die Proben für die Bitumenuntersuchungen stellte das Asphaltmischwerk in Dresden bereit. Die Bindemittelkennwerte der zu verwendeten Bitumen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Beide Bitumensorten entsprechen den Anforderungen der TL-Bitumen-StB 07 und sind somit für den Einsatz im Straßenbau zulässig. Des Weiteren wurden die rheologischen Kennwerte des Absolutwertes des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels der Bitumen mit dem Dynamic Shear-Rheometer (DSR) ermittelt. Der Versuch wurde als Temperatur-Frequenz-Sweep durchgeführt. Der untersuchte Temperaturbereich liegt zwischen 70°C und -5°C, wobei die Änderung der Temperatur zwischen den einzelnen Messungen 10K beträgt. Bei den durchgeführten DSR Versuchen betrug der Probendurchmesser 25 mm und die Probenhöhe 2 mm in dem Temperaturbereich vom 30°C bis 70°C. Aufgrund der hohen Bindemittelsteifigkeiten wurden die Versuche im Temperaturbereich von 40°C bis -5°C an Proben mit einem geringeren Durchmesser von 8 mm und einer Höhe von 1 mm durchgeführt. Bei dem Versuch wird die Frequenz je untersuchte Temperatur erhöht. Die Startfrequenz beträgt 1 rad/s (0,16 Hz) und wird bis zu einer Frequenz von 100 rad/s (15,92 Hz) erhöht. Aus den Ergebnissen der DSR Versuche werden die Hauptkurven der Bitumen bestimmt (Abbildung 1).

| Bindemittelkennwert                  | 25/55-55A | 10/40-65A |
|--------------------------------------|-----------|-----------|
| Nadelpenetration bei 25°C [1/10 mm]  | 41        | 20        |
| Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C] | 60,4      | 70,8      |
| Brechpunkt nach Fraaß [°C]           | -14       | -10       |
| Elastische Rückstellung              | 55        | 58        |

Tab. 1: Bindemittelkennwerte der Bitumen

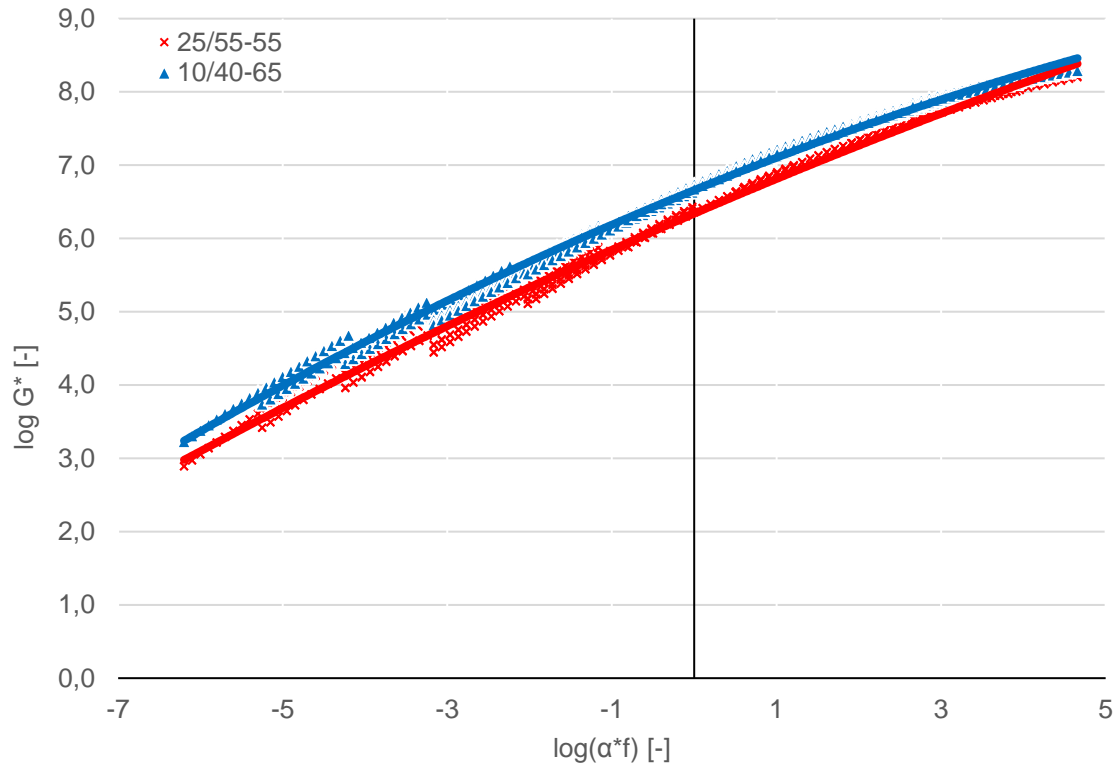


Abb. 1: Hauptkurven der untersuchten Bitumen

Nach den Untersuchungen an den Ausgangsstoffen der Asphaltgemische wurde deren endgültige Zusammensetzung festgelegt. Dabei soll die Korngrößenverteilung der Deck- und Binderschichten zweifach und der Bindemittelgehalt je Korngrößenverteilung mindestens vierfach variiert werden. Des Weiteren wird bei jeweils einer Deck- und Binderschicht die Bitumensorte variiert. Damit der Einfluss der Korngrößenverteilung der Asphaltgemische auf die Materialeigenschaften bestimmt werden kann, müssen die Sieblinien der einzelnen Deck- und Binderschichtgemische möglichst weit auseinander liegen. Somit wurde für die Variation der Korngrößenverteilung (KGV) des SMA 11 S die obere (feine KGV) und die untere (grobe KGV) Grenzsieblinie der TL Asphalt-StB verwendet. Die Korngrößenverteilung der Binderschichtgemische wurde nach dem gleichen Prinzip variiert. Somit wurde für den AC 16 B S SG die obere (feine KGV) und für den SMA 16 B S die untere (grobe KGV) nach den Vorlagen Hinweise für die Planung und Ausführung von alternativen Asphaltbindergemische (H AI ABi) als Sieblinie verwendet.

Mithilfe der Untersuchungen des Gesteins und der Bitumen wurde als nächster Schritt der Bindemittelbedarf der Asphaltgemische nach dem Verfahren von Radenberg und Bedekovic ermittelt [Radenberg 1996; Bedekovic 1957]. Bei diesem Verfahren wird der notwendige Bindemittelbedarf unter der Betrachtung der spezifischen Oberfläche, der Bitumenfilmdicke, dem tatsächlichen Massenanteil der Gesteinsfraktion und der Kornformkennzahl ermittelt. Die ausführlichen Berechnungen der Asphaltgemische sind in Anlage 2 dargestellt. In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse des Bindemittelbedarfs der Asphaltgemische zusammengefasst.

| Asphaltgemisch                       | Bindemittelbedarf |
|--------------------------------------|-------------------|
| SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung | 7,0 M-%           |
| SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung | 5,8 M-%           |
| AC 16 B S SG                         | 7,0 M-%           |
| SMA 16 B S                           | 5,4 M-%           |

Tab. 2: Bindemittelbedarf der Asphaltgemische

Das Verfahren wurde zur Ermittlung des Bindemittelbedarfs für dünne Schichten im Kalteinbau entwickelt. Für die Asphaltdeckschichtgemische und dem SMA 16 B S wird mithilfe des Verfahrens jeweils ein realistischer Bindemittelbedarf ermittelt. Das Verfahren zeigt jedoch Grenzen bei der Ermittlung des Bindemittelbedarfs für den stetig gestuften Asphaltbeton, aufgrund des deutlich zu hohen Bindemittelgehaltes des Asphaltbindergemisches, auf. Somit wurden zur endgültigen Festlegung der Spanne für die Variation des Bindemittelgehaltes Erstprüfungen an allen Asphaltgemischen durchgeführt. Durch diese beiden Untersuchungen und dem Beschluss des Projektbegleitenden Ausschusses wurde der Bindemittelgehalt, wie in Tabelle 3 ersichtlich, variiert.

| Asphaltgemisch      | Bitumen-sorte | Anzahl der Gemische | Bindemittelgehalt [M-%] |
|---------------------|---------------|---------------------|-------------------------|
| SMA 11 S: feine KGV | 25/55-55A     | 5                   | 6,0/ 6,5/ 7,0/ 7,5/ 8,0 |
| SMA 11 S: grobe KGV | 25/55-55A     | 4                   | 6,0/ 6,5/ 7,0/ 8,0      |
| SMA 11 S: feine KGV | 10/40-65A     | 1                   | 7,0                     |
| AC 16 B S SG        | 10/40-65A     | 5                   | 4,5/ 5,0/ 5,5/ 6,0/ 6,5 |
| SMA 16 B S          | 10/40-65A     | 4                   | 5,0/ 5,5/ 6,0/ 6,5      |
| AC 16 B S SG        | 25/55-55A     | 1                   | 5,5                     |

Tab. 3: Übersicht der Asphaltgemische

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 1 wurden erreicht.**

## Arbeitspaket 2: Herstellung und Vorbereitung der Asphaltprobekörper

Die Asphaltmischgüter wurden am Mischwerk in Dresden unter realen Bedingungen hergestellt. Die Asphaltgemische mit derselben Bitumensorte wurden an einem Tag hergestellt um zu gewährleisten, dass das Bitumen aus derselben Charge stammt. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Sieblinie der Asphaltgemische wurden zuvor Probemischungen hergestellt und extrahiert um die Mischwerkseinstellungen für die jeweilige Korngrößenverteilung zu optimieren. Im Straßenbaulabor der TU Dresden erfolgte anschließend die Extraktion der Asphaltgemische und die Bestimmung der Roh- und Raumdichten am Marshallprobekörper. Die Abbildungen 2 bis 5 stellen die Extraktionsergebnisse für die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen dar. Die Sieblinien der untersuchten Asphaltgemische entsprechen zum Größtenteils den Vorgaben. Die Differenzen der Korngrößenverteilung befinden sich im Toleranzbereich der Vorgaben der ZTV Asphalt-StB 07. Somit kann der Einfluss des Bindemittelgehaltes innerhalb einer Korngrößenverteilung auf die Asphalteeigenschaften ermittelt werden. Die vollständigen Ergebnisse der Extraktionen sind in Anlage 3 aufgeführt

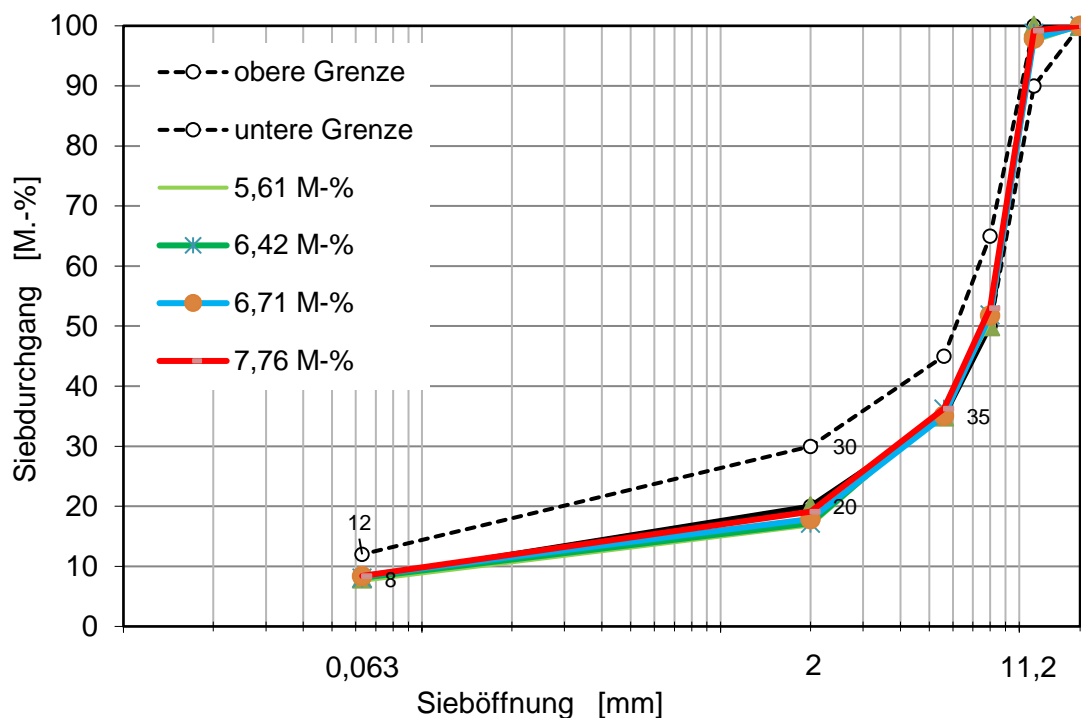


Abb. 2: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung



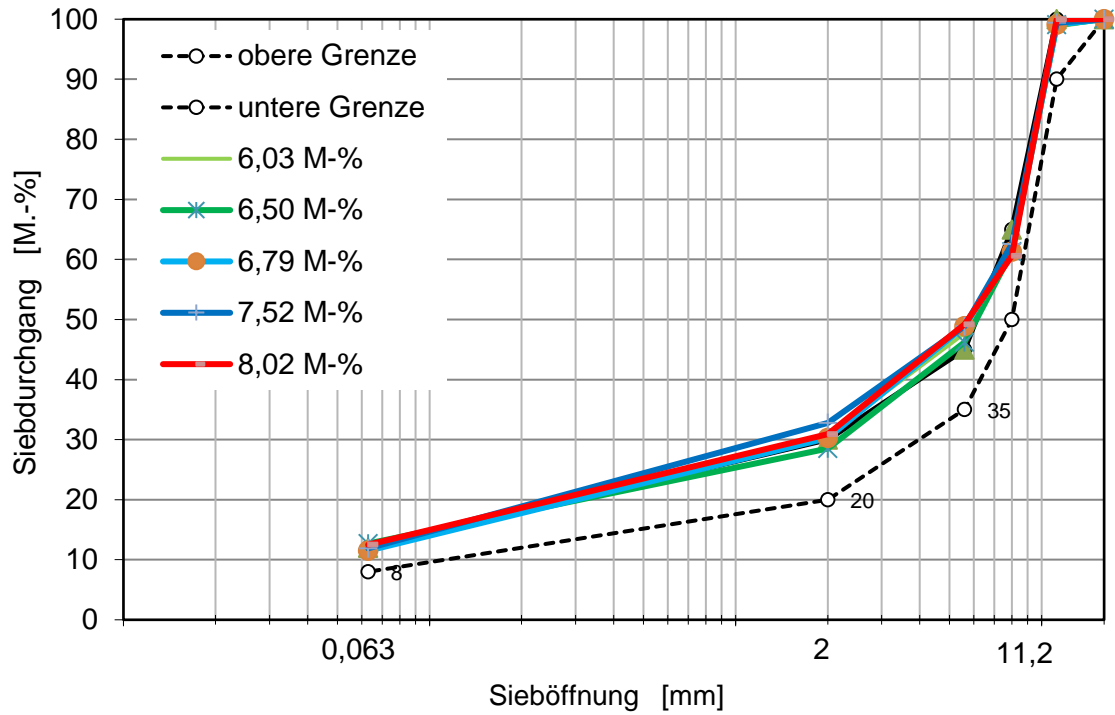


Abb. 3: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung

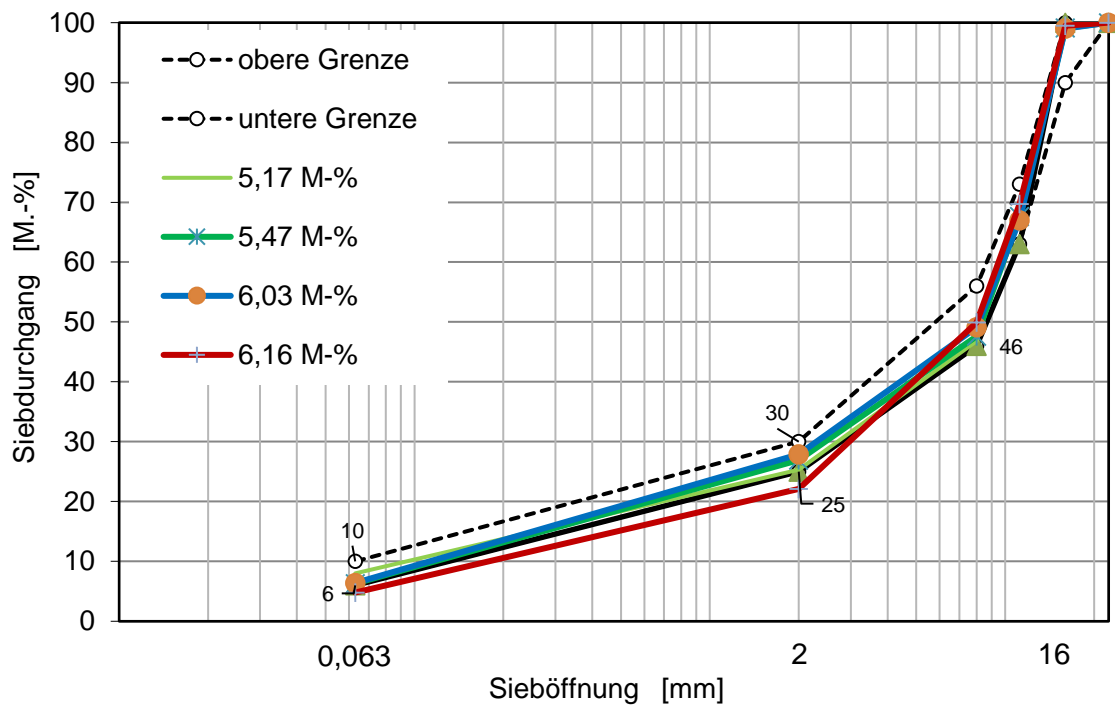


Abb. 4: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 16 B S

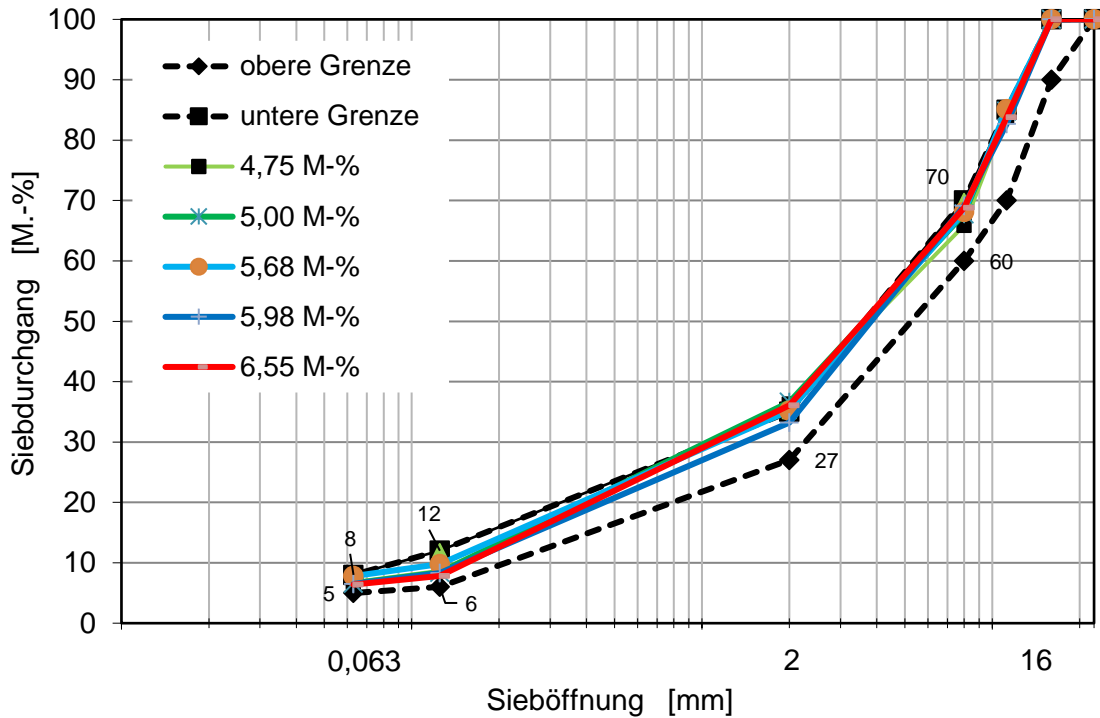


Abb. 5: Sieblinie der Asphaltgemische AC 16 B S SG

Die Variante SMA 16 B S mit einem Bindemittelgehalt von 6,16 M-% wurde allerdings mit deutlichen Abweichungen zur geplanten Gemischzusammensetzung in der Asphaltmischanlage hergestellt. Die Sieblinie unterschied sich deutlich von den anderen Varianten und der Bindemittelgehalt war ebenfalls zu gering. Von einer erneuten Herstellung dieser Variante wurde jedoch abgesehen, da dann die Vergleichbarkeit aufgrund einer anderen Bitumencharge nicht mehr gegeben wäre. Die Versuchsergebnisse dieser Variante werden deshalb im Folgenden nicht mit behandelt.

Die Plattenherstellung erfolgte nach der Prüfvorschrift TP Asphalt-StB Teil 33 A an einem Walzsegmentverdichter der Firma Infratest, der es ermöglicht Asphaltplatten bis zu einer Höhe von 32 cm herzustellen. Dadurch ist es möglich alle Probekörper, ebenfalls für den Triaxialversuch, in Verdichtungsrichtung aus den hergestellten Platten herauszubohren und somit praxisadäquate Eigenschaften der Probekörper sicherzustellen. Zur Sicherstellung eines homogenen Verdichtungsgrades innerhalb der Probekörper, werden die Asphaltplatten ab einer Höhe von 20 cm mehrlagig hergestellt. Dabei wird die Zwischenlage mithilfe einer Spachtel angeraut, um den Verbund zwischen den Lagen zu gewährleisten. Anschließend werden die Probekörper aus den Platten herausgebohrt, auf Länge gesägt, gegebenenfalls planparallel geschliffen und ausgemessen. Die Lagerung erfolgt in einem geschlossenen Raum, vor Sonneneinstrahlung und Witterung geschützt und bei einer Lufttemperatur von circa 20°C.

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 2 wurden erreicht.**

### Arbeitspaket 3: Einfluss auf das Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten

#### Einfluss der Asphaltzusammensetzung – Steifigkeitsverhalten

Die Bestimmung der Masterkurve zur Beurteilung des Steifigkeitsverhaltens erfolgte anhand von einaxialen Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper. Somit kann die Hauptkurve auch bei Temperaturen über 20°C versuchstechnisch ermittelt werden. Die Versuche werden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen und Frequenzen in Anlehnung zur TP Asphalt-StB Teil 26 (Entwurf Stand 2017) durchgeführt. Für die Versuche bei einer Temperatur von 35°C wird ein neuer Probekörper verwendet, damit Teilschädigungen, die das Ergebnis beeinflussen können, ausgeschlossen sind. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 4 aufgeführt.

| T [°C]         | F [Hz]                   | $\epsilon_{ele,anf}$ [‰] | $\sigma_u$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_o$ [N/mm <sup>2</sup> ]  |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| -10; 5; 20; 35 | 0,1; 0,3; 1;<br>3; 5; 10 | ca. 0,065                | 0,035                           | Temperatur-,<br>frequenzabhängig |

Tab.4: Versuchsparameter zur Bestimmung der Masterkurve

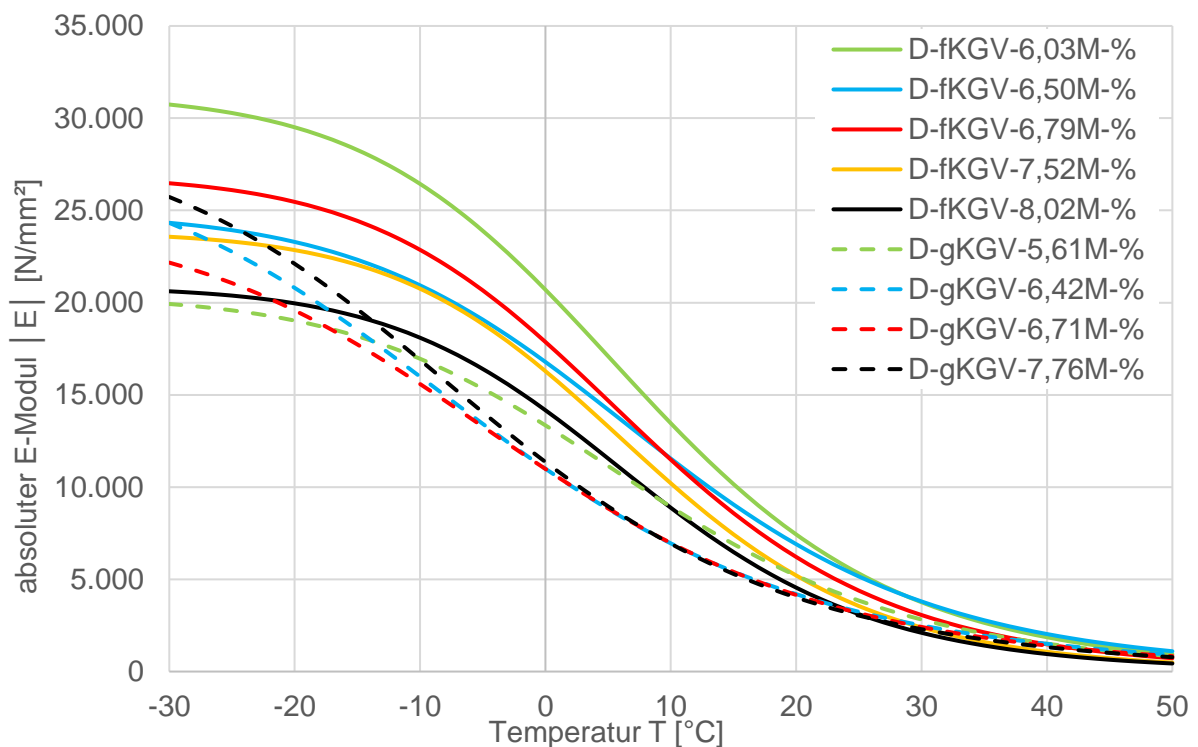


Abb. 6: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Deckschichtvarianten

In Abbildung 6 sind die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen der untersuchten Asphaltdeckschichtvarianten (SMA 11 S) unter Variation der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes dargestellt. Die Deckschichtvarianten mit der groben Korngrößenverteilung sind als gestrichelte Linien abgebildet. Der Einfluss der Sieblinie ist deutlich erkennbar. Die feinere Korngrößenverteilung zeigen höhere Steifigkeiten bei gleichem Bindemittelgehalt.

Die Steifigkeiten der untersuchten Gemische mit einer feinen Korngrößenverteilung sinken zudem mit zunehmendem Bindemittelgehalt. Eine Ausnahme stellt die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,79 M-% dar. Diese Variante besitzt höhere Steifigkeiten bei tieferen Temperaturen als die Variante mit einem geringeren Bindemittelgehalt. Bei den Gemischen mit der groben Korngrößenverteilung bewirkt die Erhöhung des Bindemittelgehaltes ebenfalls eine Reduzierung der Steifigkeiten. Des Weiteren sind die Verläufe der Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion bei den Varianten ab einem Bindemittelgehalt von 6,42 M-% relativ identisch bei Temperaturen über 0°C.

In Abbildung 7 sind die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen der untersuchten Asphaltbinderschichtvarianten unter Variation der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes dargestellt. Die Bindergemische nach dem Splittmastixprinzip werden als gestrichelte Linien abgebildet. Bei den untersuchten Binderschichtvarianten ist der Einfluss der Sieblinie deutlich geringer als bei den Deckschichtvarianten. Im untersuchten Temperaturbereich verlaufen die Funktionen für die Varianten mit demselben Bindemittelgehalt annähernd identisch.

Mit zunehmendem Bindemittelgehalt steigen die Steifigkeiten des stetig gestuften Asphaltbetons zunächst bis zu einem Gehalt von 5,68 M-% danach sinken die Steifigkeiten wieder. Der Einfluss des Bindemittelgehaltes bei der Variante SMA 16 B S ist deutlich geringer als bei dem stetig gestuften Asphaltbeton. Im untersuchten Temperaturbereich verlaufen die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen annähernd identisch.

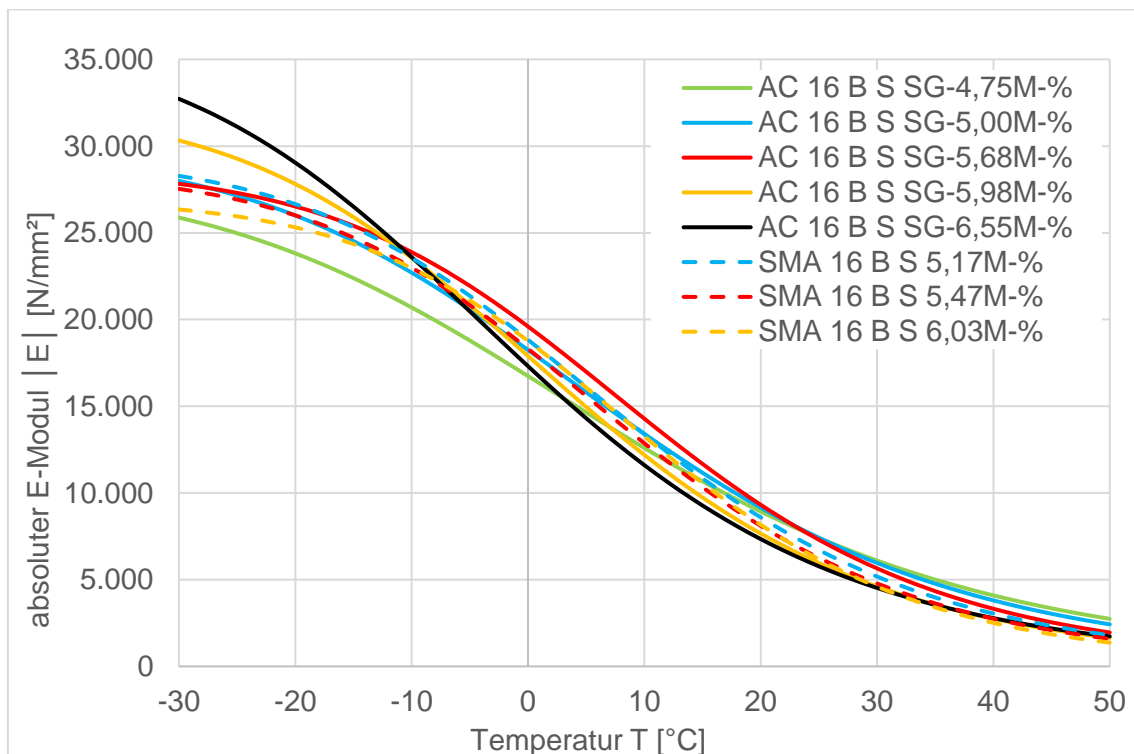


Abb. 7: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Binderschichtvarianten

*Einfluss der Asphaltzusammensetzung – Ermüdungsverhalten*

Die Bestimmung des Ermüdungsverhaltens der Asphaltgemische erfolgte mit Hilfe des Spaltzug-Schwellversuches nach TP Asphalt-StB, Teil 24 (Entwurf 2018).

In Abbildung 8 und 9 sind die Ermüdungsfunktionen der Deckschichtgemische dargestellt. Bei beiden Korngrößenverteilungen der Deckschichtvarianten nehmen die ertragbaren Lastwechselzahlen mit zunehmendem Bindemittelgehalt bei gleichen elastischen Anfangsdehnungen zu. Bei der feinen Korngrößenverteilung verschlechtert sich die Ermüdungsfunktion erst ab der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 8,02 M-%. Dabei verschieben sich die Ermüdungsfunktionen mit Zunahme des Bindemittelgehaltes bei beiden Sieblinien annähernd parallel zueinander.

Bei elastischen Anfangsdehnungen von  $\epsilon_{el,anf} \leq 0,12 \text{ ‰}$  weisen die Varianten der feinen Korngrößenverteilung bei gleichem Bindemittelgehalt eine bessere Ermüdungsfunktion auf, als die Varianten mit der groben Sieblinie bis zu einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Die grobe Korngrößenverteilung besitzt bei einem Bindemittelgehalt von circa 6,7 M-% eine bessere Ermüdungsfunktion ab einer elastischen Anfangsdehnungen von  $\epsilon_{el,anf} \leq 0,085 \text{ ‰}$  als die feine Korngrößenverteilung. Bei dem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% besitzt die grobe Sieblinie ein besseres Ermüdungsverhalten als die der feineren.

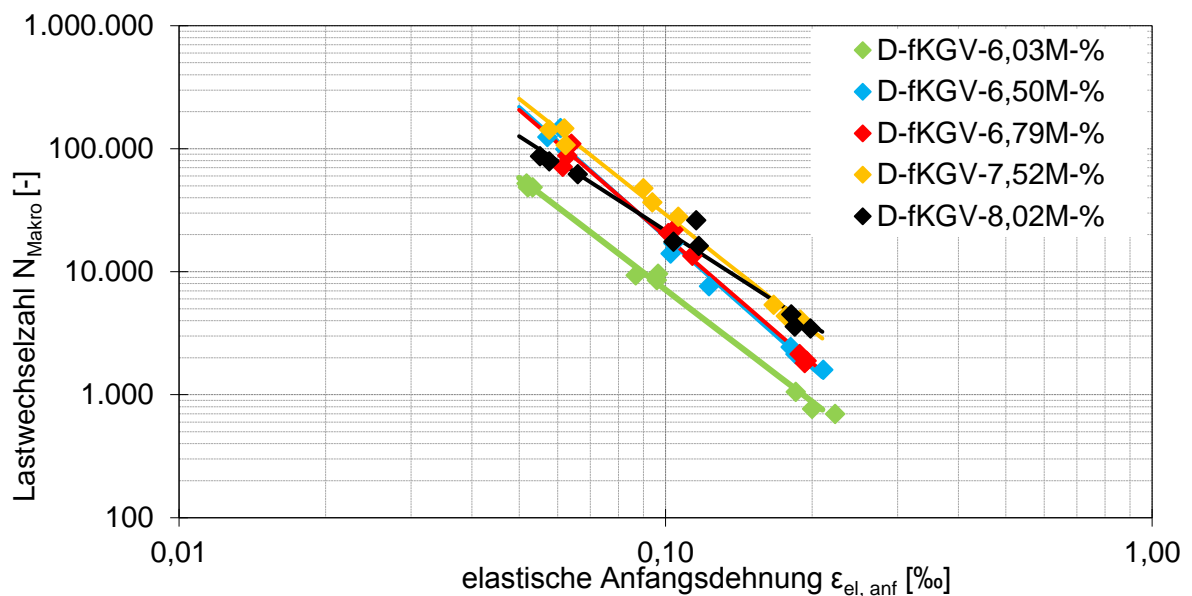


Abb. 8: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; feine Korngrößenverteilung

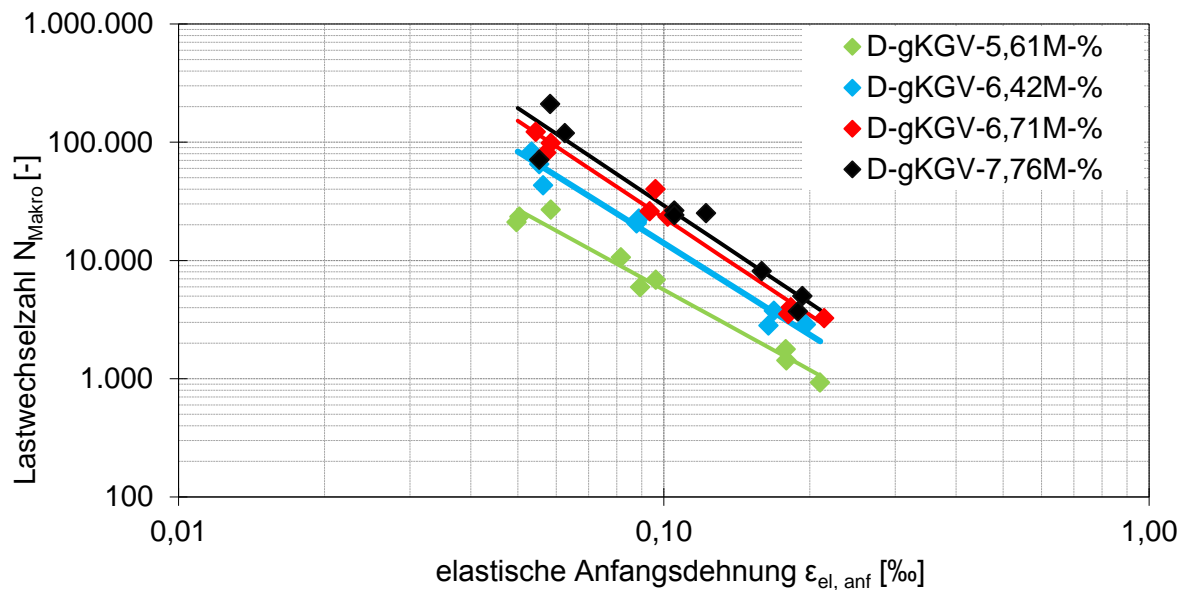


Abb. 9: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; grobe Korngrößenverteilung

In Abbildung 10 sind die Ermüdungsfunktionen der Varianten des AC 16 B S SG dargestellt. Mit zunehmendem Bindemittelgehalt verbessert sich die Ermüdungsfunktion. Bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% verdrehen sich die Ermüdungsfunktionen gegeneinander und weisen somit ein ähnliches Ermüdungsverhalten auf. Bei einer weiteren Bindemittelzugabe verschieben sich die Ermüdungsfunktionen annähernd parallel. Dies wurde ebenfalls bei den Deckschichtvarianten festgestellt. Die Steifigkeiten reduzieren sich mit zunehmendem Bindemittelgehalt bei Temperaturen über  $-10^{\circ}\text{C}$ , sodass nicht unbedingt von einem geringeren Ermüdungsfortschritt in der Befestigung bei höheren Bindemittelgehalten ausgegangen werden kann. In Abbildung 11 sind die Ermüdungsfunktionen der Varianten des SMA 16 B S dargestellt. Bei dieser Variante besitzt der Bindemittelgehalt, zumindest in der untersuchten Spanne, keinen Einfluss auf die Ermüdungsfunktion. Im Vergleich zum stetig gestuften Asphaltbeton besitzt das Bindergemisch nach dem Splittmastixprinzip ein besseres Ermüdungsverhalten bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,47 M-%.

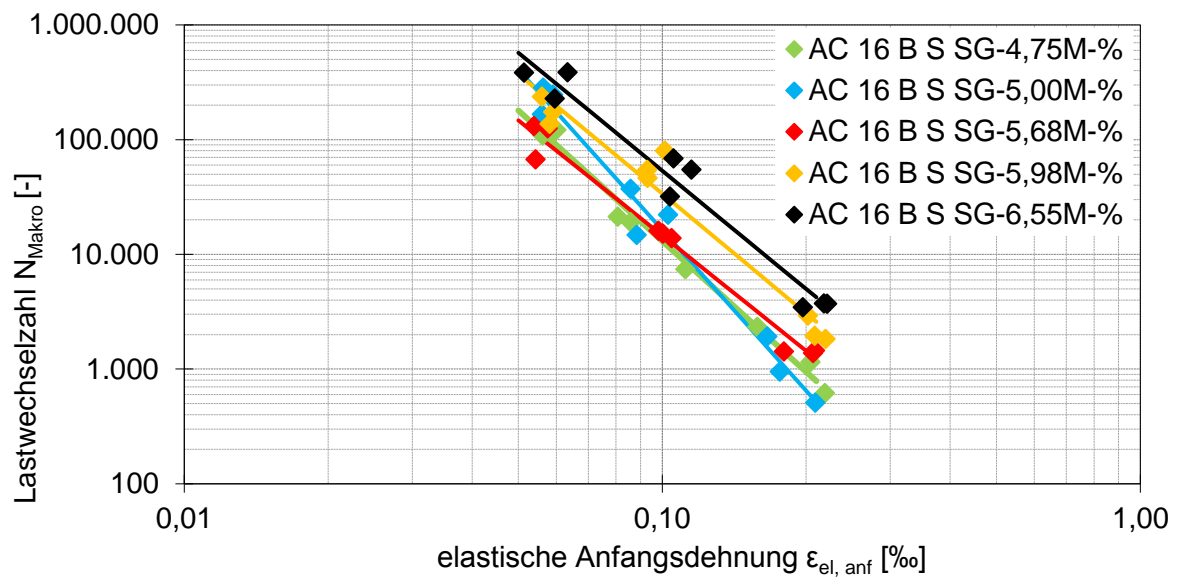


Abb. 10: Ermüdungsfunktion des AC 16 B S SG

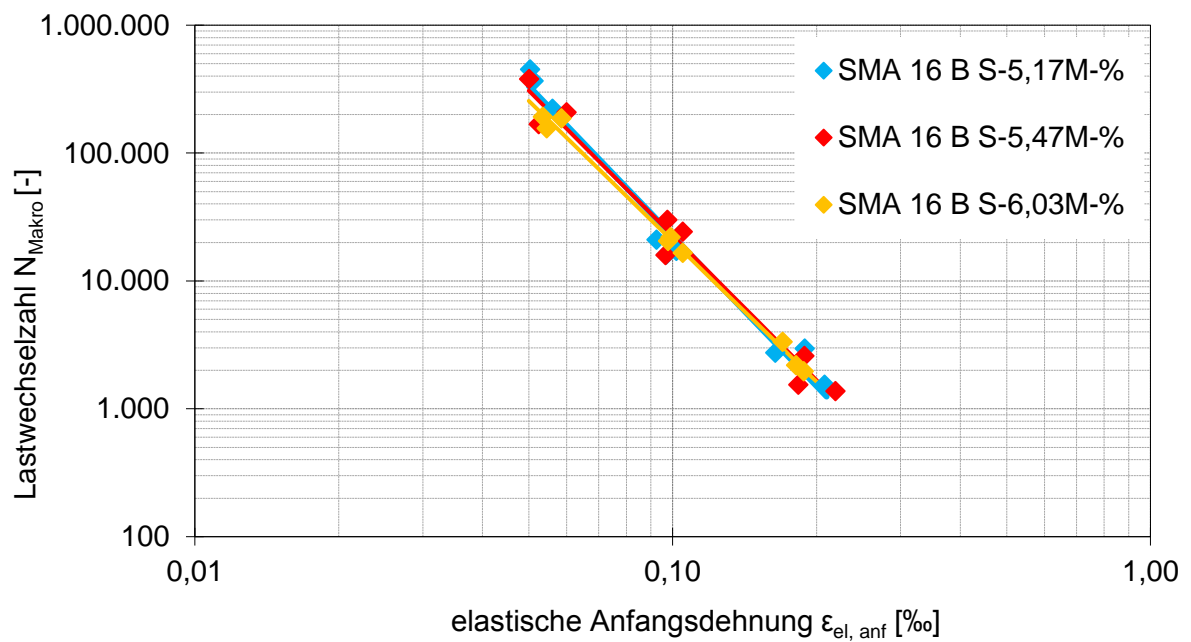


Abb. 11: Ermüdungsfunktion des SMA 16 B S

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 3 wurden erreicht.**

#### Arbeitspaket 4: Einfluss auf das Tieftemperaturverhalten

Zur Ermittlung der Zugspannungen, welche bei tiefen Temperaturen durch behinderte thermische Dehnungen auftreten können, werden Abkühlversuche gemäß TP Asphalt-StB 46 A durchgeführt. Dazu wird der Probekörper an zwei Adapter geklebt, in die Prüfeinrichtung eingesetzt und auf die Starttemperatur von 20°C temperiert. Die Lufttemperatur der Prüfkammer wird nach Versuchsbeginn mit einer Temperaturrate von  $dT = -10 \frac{K}{h}$  abgekühlt. Während des Versuches wird die Probekörperlänge konstant gehalten und die entstehenden axialen Kräfte werden mit der Kerntemperatur des Probekörpers aufgezeichnet. Der Abkühlversuch wird beendet, wenn der Probekörper reißt oder eine Lufttemperatur von -40°C erreicht wird.

Die Abbildung 12 stellt die Bruchdehnungen der Deckschichtvarianten in Abhängigkeit zu ihrem Bindemittelgehalt dar. Die feinere Korngrößenverteilung erreicht im gesamten untersuchten Bindemittelbereich höhere Bruchdehnungen als die grobe Korngrößenverteilung. Dabei steigt die Bruchdehnung mit zunehmenden Bindemittelgehalt bei der feinen Korngrößenverteilung an. Allerdings erreicht diese Sieblinie ihre höchste Bruchdehnung bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Einen Einfluss des Bindemittelgehaltes bei der groben Korngrößenverteilung auf die Bruchdehnung ist nicht erkennbar. Die Bruchdehnungen bleiben in der untersuchten Spanne des Bindemittelgehaltes annähernd konstant.

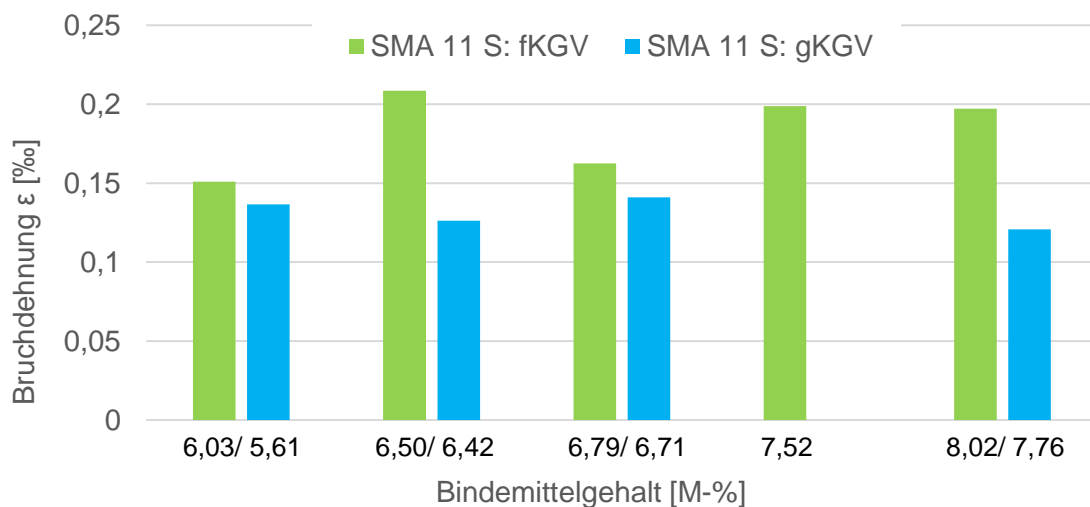


Abb. 12: ermittelte Bruchdehnungen der Deckschichtgemische

Einen Einfluss des Bindemittelgehaltes bei der groben Korngrößenverteilung auf die Bruchtemperatur ist in Abbildung 13 dagegen deutlich erkennbar. Mit zunehmenden Bindemittelgehalt erhöhen sich die Bruchtemperaturen. Die feine Korngrößenverteilung erreicht die niedrigsten Bruchtemperaturen bei den hohen Bindemittelgehalten. Ein genauer Trend zum Einfluss des Bindemittelgehaltes ist allerdings aus den Versuchsergebnissen nicht erkennbar. Die höchste Bruchtemperatur wird bei einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-% erreicht. Die feine Korngrößenverteilung erreicht gegenüber der groben Korngrößenverteilung insbesondere bei hohen Bindemittel-



gehalten (ab 7,52 M-%) niedrigere Bruchtemperaturen. Die Bruchtemperaturen beider Sieblinien sind im Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,50 M-% bis 7,00 M-% identisch. In Zusammenhang mit den höheren Bruchdehnungen kann davon ausgegangen werden, dass die feinere Korngrößenverteilung (mit Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-%) ein besseres Tieftemperaturverhalten aufweist.

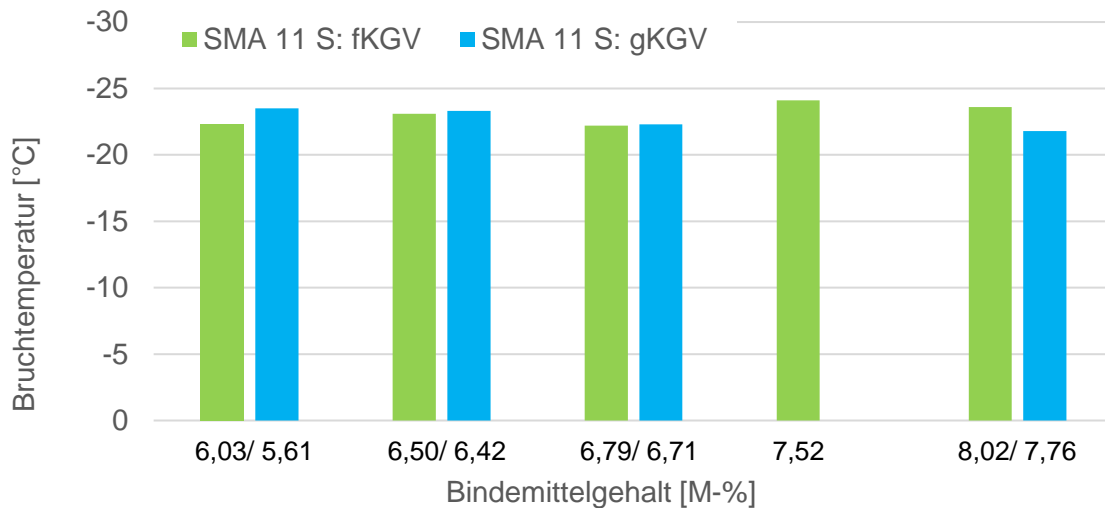


Abb. 13: Bruchtemperaturen der Deckschichtgemische

Die Abbildung 14 stellt die Bruchdehnungen in Abhängigkeit der Bindemittelgehalte der Bindergemische dar. Für beide Korngrößenverteilung konnte im Zuge der Untersuchungen kein Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Bruchdehnungen festgestellt werden. Der stetig gestufte Asphaltbeton mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% erreicht eine höhere Bruchdehnung als die anderen Varianten derselben Korngrößenverteilung. Die Korngrößenverteilung der Binderschicht nach dem Splittmastixprinzip erreicht größere Bruchdehnungen als der stetig gestufte Asphaltbeton.

Einen Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Bruchtemperatur ist bei dem Bindergemisch SMA 16 B S ebenfalls nicht erkennbar, zumindest in der untersuchten Spanne des Bindemittelgehaltes (Abbildung 15). Bei dem stetig gestuften Asphaltbeton reduziert sich die Bruchtemperatur mit zunehmenden Bindemittelgehalt bis zu einem Gehalt von 5,98 M-%. Die Verwendung der feineren Sieblinie des AC 16 B S SG hat zur Folge, dass höhere Bruchtemperaturen erreicht werden als die der Varianten des SMA 16 B S. In Zusammenhang mit den Ergebnissen der Bruchdehnung besitzt die grobe Korngrößenverteilung der Varianten des SMA 16 B S ein besseres Tieftemperaturverhalten als der stetig gestufte Asphaltbeton.

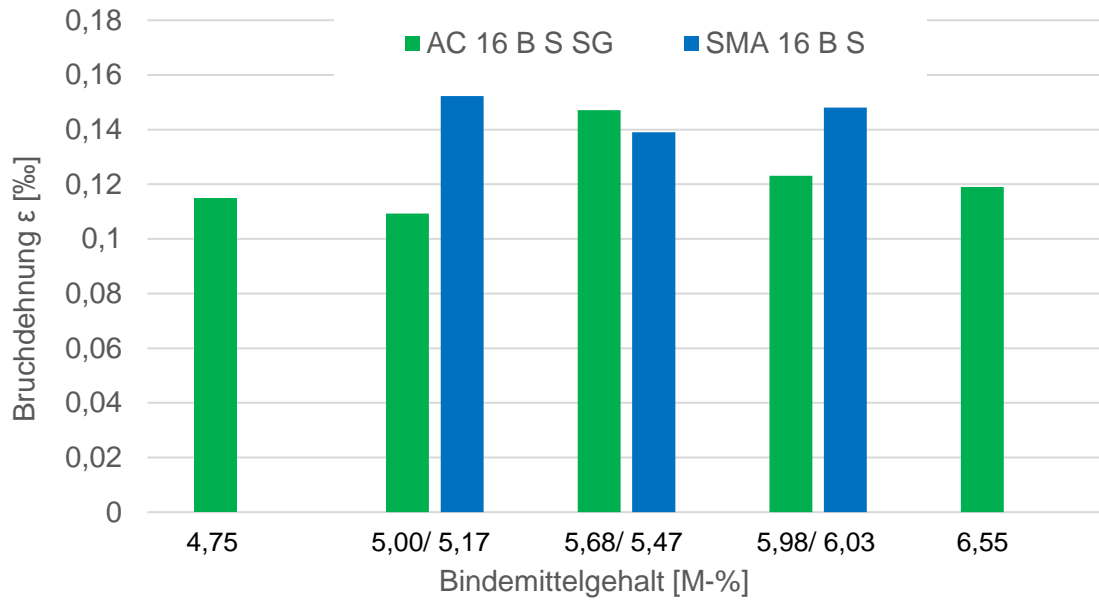


Abb. 14: ermittelte Bruchdehnungen der Binderschichtgemische

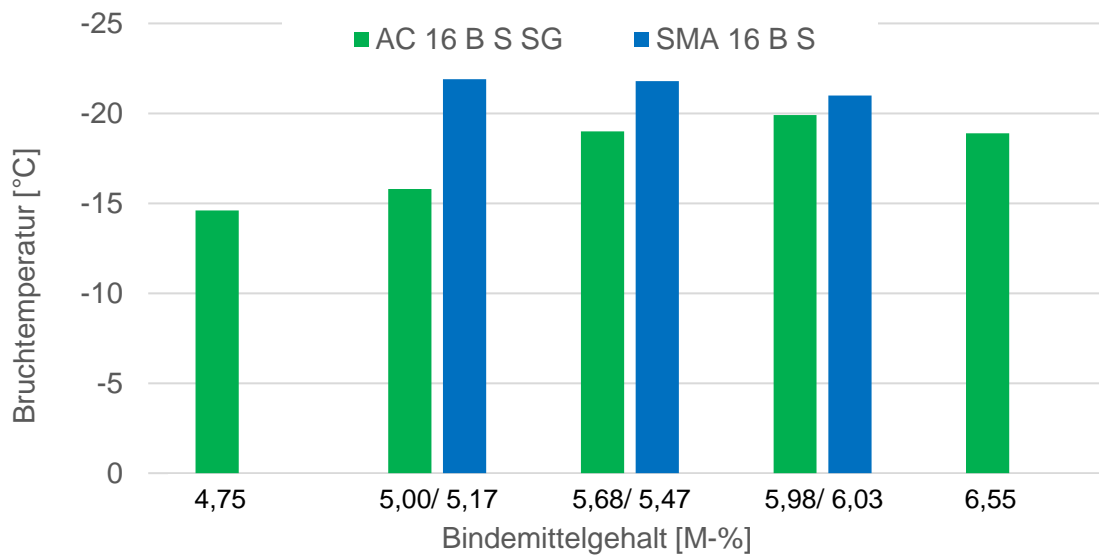


Abb. 15: Bruchtemperaturen der Binderschichtgemische

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 4 wurden erreicht.**

### **Arbeitspaket 5: Einfluss auf das plastische Verformungsverhalten**

Der Einfluss der Asphaltzusammensetzungen auf das Verformungsverhalten wird mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch und an ausgewählten Asphaltvarianten mit dem Triaxialversuch mit Druckbeanspruchung überprüft. Die Untersuchung der Verformungsbeständigkeit erfolgt in Teilschritten:

- einaxiale Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt-StB 25 B 1
- einaxiale Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörpern
- einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper
- Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung an den optimierten Asphaltvarianten.

Die verschiedenen Versuchsdurchführungen kommen zur Anwendung, um in Auswertung der Versuche und der geplanten Prognoserechnungen der Spurrinnenbildung beurteilen zu können, ob zum einen der einaxiale Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB 25 B 1 den Widerstand der Asphalte gegenüber bleibenden Verformungen korrekt beurteilen kann. Zum anderen soll die Frage beantwortet werden, ob es möglich ist, ausschließlich anhand der Ergebnisse der einaxialen Druck-Schwellversuche Spurrinnenprognoserechnungen durchführen und auf die Verwendung von Triaxialversuchen verzichten zu können.

#### *Einaxiale Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt-StB 25 B 1*

Bei dem einaxialen Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB 25 B 1 werden Asphaltprobekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 60 mm geprüft. Der Versuch beginnt mit der Aufbringung einer Vorbelastung über eine Dauer von 120 s. Danach folgen die Impulsbelastung mit einer Oberspannung von 0,35 MPa und anschließend eine Lastpause von 1,5 s. Während der Lastpause beträgt die Unterspannung zur Lagesicherung des Probekörpers 0,025 MPa.

Die Dehnungsrate (Abbildung 16) im Wendepunkt nehmen bei der groben Korngrößenverteilung mit zunehmenden Bindemittelgehalt ab bis zu einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-%. Danach steigt die Dehnungsrate im Wendepunkt wieder gering an. Der Bindemittelgehalt von 6,71 M-% stellt aber nicht zwangsläufig den optimalen Bindemittelgehalt in Bezug auf die Verformungsbeständigkeit dieser Korngrößenverteilung dar. Es besteht die Möglichkeit, dass die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 7,50 M-% eine noch bessere Verformungsbeständigkeit aufweisen könnte. Die Versuche belegen lediglich, dass die Verformungsbeständigkeit bei einem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% sich wieder verschlechtern.

In Abbildung 17 sind die Dehnungsraten der feinen Korngrößenverteilung dargestellt bei der die plastische Dehnung von 40 ‰ erreicht wurde. Der optimale Bindemittelgehalt dieser Korngrößenverteilung liegt bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Die anderen Varianten weisen eine schlechtere Verformungsbeständigkeit auf. Besonders ab einem Bindemittelgehalt von 7,52 M-% weist die feine Korngrößenverteilung eine hohe Verformungsanfälligkeit auf.

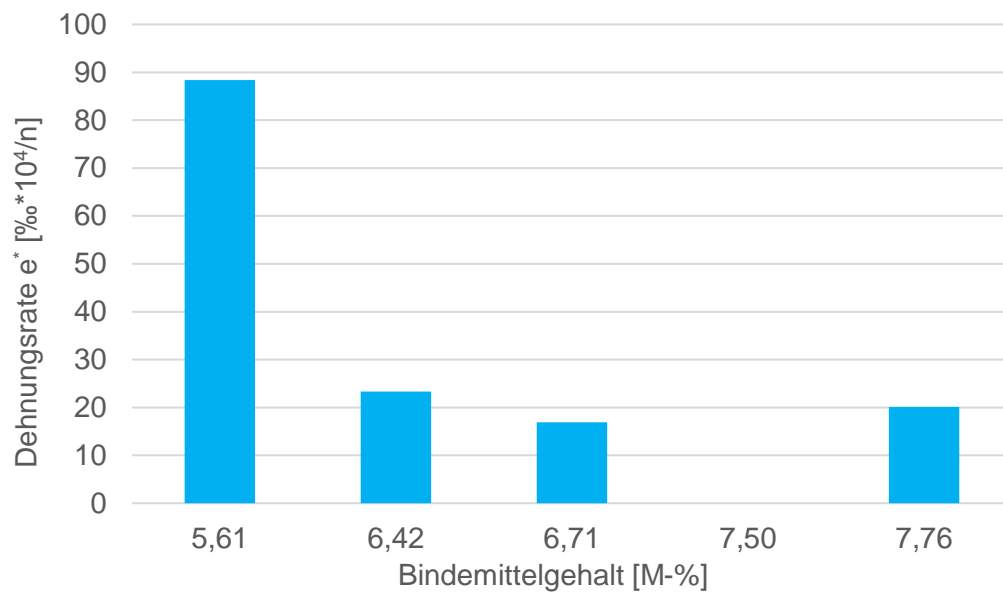


Abb. 16: Dehnungsraten im Wendepunkt für den SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

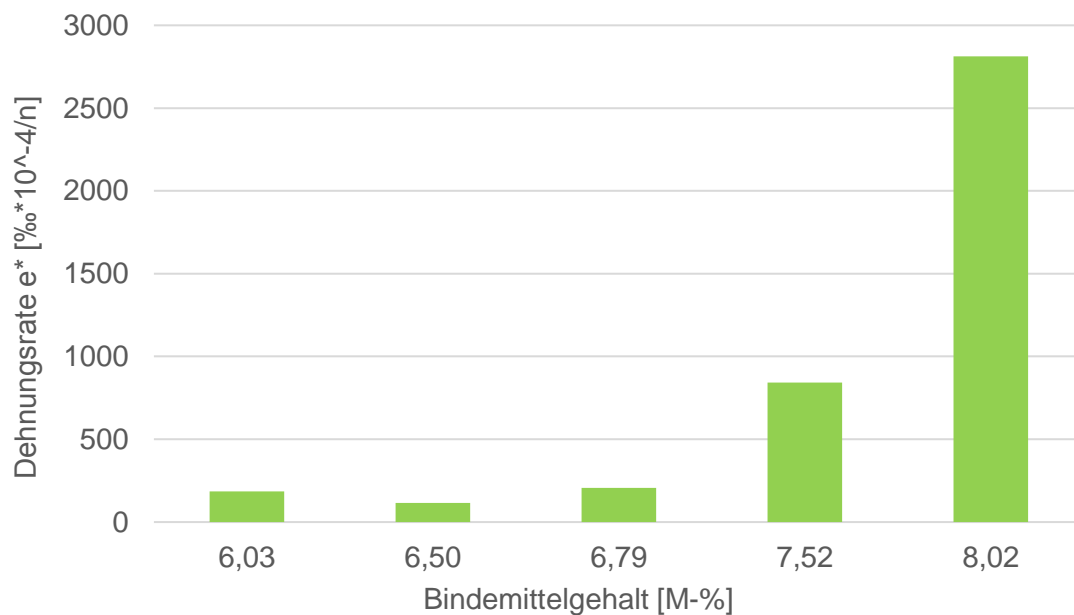


Abb. 17: Dehnungsraten bei einer Dehnung von 40 % für den SMA 11 S: feine KGV

Die grobe Korngrößenverteilung besitzt gegenüber der feineren eine bessere Verformungsbeständigkeit. Die Varianten mit der feinen Korngrößenverteilung erreichten schon nach wenigen Belastungszyklen eine plastische Gesamtdehnung von 40 %. Dagegen erreichten einige Varianten der groben Korngrößenverteilung selbst nach 10.000 Belastungszyklen diese plastische Dehnung nicht. Die Dehnungsraten sind ebenfalls deutlich geringer.

Die plastischen Gesamtdehnungen nach Versuchsende für die beiden Korngrößenverteilungen der Binderschichtgemische sind in Abhängigkeit zum Bindemittelgehalt in Abbildung 18 dargestellt. Der SMA 16 B S besitzt die beste Verformungsbeständigkeit bei einem Bindemittelgehalt von 5,47 M-%. Bei dieser Variante ist die plastische Gesamtdehnung ebenfalls geringer als bei dem stetig gestuften Asphaltbeton. Ansonsten weist der AC 16 B S SG eine bessere Verformungsbeständigkeit in der untersuchten Spanne des Bindemittelgehaltes auf. Die plastischen Dehnung erhöhen sich mit Zunahme des Bindemittelgehaltes bei der Korngrößenverteilung des AC 16 B S SG bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-%. Die plastischen Dehnungen reduzieren sich mit der weiteren Erhöhung des Bindemittelgehaltes. Durch Untersuchungen des Bindemittels an Reserveprobekörpern für den Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper konnte nach Extraktion festgestellt werden, dass diese Varianten ein verhärtetes Bitumen aufweisen. Dies konnte aber nur bei den Untersuchungen zur Verformungsbeständigkeit festgestellt werden.

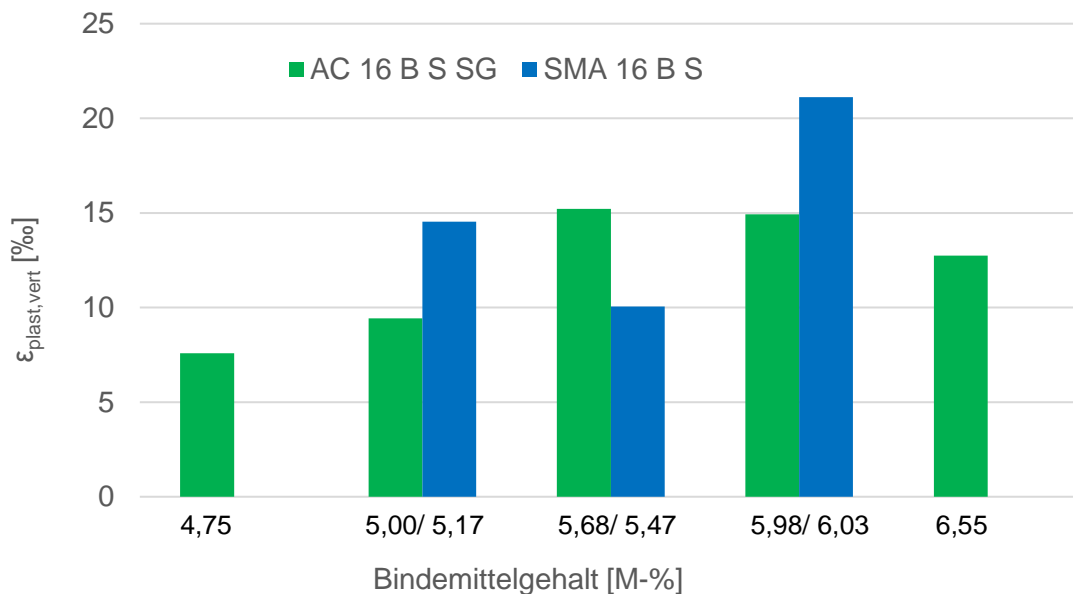


Abb. 18: plastische Gesamtdehnung am Versuchsende für die Binderschichtgemische

#### *Einaxiale Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper*

Bei dem einaxialen Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper werden Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm geprüft. Zur Minimierung der Querdehnungsbehinderung wird zwischen dem Probekörper und dem Laststempel bzw. der Lastplatte eine Teflonfolie angeordnet. Die Versuche werden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen bei einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Während eines Versuches wird der Probekörper mit 3 unterschiedlichen Oberspannungen mit jeweils 30.000 Lastwechsel belastet.

In Abbildung 19 sind die plastischen Dehnungen der Deckschichtvarianten in Bezug auf den Soll-Bindemittelgehalt dargestellt. Für beide Korngrößenverteilungen ist zu erkennen, dass sich die plastischen Dehnungen mit zunehmendem Bindemittelgehalt

zunächst reduzieren. Bei dem Bindemittelgehalt von 7,0 M-% bewirkt eine weitere Zugabe an Bitumen eine Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Des Weiteren weisen die Varianten mit der feinen Korngrößenverteilung gegenüber denen mit der größeren eine schlechtere Verformungsbeständigkeit bei gleichem Bindemittelgehalt und eine deutlichere Zunahme der plastischen Dehnungen ab einem Bindemittelgehalt von 7,0 M-% auf. Der Bindemittelgehalt von 6,71 M-% stellt aber nicht zwangsläufig den optimalen Bindemittelgehalt in Bezug auf die Verformungsbeständigkeit der groben Korngrößenverteilung dar. Es besteht die Möglichkeit, dass die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 7,50 M-% eine bessere Verformungsbeständigkeit aufweisen könnte. Die Versuche belegen lediglich, dass sich das Verformungsverhalten bei einem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% wieder verschlechtert.

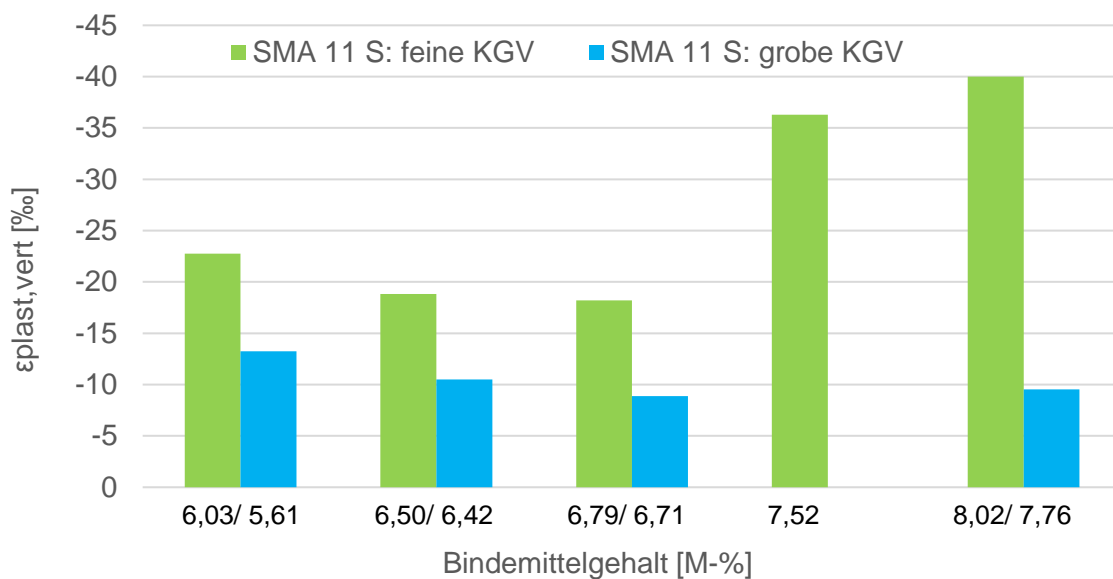


Abb. 19: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei  $T=40^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,15\text{ N/mm}^2$

In Abbildung 20 sind die plastischen Dehnungen der Binderschichtvarianten in Bezug auf den Soll-Bindemittelgehalt dargestellt. Der stetig gestufte Asphaltbeton mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% besitzt die höchste Verformungsbeständigkeit. Bei einer weiteren Zunahme des Bindemittelgehaltes erfährt der Asphaltbeton deutlich höhere plastische Dehnungen. Die plastischen Dehnungen der Varianten des SMA 16 B S sind zunächst deutlich höher als die des Asphaltbetons. Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes ist die Änderung der plastischen Gesamtdehnung deutlich geringer als bei der Variante AC 16 B S SG, sodass bei höheren Bindemittelgehalten die Verformungsbeständigkeit annähernd identisch ist. Als optimierte Binderschichtvariante stellt sich bei dem Kriterium der Verformungsbeständigkeit der AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% heraus

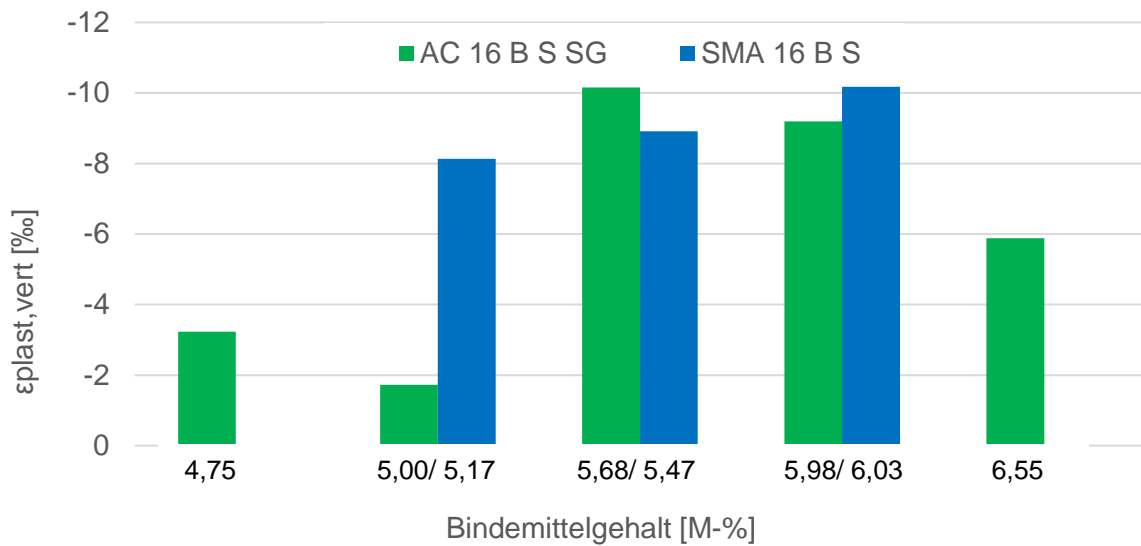


Abbildung 20: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei  $T=50^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,20\text{ N/mm}^2$

Aus Abbildung 20 wird allerdings auch ersichtlich, dass die Variante des AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% die größte plastischen Dehnung am Versuchsende aufweist. Bei der weiteren Zunahme des Bindemittelgehaltes verbessert sich das Verformungsverhalten dieser Korngrößenverteilung wieder. Dieser Umstand ist mit dem aktuellen Forschungsstand nicht erklärbar. Daher wurde an Reserveprobekörpern der Variante AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% und 6,55 M-% das Bindemittel zurückgewonnen und Versuche am extrahierten Bitumen durchgeführt. Die konventionellen Prüfverfahren und die DSR-Versuche belegen, dass das Bitumen der Varianten mit den höheren Bindemittelgehalten Eigenschaften eines härteren Bitumens aufweist als die anderen Varianten. Aufgrund dieser Verhärtung des Bitumens verringern sich die plastischen Dehnungen mit Zunahme des Bindemittelgehaltes. Dies bedeutet ebenfalls, dass durch die Verwendung eines härteren Bitumens mit einem höheren Bindemittelgehalt, im Vergleich zu einem Gemisch mit einem weicherem Bindemittel, die Verformungsbeständigkeit wieder verbessert werden kann.

Die Asphaltgemische mit derselben Bitumensorte wurden an demselben Tag hergestellt um sicher zu stellen, dass das Bindemittel aus derselben Charge stammt. Die Probekörperherstellung verlief für alle Varianten des AC 16 B S SG identisch und somit die notwendige Wiedererwärmung des Mischgutes zur Plattenherstellung. Die Lagerung der Probekörper erfolgte in demselben Raum und die Temperierung auf Prüftemperatur war für alle Varianten ebenfalls identisch. Somit kann die Verhärtung der beiden Gemische des AC 16 B S SG nicht erklärt werden. Die Verhärtung des Bitumens konnte aber nur bei den Untersuchungen zum Verformungsverhalten festgestellt werden.

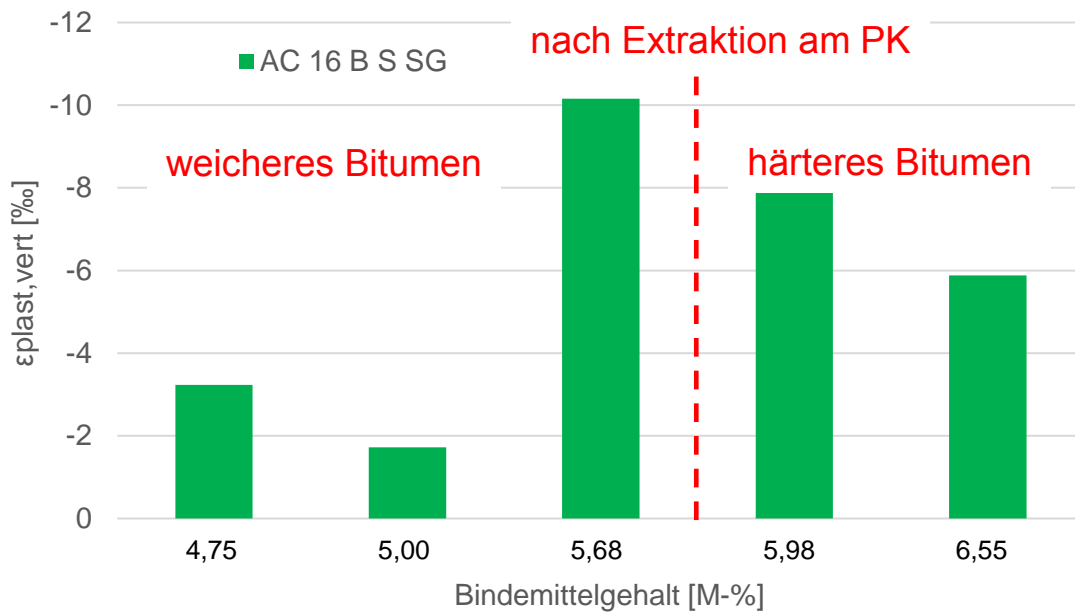


Abb. 21: Verhärtung des Bitumens bei der Variante AC 16 B S SG

#### *Einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper*

Bei dem einaxialen Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper werden Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 60 mm geprüft. Zur Minimierung der Querdehnungsbehinderung wird zwischen dem Probekörper und dem Laststempel bzw. der Lastplatte eine Teflonfolie angeordnet. Die Versuche werden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen bei einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Während eines Versuches wird der Probekörper mit 3 unterschiedlichen Oberspannungen mit jeweils 30.000 Lastwechsel belastet.

In Abbildung 22 sind die plastischen Dehnungen der Deckschichtvarianten in Bezug auf den Bindemittelgehalt dargestellt. Für beide Korngrößenverteilungen ist zu erkennen, dass sich die plastischen Dehnungen mit zunehmendem Bindemittelgehalt zunächst reduzieren. Bei dem Bindemittelgehalt von 6,50 M-% bewirkt eine weitere Zugabe an Bitumen eine Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Des Weiteren weisen die Varianten mit der feinen Korngrößenverteilung gegenüber denen mit der gröberen eine schlechtere Verformungsbeständigkeit mit demselben Bindemittelgehalt und eine deutlichere Zunahme der plastischen Dehnungen ab einem Bindemittelgehalt von 7,0 M-% auf.

In Abbildung 23 sind die plastischen Dehnungen der Binderschichtvarianten in Bezug auf den Bindemittelgehalt dargestellt. Für beide Korngrößenverteilungen ist zu erkennen, dass die plastischen Dehnungen mit Zunahme des Bindemittelgehaltes sich vergrößern. Der stetig gestufte Asphaltbeton besitzt die größten plastischen Dehnungen bei einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-%. Bei einer weiteren Zunahme des Bindemittelgehaltes reduzieren sich die plastischen Dehnungen. Dies ist wieder auf die Verhärtung des Bitumens zurück zu führen. Die Korngrößenverteilung des SMA 16 B S



besitzt zunächst ein besseres Verformungsverhalten als der AC 16 B S SG. Erst die Variante mit dem verhärteten Bitumen des stetig gestuften Asphaltbeton weist ein besseres Verformungsverhalten auf als der SMA 16 B S.

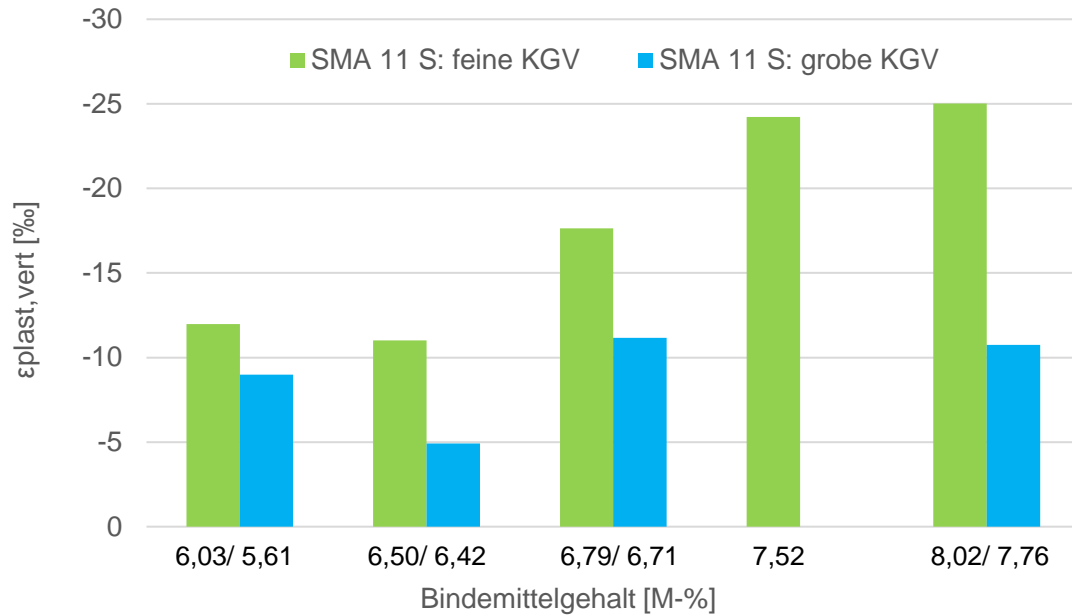


Abb. 22: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei  $T=30^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,20 \text{ N/mm}^2$

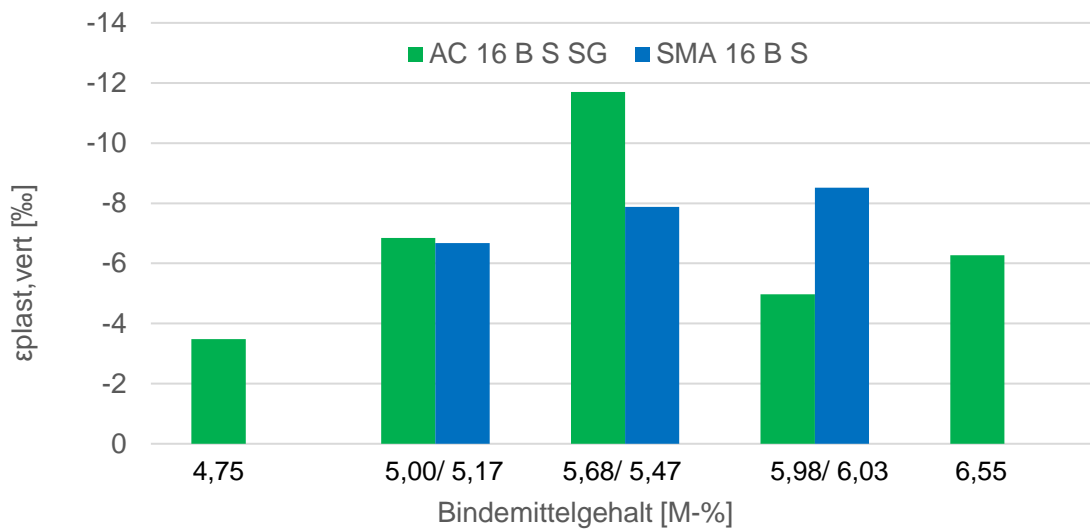


Abbildung 23: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei  $T=50^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,20 \text{ N/mm}^2$

### *Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung*

Die Triaxialprüfanlage der TU Dresden ermöglicht es, Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm in einem triaxialen Spannungszustand zu prüfen. Die Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung werden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen durchgeführt. Die axiale Oberspannung wird während des Versuches nach jeweils 30.000 Lastwechsel erhöht. Die Prüffrequenz der axialen und radialen Belastung beträgt jeweils 10 Hz.

Die Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung wurden ausschließlich für jeweils eine optimierte Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtvariante und an einer Asphalttrag-schichtvariante durchgeführt. Durch den Beschluss des Projektbegleitenden Ausschusses wurden folgende Asphaltgemische untersucht:

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 7,0 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,0 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, feine Korngrößenverteilung, 4,5 M-% Bindemittelgehalt mit dem Straßenbaubitumen 50/70

Die Versuchsergebnisse dienen hauptsächlich als Grundlage für die Prognoserechnungen der Spurrinnenbildung und somit zu Vergleichszwecken der Ergebnisse der Prognoserechnungen zwischen dem Triaxialversuch und dem einaxialen Druck-Schwellversuch am schlanken bzw. am gedrunenen Probekörper.

In der nachfolgenden Abbildung ist das Ergebnis der Deckschichtgemische (Abbildung 24) dargestellt. Die geringsten plastischen Dehnungen wurden mit dem Triaxialversuch gemessen, gefolgt von dem Druckschwellversuch am schlanken Probekörper. Die größten plastischen Dehnungen wurden mit dem Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper gemessen.

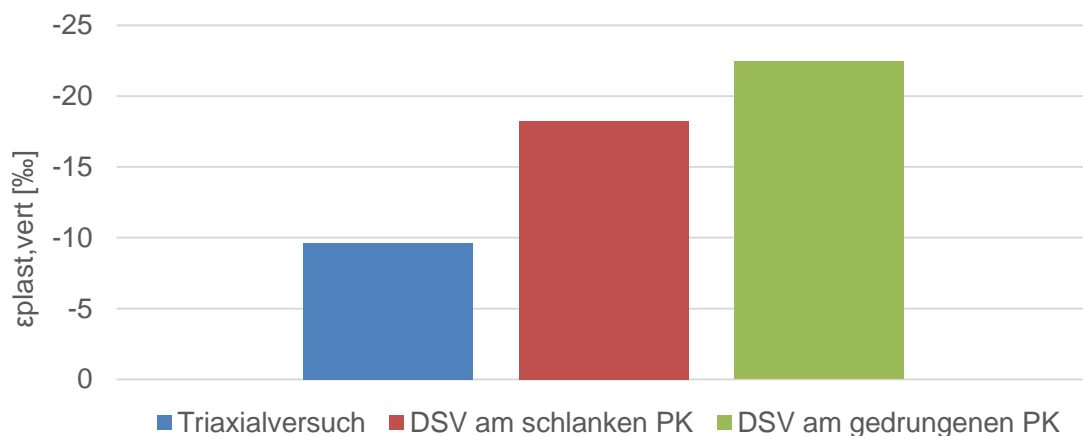


Abb. 24: Versuchsergebnisse des SMA 11 S mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten

### Zusammenfassung

Das Verformungsverhalten kann nur ungenügend über den Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB 25 B 1 angesprochen werden. Die Asphaltgemische werden nur bei einer Temperatur und einer Oberspannung geprüft und nicht wie bei den anderen Versuchen unter Variation der beiden Prüfbedingungen. Dies ist ebenfalls der Grund, dass eine Spurrinnenprognose anhand dieses Versuches nicht möglich ist. Der Triaxialversuch ist dagegen für eine Optimierung von mehreren Asphaltgemischen zu aufwendig, insbesondere in der Materialbeschaffung, der Probekörperherstellung und dessen Vorbereitung. Außerdem sind Triaxialanlagen in Deutschland relativ gering verbreitet. Somit bieten die Druck-Schwellversuche am schlanken bzw. am gedrunenen Probekörper die besten Voraussetzungen zur Beurteilung des Verformungsverhaltens. Der Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper benötigt zwar eine einfachere Versuchstechnik und besitzt ein deutlich geringeres Materialaufkommen, aber die Versuchsergebnisse weisen eine höhere Streuung auf. In Abbildung 25 sind die Ergebnisse des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper eines Asphaltgemisches bei derselben Temperatur und derselben Oberspannung dargestellt. Die Differenz der erhaltenen plastischen Dehnung beträgt dabei circa  $\Delta\varepsilon = 9\%$ . Diese Schwankungen der Versuchsergebnisse verursachen dabei auch eine schlechtere Bestimmung der Materialparameter, die für die Approximation der Impulskriechkurven benötigt werden.

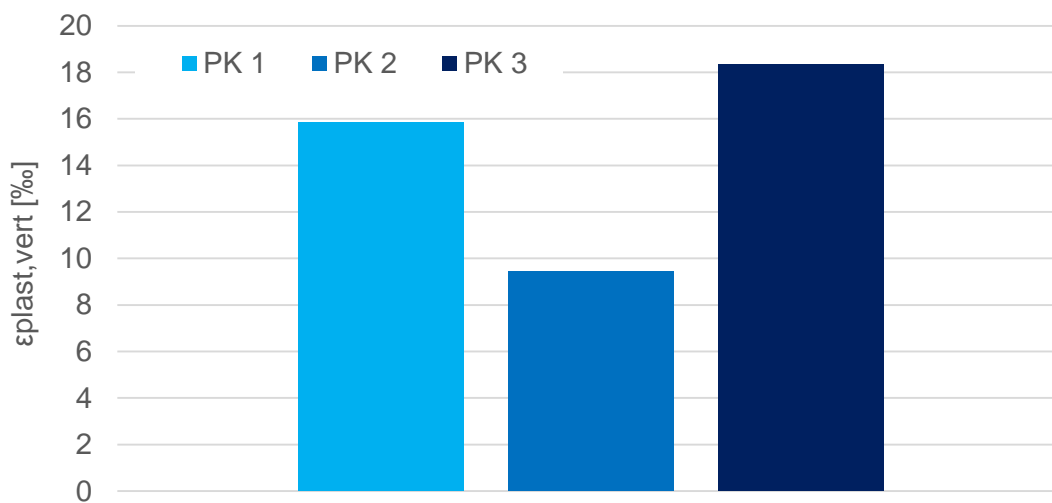


Abb. 25: Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung

Der Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper weist diese deutliche Streuung der Versuchsergebnisse nicht auf. Somit können die Materialparameter der Impulskriechkurve mit einer höheren Sicherheit bestimmt werden. Aus diesen Überlegungen sollte das Verformungsverhalten über den Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper ermittelt werden.

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 5 wurden erreicht.**

### Arbeitspaket 6: Einfluss auf das Griffigkeitsverhalten

Der Einfluss der Zusammensetzungen der Asphaltdeckschichtvarianten auf das Griffigkeitsverhalten soll mit dem Darmstädter Polierverfahren [Bald 2004] getestet und beurteilt werden. Dazu werden die Probekörper in die Schnellpoliermaschine eingespannt und bei Raumtemperatur mit Grob- und anschließend mit Feinkorund jeweils für drei Stunden poliert. Dabei werden Probekörper mit unterschiedlichen Bindemittelgehalten und einer Korngrößenverteilung in einem Prüfgang getestet. Anschließend wird die Griffigkeitsprüfung mit Hilfe des SRT-Pendelgerätes durchgeführt. Die Voruntersuchungen zeigten jedoch, dass bei einem Prüfgang mit jeweils drei Stunden Poliervorgang keine signifikanten Änderungen des Reibungswertes der Asphaltprobekörper feststellbar waren. Daher wurde beschlossen die Poliervorgänge mit Grob- und Feinkorund auf jeweils sechs Stunden zu verlängern um somit den Einfluss der Asphaltzusammensetzung der Deckschichten auf das Griffigkeitsverhalten genauer beurteilen zu können.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Versuchsergebnisse für die beiden Korngrößenverteilungen dargestellt. Aus den Versuchsergebnissen ist kein Einfluss der Korngrößenverteilung oder der Variation des Bindemittelgehaltes der Asphaltdeckschichten auf das Griffigkeitsverhalten zu erkennen. Des Weiteren werden die Reibungswerte der Varianten nach der Polierbeanspruchung größer. Dies würde bedeuten, dass die Griffigkeit sich ebenfalls verbessert, was aber die Realität nicht wieder spiegelt. Aus diesen Gründen ist das Verfahren zur Beurteilung des Griffigkeitsverhaltens von Asphaltdeckschichten ungeeignet.

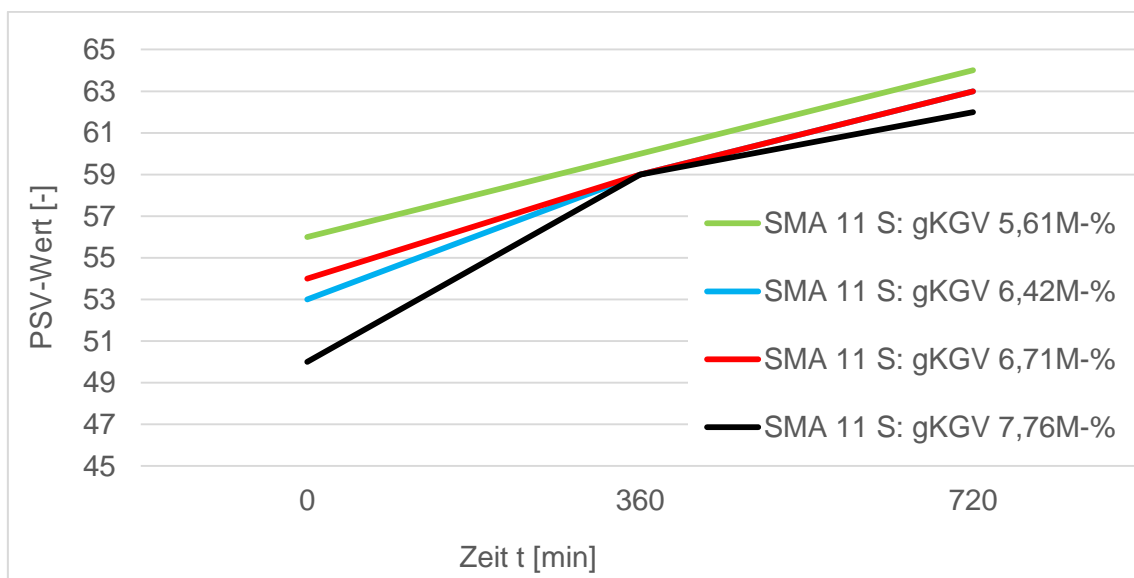


Abb. 26: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: grobe KGV

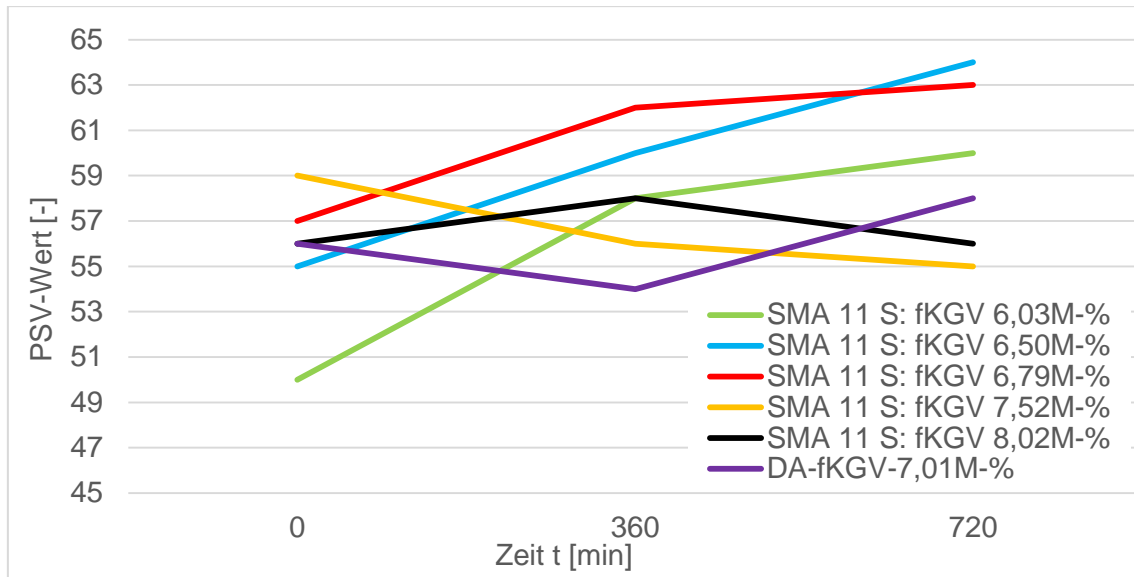


Abb. 4-27: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: feine KGV

**Das Griffigkeitsverhalten der Asphaltdeckschichten konnte nicht beurteilt werden, da dafür das Darmstädter Polierverfahren ungeeignet ist.**

#### **Arbeitspaket 7: statistische Auswertung der Versuchsergebnisse**

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen der Asphaltgemische wurden anhand von statistischen Analyseverfahren ausgewertet. Dabei galt die Annahme, dass die Ergebnisse jeder Variante der Asphaltgemische einer Grundgesamtheit angehören. Die Grundgesamtheit bezeichnet die Menge aller potentiellen Untersuchungsobjekte mit gleichen Voraussetzungen für eine bestimmte Fragestellung. Als Stichproben aus der Grundgesamtheit konnten die Messergebnisse angesehen werden. Anhand der Stichproben wurden Untersuchungen zur Gleichheit der Varianzen und regressionsanalytische Verfahren durchgeführt.

Die Nullhypothese  $H_0$  bei der statistischen Auswertung bezeichnet die Annahme, dass zwei Grundgesamtheiten hinsichtlich eines Parameters übereinstimmen [Sachs 1999]. Die statistischen Signifikanztests können keine Übereinstimmungen zwischen Parametern feststellen, sondern lediglich Unterschiede mit einer vorgesehenen statistischen Sicherheit aufdecken. Die Irrtumswahrscheinlichkeit begrenzt dabei bei Ablehnung der Nullhypothese eine Fehleinschätzung [Dragon 2015]. Somit wird bei den statistischen Analyseverfahren die Alternativhypothese  $H_1$  überprüft, die einen Unterschied zwischen zwei Grundgesamtheiten annimmt [Dragon 2015]. Das Ziel der Verfahren ist, Unterschiede der Grundgesamtheiten zu identifizieren, die nicht auf Zufälligkeit, sondern auf einen tatsächlichen Unterschied zurückzuführen ist. Die verwendete Irrtumswahrscheinlichkeit wird, nach der im Bauwesen gängigen Irrtumswahrscheinlichkeit, auf  $\alpha = 5\%$ , festgelegt [Dragon 2015]. Die Nullhypothese wird verworfen und die Alternativhypothese angenommen, wenn aufgrund des Signifikanz-

tests mit dem  $\alpha$ -Niveau ein Unterschied zwischen den Grundgesamtheiten zu vermuten ist. Dabei bedeutet die Irrtumswahrscheinlichkeit mit einem 5 %-Niveau, dass in 5 % aller Stichproben die Nullhypothese fälschlicherweise abgelehnt wurde [Sachs 1999].

Zunächst wurde überprüft, ob zwei oder mehrere unabhängige Stichproben einer gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Dazu erfolgten die Untersuchungen der Varianzen auf Homogenität mit Hilfe des Tests nach der Methode von Bartlett [Sachs 1999]. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug bei diesem Test ebenfalls 5 %.

Zur Untersuchung von Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen wurde die Regressionsanalyse verwendet. Diese diente dazu, Zusammenhänge zu erklären und Werte der abhängigen Variablen zu schätzen [Reinhardt 2003]. Dazu erfolgte zunächst die Formulierung der Modellgleichung für die Regressionsanalyse. Anschließend konnten die Regressionsparameter der Gleichung geschätzt werden.

In dieser Arbeit war der Vergleich der geschätzten Regressionsparameter der Funktionen von Interesse. Dadurch konnte ermittelt werden, ob sich die Asphaltzusammensetzung auf das Materialverhalten statistisch signifikant auswirkt. Die analytischen Verfahren können allerdings nur für Betrachtungen von linearen Funktionen angewendet werden, daher war es notwendig Funktionen, die dieser Form nicht entsprachen zu transformieren. Die notwendige Transformation der Funktion wird in dem jeweiligen Abschnitt genauer erklärt. Die Voraussetzung für die Verwendung der Regressionsanalyse stellte dabei die Homogenität der Varianzen der Residuen dar. Falls eine Varianzheterogenität festgestellt wurde, mussten die unabhängigen und abhängigen Variablen der Stichprobe mit Hilfe des Aitken-Schätzers transformiert werden [Toutenburg 2003].

Zunächst war die Frage zu klären, ob die Steigungen der linearen Funktionen sich signifikant unterscheiden [Toutenburg 2003; Milliken 2002]. Die Überprüfung erfolgte anhand der Teststatistik aus Gleichung 1. Die genaue Herleitung ist in [Dragon 2015] beschrieben.

$$\hat{F}_{\beta_1} = \frac{\frac{SSR_{\beta_1} - SSR}{v_1}}{\frac{SSR}{v_2}} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:

$\hat{F}_{\beta_1}$  Zufallsvariable

SSR Residuenquadratsumme im transformierten vollen Modell mit q Steigungen und q Achsenabschnitten

$SSR_{\beta_1}$  Residuenquadratsumme im transformierten reduzierten Modell mit einer Steigung und q Achsenabschnitten

$v_1, v_2$  Freiheitsgrade

Die Nullhypothese  $H_0$  wurde abgelehnt, falls  $\hat{F}_{\beta 1} > F_{(\alpha, v_1, v_2)}$  ist.

Als nächstes wurde überprüft, ob die Achsenabschnitte der linearen Funktionen sich signifikant unterscheiden [Toutenburg 2003; Milliken 2002]. Die Überprüfung erfolgte anhand der Teststatistik aus Gleichung 2. Die genaue Herleitung ist in [Dragon 2015] beschrieben.

$$\hat{F}_{\beta 0} = \frac{\frac{SSR_{\beta 0} - SSR_{\beta 1}}{v_1}}{\frac{SSR_{\beta 1}}{v_2}} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit:

$\hat{F}_{\beta 0}$  Zufallsvariable

$SSR_{\beta 1}$  Residuenquadratsumme im transformierten reduzierten Modell mit einer Steigungen und q Achsenabschnitten

$SSR_{\beta 0}$  Residuenquadratsumme im transformierten reduzierten Modell mit einer Steigung und einem Achsenabschnitten

$v_1, v_2$  Freiheitsgrade

Die Nullhypothese  $H_0$  wurde abgelehnt, falls  $\hat{F}_{\beta 0} > F_{(\alpha, v_1, v_2)}$  ist.

#### *Statistische Auswertung der Untersuchungen zum Steifigkeitsverhalten*

Die Linearisierung der Hauptkurve der Asphaltgemische ist in der TP Asphalt-StB Teil 26, Entwurf 2018, beschrieben.

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-1 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Änderung der Sieblinie bei ähnlichen Bindemittelgehalten die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung abgelehnt werden muss. Außerdem ist der Unterschied der Achsenabschnitte in dem Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,42 M-% bis 6,79 M-% bei Verwendung der anderen Sieblinie statistisch signifikant.

Bei der groben Korngrößenverteilung bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes eine statistisch signifikante Änderung der Steigung und der Achsenabschnitte in der Modellgleichung. Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann nur im Vergleich der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% und den Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 6,42 M-% bzw. 6,71 M-% beibehalten werden.

Bei der feinen Korngrößenverteilung besitzt lediglich die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,79 M-% eine unterschiedliche Steigung gegenüber den anderen Varianten. Der Anstieg des Bindemittelgehaltes bewirkt einen signifikanten Unterschied des Achsenabschnittes der linearisierten Gleichungen bis zu einem Bindemittelgehalt von

6,79 M-%. Die Verwendung des steiferen Bitumens 10/40-65A bewirkt einen signifikanten Unterschied der Steigung und des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 5: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 6: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten



Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-3 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-4 dargestellt. Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung bzw. auf die Achsenabschnitte zu erkennen.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | -                      | X                            |                             |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      | X                            |                             |

Tab. 7: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | -                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      |                              | X                           |

Tab. 8: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten

Bei dem Asphaltbindergemisch nach dem Splittmastixprinzip besitzt der Bindemittelgehalt keinen signifikanten Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung. Im Vergleich zu den anderen Varianten muss bei dem Asphaltgemisch mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-% die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung abgelehnt werden.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden mit der Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-%. Die Erhöhung des Bindemittelgehaltes bewirkt allerdings eine Änderung des Achsenabschnittes und die Nullhypothese muss somit verworfen werden. Die Ausnahme stellt wieder die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% dar. Die Verwendung des Bitumens 25/55-55A bewirkt einen signifikanten Unterschied des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

#### *Statistische Auswertung der Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten*

Die Ermüdungsfunktion entspricht einer Potenzfunktion und muss somit in eine lineare Funktion transformiert werden. Dazu werden die elastischen Anfangsdehnungen  $\epsilon_{ele, anf}$  und die dazugehörigen ermittelten Lastwechselzahlen  $N_{Makro}$  logarithmiert.

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-5 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-6 dargestellt.

Die Variation der Sieblinie bewirkt eine signifikante Änderung der Steigung der Modellgleichung und die Alternativhypothese muss angenommen werden. Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei der Variation der Korngrößenverteilung erst bei sehr hohen Bindemittelgehalten (7,76 M-% und 8,02 M-%) beibehalten werden. Die Variation der Sieblinie besitzt keinen statistisch signifikanten Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann mit Zunahme des Bindemittelgehaltes bei der groben Korngrößenverteilung beibehalten werden. Dagegen muss die Alternativhypothese, die einen Unterschied des Achsenabschnittes beinhaltet, mit Zunahme des Bindemittelgehaltes angenommen werden, mit der Ausnahme bei dem Vergleich der Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-% und 7,76 M-%.

Bei der feinen Korngrößenverteilung kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden. Die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 8,02 M-% besitzt, im Vergleich zu den anderen Varianten (mit Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-%), eine unterschiedliche Steigung. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss bei der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-% stets ablehnt werden. Ansonsten ist kein genauer Trend zum Einfluss des Bindemittelgehaltes zum Achsenabschnitt der Modellgleichung fest zu stellen. Die Verwendung des Bitumens 10/40-65A bewirkt nur die Ablehnung der Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | X                      | X                            |                             |

Tab. 9: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | X                      |                              | X                           |

Tab. 10: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten

Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-7 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-8 dargestellt.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      | X                            |                             |

Tab. 11: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      | X                            |                             |

Tab. 12: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten

Bei der Variation der Sieblinie kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung beibehalten werden. Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Achsenabschnitte zu erkennen.

Die Zunahme des Bindemittelgehaltes besitzt bei den Bindergemischen nach dem Splittmastixprinzip keinen statistischen signifikanten Einfluss auf die Steigung und den Achsenabschnitten in der Modellgleichung.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden. Lediglich die

Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% besitzt einen signifikanten Unterschied der Steigung zu den anderen Varianten. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte kann mit Zunahme des Bindemittels bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% beibehalten werden. Bei der weiteren Erhöhung des Bindemittels muss die Alternativhypothese angenommen werden. Die Verwendung des Bitumens 25/55-55A besitzt keinen signifikanten Einfluss auf die Steigung und des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

#### *Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse zum Verformungsverhalten*

In diesem Abschnitt wird mit Hilfe der regressionsanalytischen Verfahren der Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf den Materialparameter A der Impulskriechkurve untersucht. Da diese Funktion keine lineare Form aufweist, ist diese in eine lineare Form zu transformieren. Dazu werden die elastischen Anfangsdehnungen  $\epsilon_{ele,anf}$  und der dazugehörige Materialparameter A logarithmiert.

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-9 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-10 dargestellt.

Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen. Unter Variation der Sieblinie muss die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt werden.

Bei der groben Korngrößenverteilung besitzt die Zunahme des Bindemittelgehaltes keinen Einfluss auf die Steigung der Modellgleichung. Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes wird bei der groben Korngrößenverteilung die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt.

Bei der feinen Korngrößenverteilung, unter Zunahme des Bindemittelgehaltes, kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung beibehalten werden, mit Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-%. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss mit Zunahme des Bindemittels bei der feinen Korngrößenverteilung verworfen werden. Die Verwendung des Bitumens 10/40-65A besitzt nur einen signifikanten Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      | X                            |                             |

Tab. 5-9: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-10: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-11 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-12 dargestellt.

Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss unter Variation der Sieblinie abgelehnt werden.

Bei den Bindergemischen nach dem Splittmastixprinzip kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden. Dagegen muss die Alternativhypothese, die einen Unterschied der Achsabschnitte beinhaltet, angenommen werden.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton unter Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden (mit der Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-%). Die Zunahme des Bindemittelgehaltes besitzt einen Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung. Allerdings kann die Nullhypothese der Gleichheit der Achsabschnitte bei dem Vergleich der Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 4,75 M-% und 5,00 M-% und den Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% und 5,98 M-% beibehalten werden. Die Verwendung des Bitumen 25/55-55A beeinflusst sowohl die Steigung, als auch den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      |                              | X                           |

Tab. 5-11: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      |                              | X                           |

Tab. 5-12: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-13 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-14 dargestellt.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      | X                            |                             |

Tab. 5-13: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)



| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-14: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)

Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen. Unter Variation der Sieblinie muss die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt werden.

Die Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkt eine Veränderung der Steigung in der Modellgleichung (Ausnahmen: siehe Tabelle 5-13). Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes wird bei der groben Korngrößenverteilung die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt.

Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes wird die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung beibehalten und der Gleichheit der Achsenabschnitte verworfen. Die Ausnahme stellt in beiden Fällen die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-% dar. Die Verwendung des Bitumens 10/40-65A bewirkt nur eine signifikante Änderung des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-15 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-16 dargestellt.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss unter Variation der Sieblinie abgelehnt werden. Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen.

Bei den Bindergemischen nach dem Splittmastixprinzip muss die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung mit Zunahme des Bindemittelgehaltes (mit einer Ausnahme) abgelehnt werden. Dagegen muss die Alternativhypothese, die einen Unterschied der Achsenabschnitte beinhaltet, angenommen werden.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton unter Zunahme des Bindemittelgehaltes zunächst beibehalten werden. Ab einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% muss die Alternativhypothese angenommen werden. Der Bindemittelgehalt besitzt einen Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung, mit der Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-%. Die Verwendung des Bitumen 25/55-55A beeinflusst den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      | X                            |                             |

Tab. 5-15: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-16: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 7 wurden erreicht.**

### **Arbeitspaket 8: Prognoserechnungen inkl. Weiterentwicklung der Software für die Prognoserechnungen**

Mit den Versuchsergebnissen wurden Prognoserechnungen durchgeführt, welche die Auswirkungen der Asphaltzusammensetzung auf Erhaltungs-/Erneuerungsintervalle verdeutlichen können. Die Prognoserechnungen sollen zur Optimierung auf die Kriterien Spurrinnenbildung und Ermüdungsrissbildung innerhalb der Asphaltdeckschicht sowie der Asphaltbinderschicht dienen. Anhand der Versuchsergebnisse und dieser Prognoserechnungen sollen sowohl eine verbesserte Methode zur Bestimmung der Asphaltzusammensetzung als auch Konzeptionen für Asphaltgemische entwickelt werden, welche hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anforderungen optimiert sind.

Die Parameter der Prognoserechnungen wurden wie folgt gewählt:

- geplante Nutzungsdauer zur Festlegung der Verkehrsbelastung 30 Jahre,
- Achslastkollektiv BAB Fernverkehr [AP Klima und Verkehr],
- normierte charakteristische Temperaturprofile, Temperaturkartenzone 5 [AP Klima und Verkehr],
- B-Zahl: 257,9 Mio., Belastungsklasse BK 100,
- Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus (BK 100) 70 cm.

Der Befestigungsaufbau wurde nach den RStO 12 Tabelle/Zeile 1 ausgewählt:

- 4 cm Asphaltdeckschicht
- 8 cm Asphaltbinderschicht
- 22 cm Asphalttragschicht
- 36 cm Frostschuttschicht.

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen wurden wegen noch nicht erfolgter Kalibrierung bzw. Validierung der Verfahren als Relativwerte angegeben. Es erfolgte die Festlegung des Ergebnisses des nachfolgenden Befestigungsaufbaus als Referenzwert:

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 6,79 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,00 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, 4,39 M-% Bindemittelgehalt (50/70).

#### *Prognoserechnung der Ermüdungsrissbildung*

Die Prognoserechnungen der Ermüdungsrissbildung beschränkten sich auf die Betrachtung der Rissbildung in der Asphaltdeckschicht bzw. in der Asphaltbinderschicht. Die Nachweisführung für die Deck- und Binderschicht erfolgte in Analogie zu dem Verfahren der RDO Asphalt 2009 für die Tragschicht.

#### *Maßgebender Nachweispunkt der Asphaltdeckschicht*

In der Asphaltdeckschicht entstehen neben der Radaufstandsfläche vertikale Zugdehnungen, die Risse verursachen können. Die größten Zugdehnungen treten dabei 165 mm neben der Lastachse an der Oberseite der Asphaltdeckschicht auf. In Abbildung 28 ist der Verlauf der vertikalen Dehnungen im Straßenquerschnitt dargestellt. Die kryogenen Zugspannungen werden bei diesem Nachweis nicht mit betrachtet, da diese in horizontaler Richtung entstehen und der Einfluss auf die vertikalen Zugdehnungen nicht ausreichend bekannt ist.

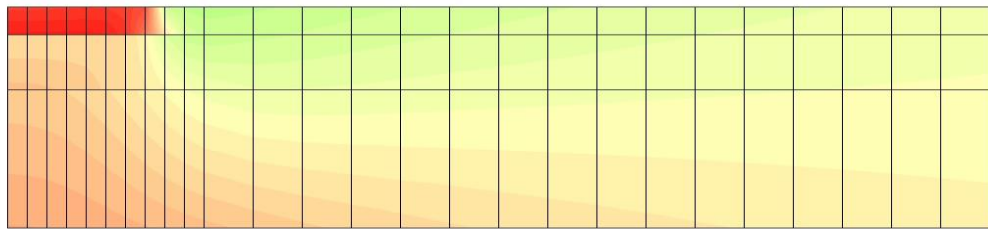


Abb. 28: Verlauf der vertikalen Dehnungen im Straßenquerschnitt

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltdeckschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen sind in Abbildung 29 zusammengefasst.

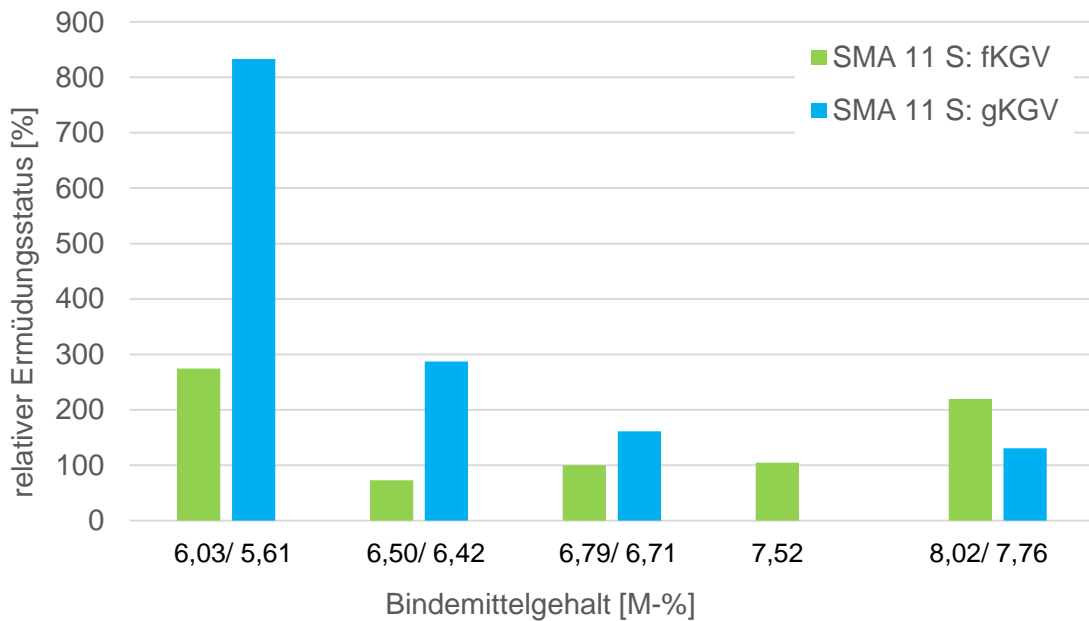


Abb. 29: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren

Aus den Ergebnissen der Prognoserechnungen ist ersichtlich, dass die feine Korngrößenverteilung bei gleichem Bindemittelgehalt (mit Ausnahme von 8,0 M-%) des SMA 11 S einen deutlich geringeren Ermüdungsstatus aufweist als die grobe Sieblinie. Die feine Korngrößenverteilung besitzt den geringsten Ermüdungsstatus bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Bei weiterer Erhöhung des Bindemittelgehaltes verschlechtert sich das Ermüdungsverhalten der Deckschicht allmählich. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes über den gesamten untersuchten Bereich eine Verringerung (also Verbesserung) des Ermüdungsstatus bei den Deckschichtvarianten mit der groben Korngrößenverteilung.

#### *Maßgebender Nachweispunkt der Asphaltbinderschicht*

Bisher wurde bei den Prognoserechnungen ein vollständiger (starrer) Verbund zwischen allen Asphalt-schichten angenommen. Mit dieser Annahme entstehen im Bereich der Lastachse keine und nur weit außerhalb der Lasteintragungsfläche (1...2 m Abstand) nur unmaßgebende horizontal gerichtete Zugdehnungen (Biegezug) in der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht. Jedoch zeigten Versuche zum Schichtenverbund, dass starrer Verbund in der Praxis nie erreicht wird [Wellner 2016]. Daher wurde für die weiteren Prognoserechnungen zur Ermüdungsrissbildung zwischen der Asphaltdeck- und der Asphaltbinderschicht und ebenfalls zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht abgeminderter Schichtenverbund nach den Empfehlungen bei der Abwicklung von Bauverträgen bei Anwendung der RDO Asphalt [EAB RDO] angenommen. Dadurch entstehen horizontale Zugdehnungen an der Unterseite der Asphaltbinderschicht (Abbildung 30). Das Maximum dieser Dehnungen tritt innerhalb der Lastachse auf. Die kryogenen Dehnungen werden bei dieser Betrachtung in Analogie zu den RDO Asphalt [RDO 09] bei jedem 2. Lastwechsel im Oberflächentemperaturbereich  $T \leq 5^\circ\text{C}$  auf die zur Nachweisführung angesetzten Dehnungen aus der Belastung addiert.

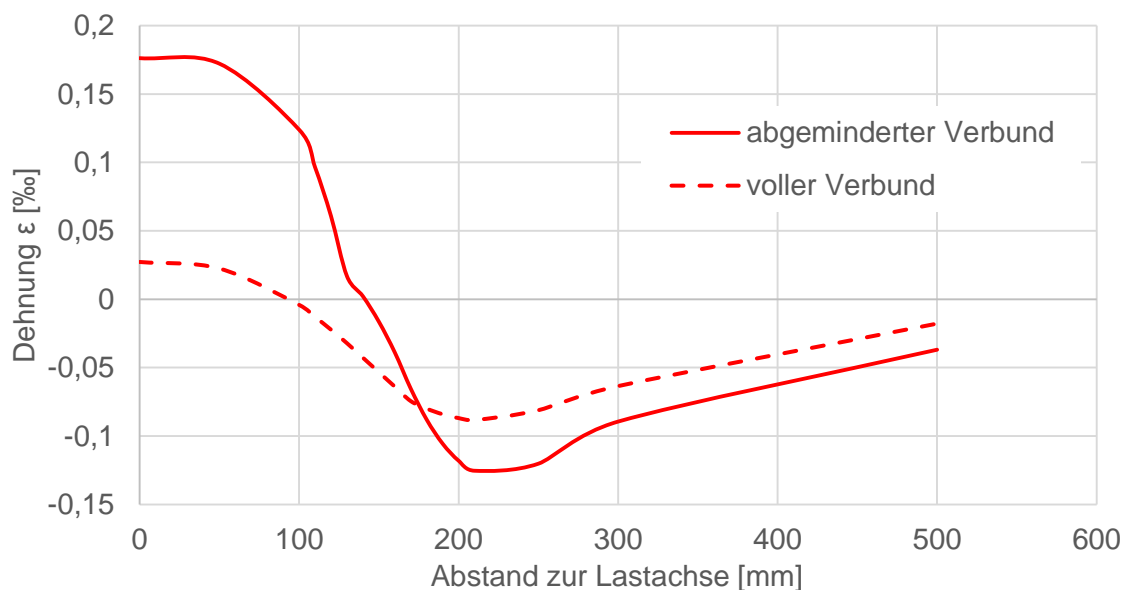


Abb. 30: Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltbinderschicht bei starren Verbund und abgeminderten Verbund

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltbinderschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen sind in Abbildung 31 zusammengefasst.

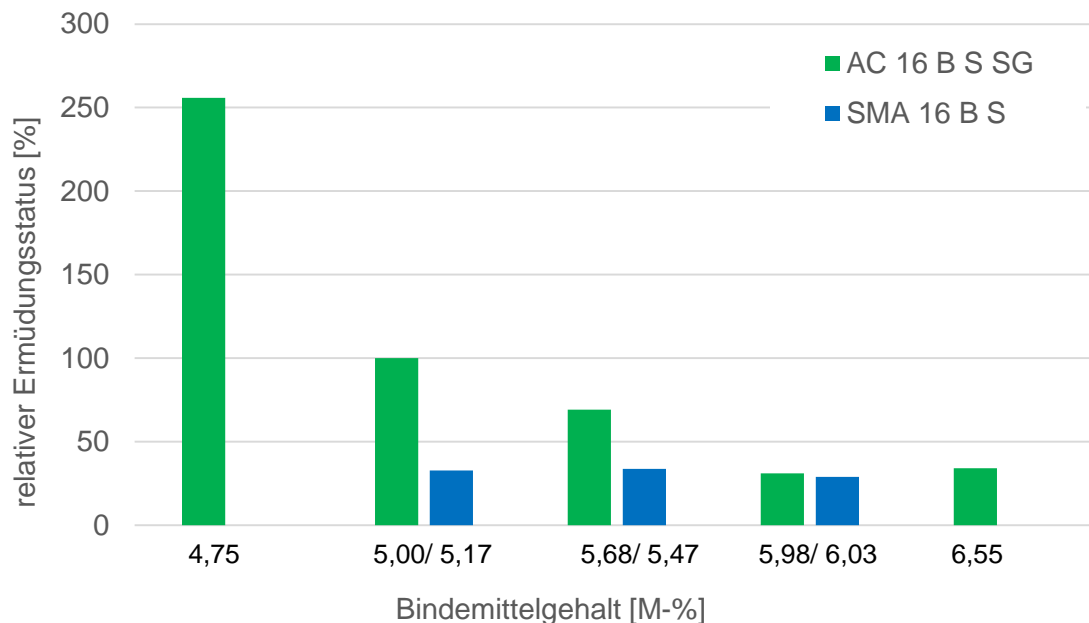


Abb. 31: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschichtgemische nach 30 Jahren

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen zeigen, dass die Variante SMA 16 B S bei gleichem Bindemittelgehalt einen geringeren Ermüdungsstatus aufweist als die Varianten des AC 16 B S SG. Die feine Korngrößenverteilung erzeugt den geringsten Ermüdungsstatus bei einem Bindemittelgehalt von 5,98 M-%. Bei der weiteren Zugabe an Bitumen verschlechtert sich geringfügig das Ermüdungsverhalten wieder. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes keine Veränderung des Ermüdungsstatus bei den Varianten des SMA 16 B S. Im untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes ergibt sich das bessere Ermüdungsverhalten bei den Varianten der größeren Korngrößenverteilung (SMA 16 B S).

#### *Prognoserechnung der Spurrinnenbildung*

In [Dragon 2015b; Kayser 2011] wird die Verfahrensweise der Spurrinnenprognose detailliert beschrieben. Die Versuchsauswertung ergab, dass die Materialparameter für die Berechnung der plastischen Dehnungen in der Asphaltbefestigung eine Temperaturabhängigkeit aufweisen. Somit wurde der Ansatz von [Dragon 2015b] mit der Temperaturabhängigkeit der Materialparameter erweitert. Die Impulskriechkurve wird durch die Gleichung und die Materialparameter werden über die Gleichung 3 bzw. 5 ermittelt. Die Bestimmung der Materialparameter und die Berechnung der Impulskriechkurven für die einzelnen Versuche je Variante der Asphaltgemische werden innerhalb eines Berechnungsprozess iterativ bestimmt.

$$\varepsilon_{plast} = A * \log(N + 1)^B \quad \text{Gleichung 3}$$

$$A = a_1 * (T - T_0) * |\varepsilon_{elast}|^{a_2} \quad \text{Gleichung 4}$$

$$B = b \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

$\varepsilon_{plast}$       bleibende axiale Dehnungen [%]

$\varepsilon_{elast}$       elastische Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel [%]

T              Prüftemperatur [°C]

$T_0$           Refernztemperatur, bestimmt durch Regression [°C]

A, B          Materialparameter [-]

$a_1, a_2, b$     Regressionsparameter [-]

Bei der nachfolgenden Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltdeckschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen, die anhand der Versuchsergebnisse mit dem Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper durchgeführt wurden, sind in Abbildung 32 zusammengefasst.

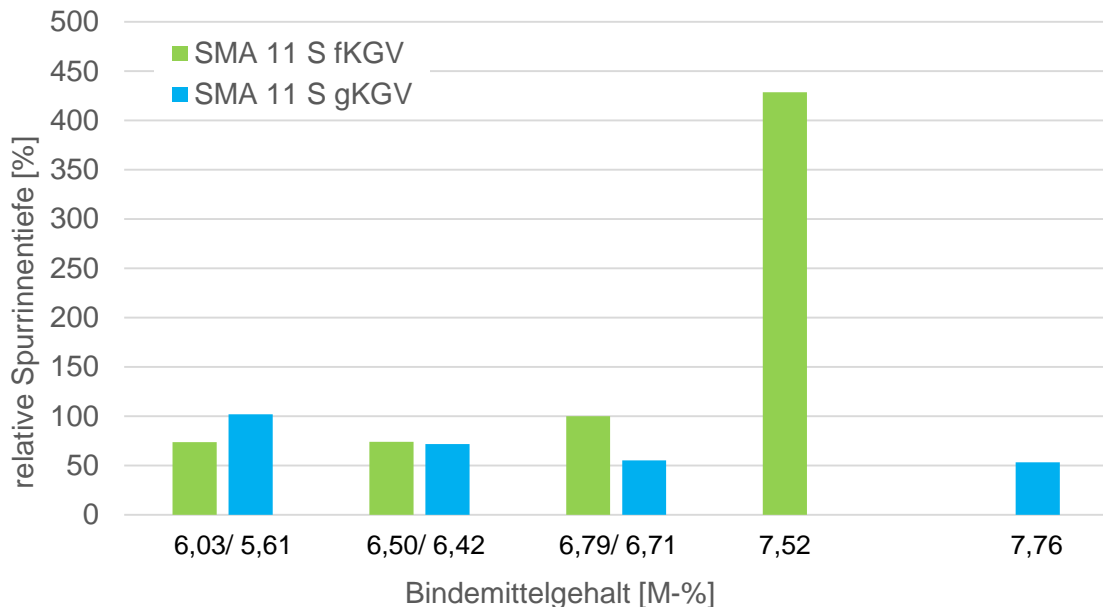


Abb. 32: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

Die Ergebnisse der Spurrinnenprognose belegen, dass die grobe Korngrößenverteilung im untersuchten Bindemittelbereich ein besseres Verformungsverhalten (Ausnahme bei einem Bindemittelgehalt von 5,61 M-%) aufweisen als die feine Korngrößenverteilung. Mit zunehmenden Bindemittelgehalt verbessert sich die Verformungsbeständigkeit der groben Korngrößenverteilung. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes bei der feinen Korngrößenverteilung eine Verschlechterung des Verformungsverhaltens.

Zunächst steigt die Spurrinnentiefe zwischen den Varianten des SMA 11 S nur allmählich an. Ab dem Bindemittelgehalt von 7,52 M-% kommt es zu einer deutlichen Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Aufgrund der geringen Anzahl an auszuwertenden Versuchsergebnissen und der damit verbundenen hohen Unsicherheit bei der Bestimmung der Materialparameter für die Variante des SMA 11 S, der feinen Korngrößenverteilung, mit einem Bindemittelgehalt von 8,02 M-% wird auf eine Darstellung des Ergebnis der Prognoserechnung verzichtet.

Bei der nachfolgenden Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltbinderschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen, die anhand der Versuchsergebnisse mit dem Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper durchgeführt wurden, sind in Abbildung 33 zusammengefasst.

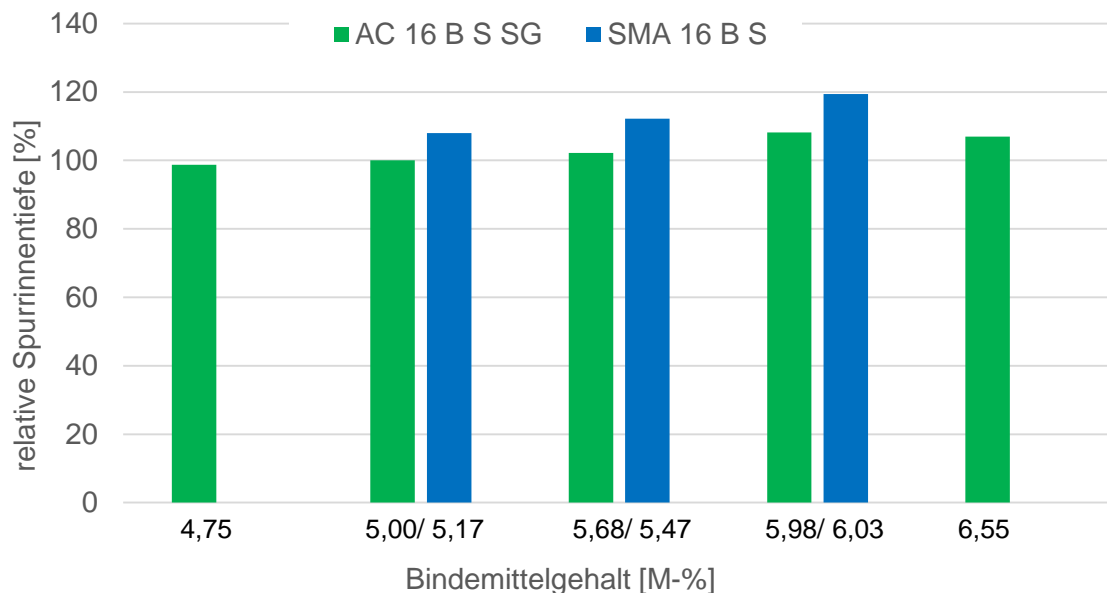


Abb. 33: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

Die Ergebnisse der Spurrinnenprognose zeigen, dass der stetig gestufte Asphaltbeton über den gesamten untersuchten Bindemittelbereich ein besseres Verformungsverhalten aufweist als die Varianten des SMA 16 B S. Dabei vergrößert sich die relative Spurrinne der Fahrbahnkonstruktion mit zunehmenden Bindemittelgehalt bei beiden Korngrößenverteilungen. Die Unterschiede der relativen Spurrinne zwischen den einzelnen Varianten sind aber deutlich geringer ausgeprägt als die der Deckschichtgemische. Damit besitzt die Binderschicht einen geringeren Einfluss auf die Spurrinnenanfälligkeit der Fahrbahnkonstruktion.

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 8 wurden erreicht.**



**Arbeitspaket 9: Verfahren für die Konzeption von Asphaltgemischen unter Anwendung von einfachen erweiterten und/oder GVO Asphaltprüfverfahren**

Die Optimierung der Asphaltgemische sollte anhand der Ergebnisse der Prognoserechnungen durchgeführt werden. Die Rissbeständigkeit von Asphaltgemischen ist von mehreren Eigenschaften des Asphaltes abhängig. So beeinflusst die Rissbeständigkeit eines Asphaltgemisches sein Steifigkeitsverhalten, sein Ermüdungsverhalten und sein Tieftemperaturverhalten. Für die Spurrinnenprognose werden als Materialkenngrößen die Hauptkurve und die Impulskriechkurven, die das Verformungsverhalten des Gemisches beschreiben, benötigt. Diese Eigenschaften können allerdings nur über gebrauchsvorhaltensorientierte (GVO) Prüfverfahren angesprochen werden.

Die Herangehensweise zur Optimierung der Asphaltgemische sollte wie folgt durchgeführt werden:

- mindestens 2-fache Variation der Sieblinie (eine 3-fache Variation ist empfehlenswert) bzw. Festlegung der Sieblinie um den Versuchsaufwand zu reduzieren
- 5-fache Variation des Bindemittelgehaltes  
Zur Bestimmung des mittleren Bindemittelbedarf kann das Verfahren nach Radenberg und Bedekovic [Radenberg 1996, Bedekovic 1957] für einige Gemische einen geeigneten Wert liefern. Zur endgültigen Festlegung sollte auch die Ergebnisse der Erstprüfung und der Mindestbindemittelgehalt der TL Asphalt 07 berücksichtigt werden.
- Versuchsdurchführung

|                                   |                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Spaltzug-Schwellversuch           | Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten |
| Abkühlversuch TP Asphalt-StB 46 A | Tieftemperaturverhalten              |
| DSV am schlanken PK               | Verformungsverhalten                 |

Tab. 21: notwendige Versuche zur Optimierung von Asphaltgemischen

- Prognoserechnung der Ermüdungsrissbildung und der Spurrinnenbildung
- Optimierung des Asphaltgemisches anhand der Prognoserechnungen  
Dabei sollte der optimale Bindemittelgehalt so festgelegt werden, dass die zugelassene Differenz der ZTV Asphalt-StB 07 von 0,3 M-% das Ermüdungs- und das Verformungsverhalten nur geringfügig beeinflusst. Die Ergebnisse zeigten, dass bei allen vier untersuchten Asphaltgemischen diese Bereiche des Bindemittelgehaltes festgestellt werden konnten.

Die Ergebnisse der Prognoserechnung zeigten, dass bei den Deckschichtgemischen die feine Korngrößenverteilung das bessere Ermüdungsverhalten, dagegen aber das schlechtere Verformungsverhalten, aufweist. Somit hängt die Entscheidung der Optimierung der Sieblinie von den jeweiligen Anforderungen der Strecke ab. In den meisten Fällen ist aber das Kriterium der Ermüdungsrissbildung maßgebend. Für den

SMA 11 S (Verwendung Grauwacke und PmB 25/55-55A) stellt somit die feine Korngrößenverteilung die optimierte Sieblinie dar.

Bei der Optimierung des Bindemittelgehaltes sollten beide Kriterien bewertet werden (Abbildung 34). Dadurch können Bereiche des Bindemittelgehaltes ermittelt werden, in denen die Schwankung des Bindemittelgehaltes keine negativen Auswirkungen besitzen. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt so zu wählen, dass aufgrund der zugelassen Differenz des Bindemittelgehaltes der ZTV Asphalt-StB 07 es weder zu Rissen noch zu Spurrinnen führen kann. Die feine Korngrößenverteilung besitzt im Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,5 M-% bis 7,5 M-% geringe Unterschiede des Ermüdungsstatus nach 30 Jahren. Außerhalb dieser Spanne erhöht sich das Risiko der Rissbildung während des Nutzungszeitraums deutlich. Der Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,0 M-% bis 7,0 M-% weist ein sehr ähnliches Verformungsverhalten auf. Dies bedeutet, dass in dem Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,5 M-% bis 7,0 M-% der SMA 11 S mit der feinen Korngrößenverteilung nur geringe Unterschiede im Ermüdungs- und Verformungsverhalten aufweist. Der optimale Bindemittelgehalt sollte so gewählt werden, dass mit der zulässigen Differenz der ZTV Asphalt-StB 07 dieser Bereich eingehalten wird. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des SMA 11 S (feine KGV)  $B_{opt} = 6,6 \text{ M-\%}$ .

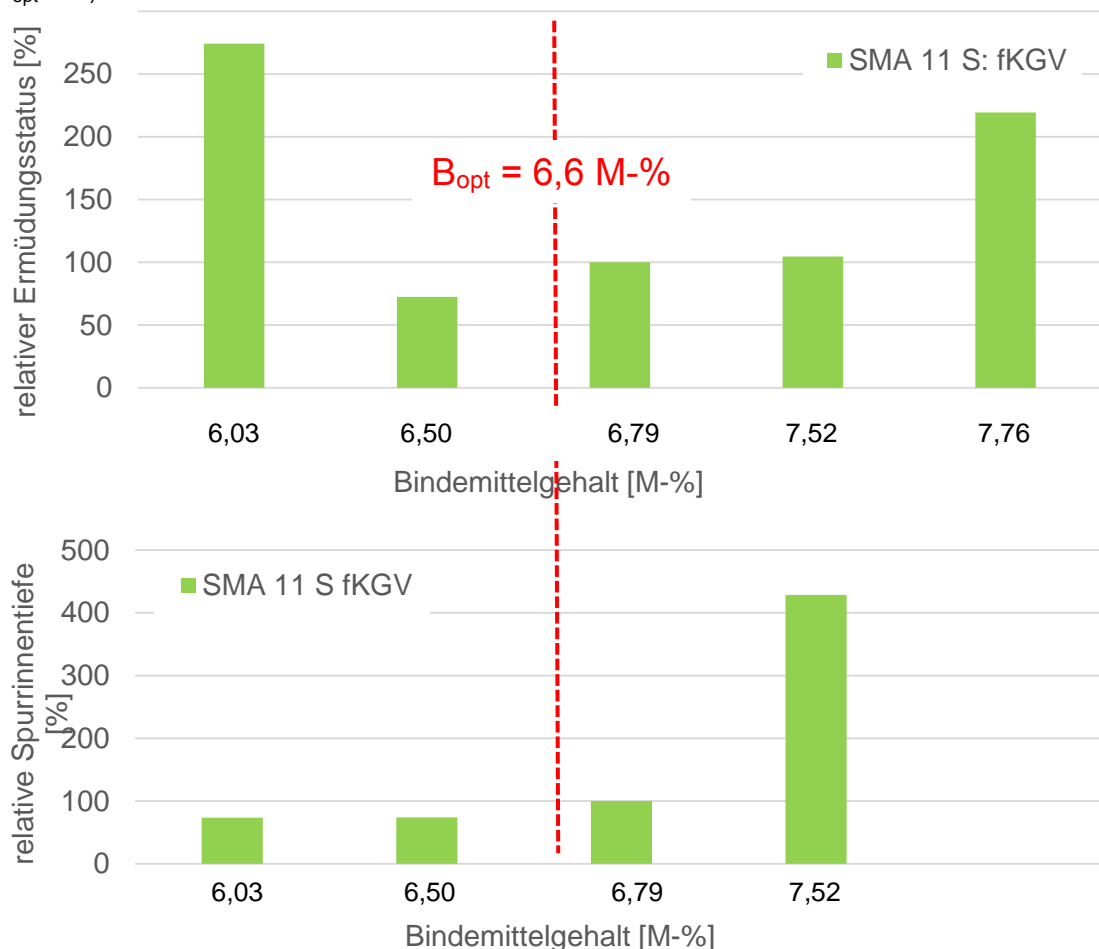


Abb. 34: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, feine KGV

In dem Bereich des Bindemittelgehaltes von 7,0 M-% bis 8,0 M-% weist der SMA 11 S mit der groben Korngrößenverteilung nur geringe Unterschiede im Ermüdungs- und Verformungsverhalten auf (Abbildung 35). Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des SMA 11 S (grobe KGV)  $B_{opt} = 7,4 \text{ M-}\%$ .

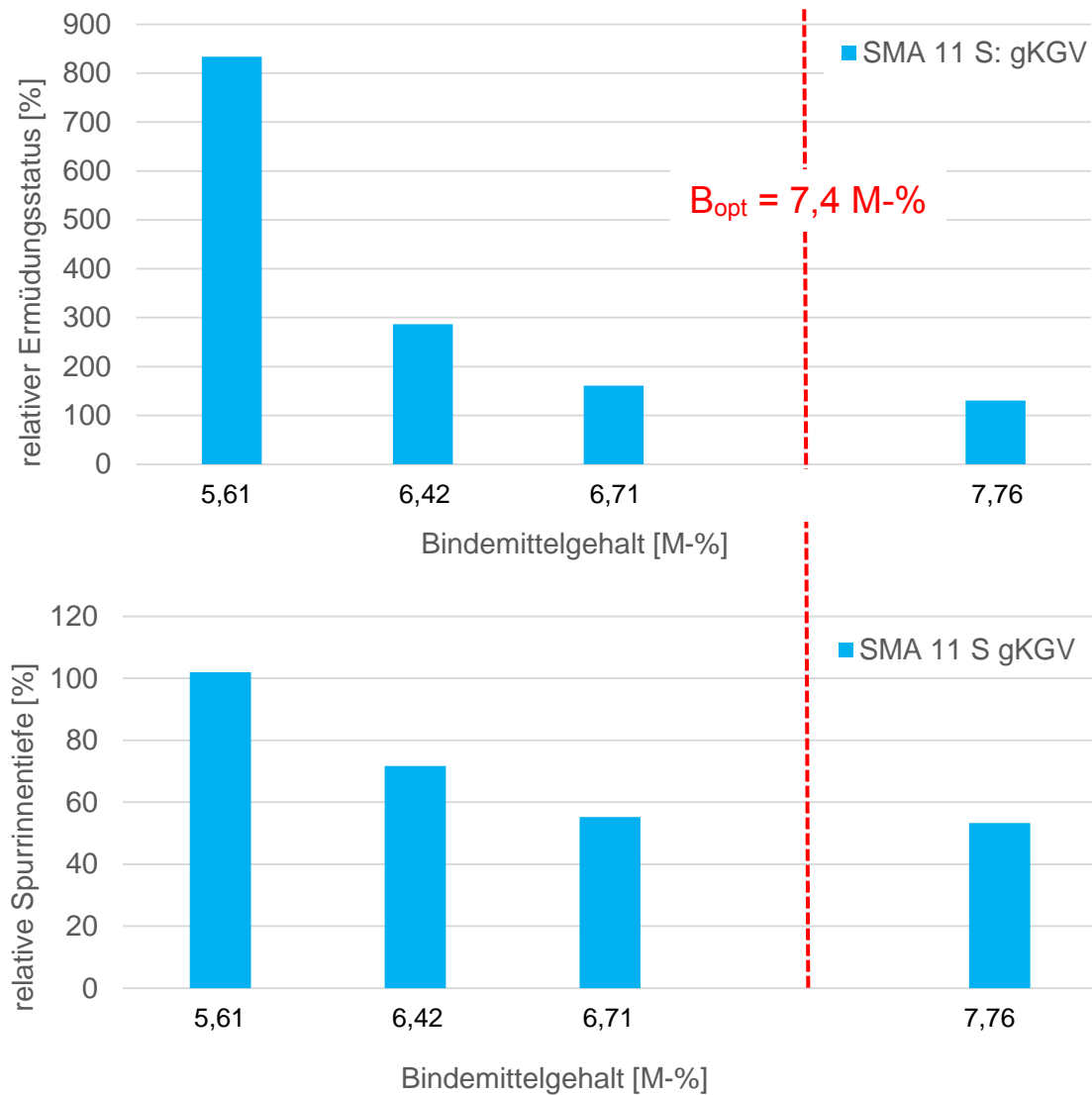


Abb. 35: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, grobe KGV

Die Ergebnisse der Prognoserechnung zeigten, dass bei den Binderschichtgemischen der SMA 16 B S ein deutlich besseres Ermüdungsverhalten im Vergleich zu dem AC 16 B S SG aufweist, dafür aber ein schlechteres Verformungsverhalten. Der Unterschied der Verformungsbeständigkeit zum stetig gestuften Asphaltbeton ist aber nur geringfügig schlechter, sodass die optimierte Sieblinie für die Binderschicht der SMA 16 B S darstellt.

Der SMA 16 B S besitzt im gesamten untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes geringe Unterschiede des Ermüdungsverhaltens und des Verformungsverhaltens. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des SMA 16 B S:  $B_{opt} = 5,5 \text{ M-}\%$  (Abbildung 36).

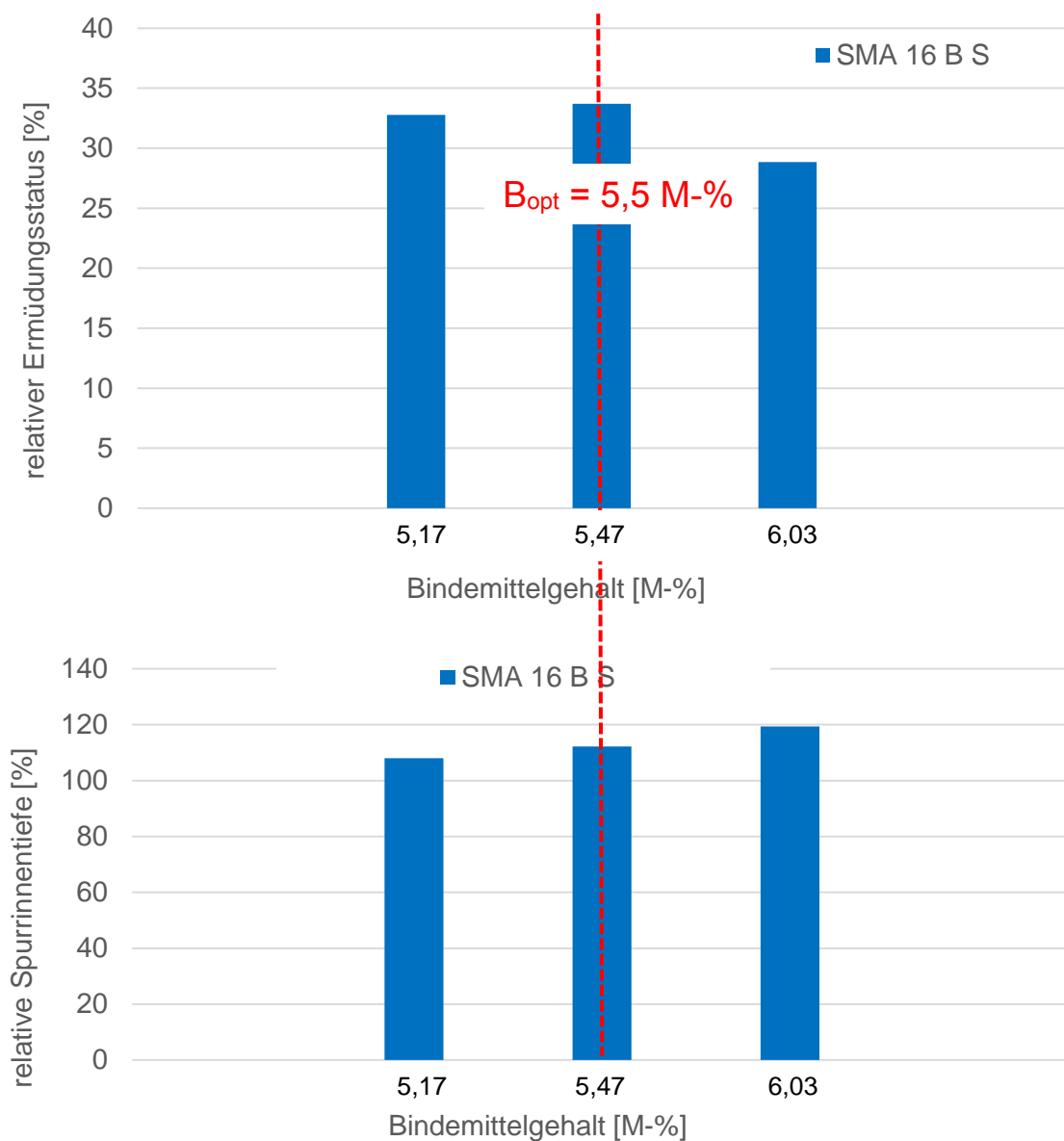


Abb. 36: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 16 B S

Der AC 16 B S besitzt im gesamten untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes geringe Unterschiede des Verformungsverhaltens (Abbildung 37). Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes verbessert sich allerdings das Ermüdungsverhalten und ist in dem Bereich von 6,0 M-% bis 6,5 M-% ähnlich. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des AC 16 B S SG:  $B_{opt} = 6,2 \text{ M-\%}$ .

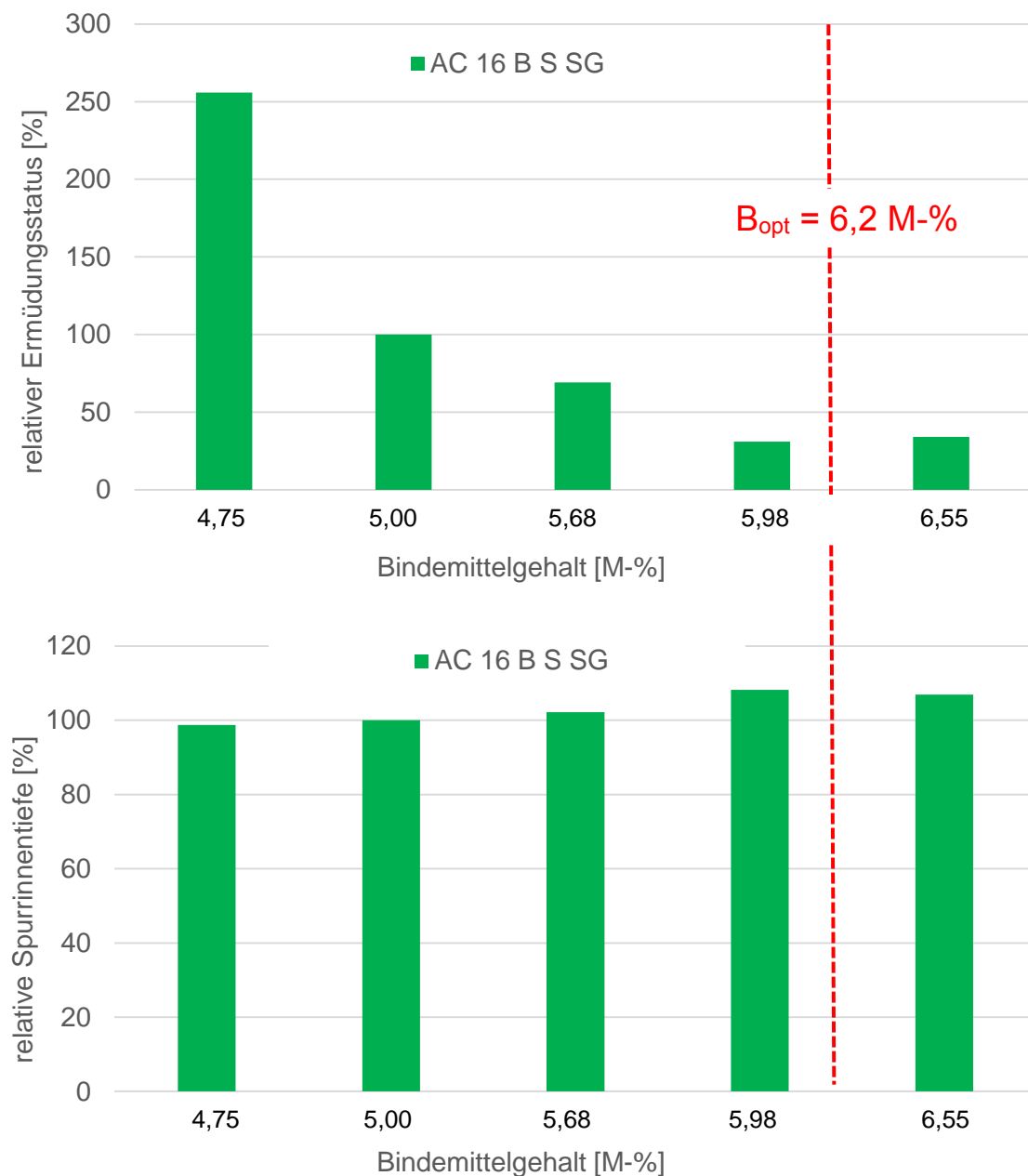


Abb. 37: Optimierung des Bindemittelgehaltes des AC 16 B S SG

Die Ergebnisse zeigten, dass mit Hilfe von gebrauchungsverhaltenorientierten Prüfverfahren und den Prognoserechnungen eine Optimierung von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtgemischen möglich ist. An allen untersuchten Gemischen konnte ein Bereich des Bindemittelgehaltes gefunden werden in den sich weder das Ermüdungsverhalten noch das Verformungsverhalten stark änderten. Aufgrund der

Prognoserechnung und den dazu benötigten Materialkennwerten besitzen die Ergebnisse eine hohe Sicherheit. Diese Herangehensweise der Optimierung der Asphaltgemische bedingt aber einen sehr hohen Versuchsaufwand. Somit ist die Herangehensweise der Optimierung nur für schwerste belastete Verkehrsbereiche empfehlenswert.

In dem Forschungsvorhaben wurden bei der Ermüdungsrissbildung nur die Deck- und Binderschicht betrachtet. Die größten Biegezugdehnungen entstehen nach derzeitigem Erkenntnisstand an der Unterseite der Asphalttragschicht in der Lastachse. Somit stellt die Unterseite der Asphalttragschicht ebenfalls ein maßgebender Nachweispunkt dar. Die vorgestellte Optimierung der Asphaltgemische bietet auch die Möglichkeit Asphaltgemische, die nicht den Anforderungen der TL Asphalt-StB 07 genügen, ihre Eignung für ihren Verwendungszweck nachzuweisen. Somit könnten Asphaltgemische mit innovativen und alternativen Konzepten die Möglichkeit erhalten in der Praxis eingebaut zu werden und Erfahrungen zu sammeln.

**Alle im Antrag formulierten Ziele des Arbeitspaketes 9 wurden erreicht.**

### 3 Zusammenfassung

Hauptziel des Forschungsvorhabens ist es, über die die Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzungen von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtgemischen auf deren Gebrauchseigenschaften eine Herangehensweise für die Asphaltkonzeption von diesen Gemischen für zukünftige schwerste Verkehrsbelastung unter Verwendung von gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfverfahren zu entwickeln. Somit sollen Asphaltgemische entworfen werden, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anforderungen optimiert sind.

Dafür wurden an der TU Dresden als Asphaltdeckschichtgemisch der SMA 11 S unter Variation der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes, sowie die alternativen Binderschichtgemische des AC 16 B S SG und der SMA 16 B S unter Variation des Bindemittelgehaltes untersucht. Die Optimierung der Asphaltgemische erfolgte anhand der Ergebnisse der Prognoserechnungen der Ermüdungsrisssbildung und der Spurrinnenbildung. Für die Bestimmung der benötigten Materialkenngrößen wurde eine Vielzahl an gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren durchgeführt:

- Bestimmung des Steifigkeitsverhalten mit dem Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper
- Bestimmung des Ermüdungsverhalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch
- Bestimmung des Tieftemperaturverhalten mit dem Abkühlversuch gemäß TP Asphalt-StB 46 A
- Bestimmung des Verformungsverhalten mit dem Druck-Schwellversuch gemäß TP Asphalt-StB 25 B 1, sowie am schlanken und gedrunenen Probekörper ohne Lastpause und mit dem Triaxialversuch an optimierten Asphaltgemischen
- Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens der Asphaltdeckschichtgemische mit dem Darmstädter Polierverfahren.

Die Prognoserechnungen der Ermüdungsrisssbildung beschränkten sich auf die Betrachtung der Risssbildung in der Asphaltdeckschicht bzw. in der Asphaltbinderschicht. Die Nachweisführung für die Deckschicht erfolgte in Analogie zu dem Verfahren der RDO Asphalt 2009 für die Tragschicht. Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltdeckschicht ist die Oberseite der Deckschicht unter Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen. Die größten Zugdehnungen treten dabei 165 mm neben der Lastachse auf. Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltbinderschicht ist die Unterseite der Binderschicht unter Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen und unter der Annahme des abgeminderten Schichtenverbundes zwischen den Asphaltsschichten. Die größten Zugdehnungen treten dabei in der Lastachse auf. Als Grundlage der Spurrinnenprognose diente der Ansatz von [Dragon 2015b]. Bei der Bestimmung der Materialkenngrößen der Impulskriechkurve konnte eine Temperaturabhängigkeit dieser Kenngrößen festgestellt werden. Diese Abhängigkeit wurde in die Prognoserechnung der Spurrinnenbildung berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die feine Korngrößenverteilung des SMA 11 S ein besseres Ermüdungsverhalten aufweist als die grobe Korngrößenverteilung. Dabei besitzt die feine Korngrößenverteilung den geringsten Ermüdungsstatus bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Die Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkt eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens der groben Korngrößenverteilung. Im gesamten untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes besaß die grobe Korngrößenverteilung ein besseres Verformungsverhalten. Bei einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-% besitzt die grobe Sieblinie die höchste Verformungsbeständigkeit. Die Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkt bei der feinen Korngrößenverteilung eine Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit.

Die Ergebnisse der Binderschichtgemische zeigten ein besseres Ermüdungsverhalten des SMA 16 B S, wobei der Bindemittelgehalt im untersuchten Bereich einen sehr geringen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten aufwies. Dagegen bewirkte die Zunahme des Bindemittelgehaltes eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens des AC 16 B S SG. Der stetig gestufte Asphaltbeton besitzt eine bessere Verformungsbeständigkeit gegenüber des SMA 16 B S. Eine Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkte bei beiden Korngrößenverteilungen eine Verschlechterung des Verformungsverhaltens. Des Weiteren konnte anhand der Prognoserechnungen zur Spurrinnenbildung gezeigt werden, dass die Unterschiede der relativen Spurrinne zwischen den einzelnen Binderschichtvarianten deutlich geringer ausgeprägt sind als die der Deckschichtgemische. Damit besitzt die Binderschicht einen geringeren Einfluss auf die Spurrinnenanfälligkeit der Fahrbahnkonstruktion.

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen zeigten ebenfalls, dass es bei allen vier untersuchten Asphaltgemischen jeweils ein Bereich des Bindemittelgehaltes vorhanden ist, in denen sich das Ermüdungs- und das Verformungsverhalten nur geringfügig ändert. Anhand der Laboruntersuchungen und der Prognoserechnung konnte eine Herangehensweise zur Optimierung von Asphaltgemischen für zukünftige schwerste Verkehrsbelastung aufgestellt werden.

Aufgrund einer fehlenden Kalibrierung der Prognoserechnung der Ermüdungsrissbildung für die Deck- bzw. für die Binderschicht, sowie die fehlende Validierung der Verfahrensweise der Spurrinnenbildung konnten die Ergebnisse nur als Relativwerte angegeben werden. Zur Ermittlung der Auswirkung der Asphaltgemische auf ihre Nutzungsdauer bzw. auf Erhaltungs-/Erneuerungsintervalle ist es wünschenswert, dass die Verfahren in Zukunft kalibriert bzw. validiert würden. An der TU Dresden wird zurzeit die probabilistische Verfahrensweise für die Nachweisführung der Rissbeständigkeit in der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht weiterentwickelt. Diese Verfahrensweise bietet die Möglichkeit die Variabilität der Materialkenngrößen in dem Berechnungsprozess einzubinden. Basierend auf der jeweiligen Stichprobe werden die charakteristischen Materialkenngrößen statistisch modelliert und durch Klassen diskret abgebildet. Dadurch können Streuungen der Materialeigenschaften im Prognoseprozess der Nutzungsdauer einbezogen werden.



In dieser Arbeit wurde die Optimierung der Asphaltzusammensetzung in Bezug auf die Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes durchgeführt. Die festgestellten optimierten Bindemittelgehalte der Asphaltgemische beziehen sich allerdings nur auf die verwendeten Ausgangsstoffe. Bei Verwendung anderer Gesteinskorngemische und Bindemittelsorten kann sich der optimierte Bindemittelgehalt ändern. Somit sollte eine Ausweitung der Optimierung der Asphaltzusammensetzung auf weitere modifizierte und viskositätsveränderte Bindemittel sowie Gesteinskorngemische in weiteren Forschungen mit berücksichtigt werden.

Die Versuchsergebnisse des Darmstädter Polierverfahrens zeigten, dass dieses Prüfverfahren ungeeignet ist zur Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens der Asphaltdeckschichtgemische. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens könnte das Prüfverfahren nach Wehner und Schulze bieten, welches allerdings für die Untersuchungen von Asphaltgemischen modifiziert werden müsste.

## **4 Sachbericht**

### **4.1 Personaleinsatz und Angemessenheit der Arbeit**

Die Tätigkeiten am Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau der TU Dresden konnten antragsgemäß abgeschlossen werden. Die geplante Zeit war für die im Antrag angegebene Versuchsanzahl und deren Auswertung angemessen. Insofern wurde die gesamte Zeit ausgeschöpft und die finanziellen Mittel angemessen angesetzt.

Das wissenschaftliche-technische Personal war für das Projekt vom 20. Januar 2016 bis zum 30. Juni 2018 angestellt. Der Beschäftigungsgrad betrug 100 %, sodass insgesamt 29,4 Personenmonate in der Projektlaufzeit geleistet wurden. Der Projektbearbeiter war für die Planung und Koordinierung des Vorhabens verantwortlich. Die Abstimmung der Zusammensetzung der Asphaltvarianten mit den Verantwortlichen der Mischanlage, die Untersuchungen der Rohstoffe und die Durchführung der Erstprüfungen waren für die endgültige Bestimmung der Asphaltzusammensetzungen notwendig. Als Voraussetzung der weiteren Arbeitspakete wurden Asphaltplatten und daraus die Probekörper hergestellt und für die jeweiligen Versuche vorbereitet. Diese Aufgaben wurden durch den Projektbearbeiter in angemessener Form übernommen. Die Entwicklung und Festlegung der Versuchsparameter sowie die Durchführung der Versuche waren für die Bestimmung des Einflusses der Asphaltzusammensetzungen auf die Eigenschaften der Asphaltgemische notwendig. Die Auswertung und Bewertung der Versuchsergebnisse waren Voraussetzung für die Durchführung der Prognoserechnungen. Die Durchführung der statistischen Auswertung und der Prognoserechnungen waren für die Entwicklung der Herangehensweise zur Optimierung von Asphaltgemischen notwendig.

Das Fachpersonal war vom 01. Januar 2017 bis zum 31. August 2017 über das Projekt angestellt. Der Beschäftigungsgrad betrug 75%, sodass insgesamt 6 Personenmonate in der Projektlaufzeit geleistet wurden. Für die Durchführung der Prüfverfahren war es notwendig eine Vielzahl von Probekörpern herzustellen. Die Herstellung, sowie die Vorbereitung und die Vermessung der Probekörper übernahm teilweise das Fachpersonal. Aufgrund der hohen Anzahl an Versuchen war es notwendig, dass das Fachpersonal teilweise die Versuche durchführt um somit den geplanten Zeitraum im Antrag einzuhalten.

Die studentischen Hilfskräfte waren vom 15. April 2016 bis 30. September 2016 mit einem Beschäftigungsgrad von 53% bzw. vom 15. Dezember 2016 bis 30. September 2017 mit einem Beschäftigungsgrad von 18% über das Projekt angestellt. Insgesamt wurden somit 5,17 Personenmonate in der Projektlaufzeit geleistet. Für die Durchführung der Prüfverfahren war es notwendig eine Vielzahl von Probekörpern herzustellen. Die Herstellung, die Vorbereitung und die Vermessung der Probekörper übernahm teilweise die Hilfskraft.

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig zur Erreichung der im Antrag formulierten Ziele und dementsprechend angemessen.

## **4.2 Leistungen Dritter**

Die Herstellung der Asphaltgemische erfolgte durch die BHS Bau- und Handelsgruppe Sachsen GmbH & Co.KG im Juli und November 2016. Zur Bearbeitung der Arbeitspakete und der somit umfangreichen Versuchsanzahl ist es notwendig eine große Menge an Asphaltmischgut zu produzieren. Die BHS Bau- und Handelsgruppe Sachsen GmbH&Co.KG verfügt über langjährige Erfahrung in der Asphaltherstellung und bietet die Möglichkeit, die Asphaltgemische an einer Mischanlage im Raum Dresden herzustellen. Die Größe der einzelnen Chargen der Asphaltvarianten wurde in angemessener Form gewählt, sodass genügend Material für die Probekörperherstellung vorhanden war und die hohe Anforderung an die Zusammensetzung der Asphaltgemische eingehalten werden konnte.

Zur Durchführung der Abkühlversuche gemäß TP Asphalt-StB 46 A wurde das Transferzentrum Straßenwesen in der Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig mbH beauftragt. Es handelte sich dabei um eine reine Dienstleistung. Diese Dienstleistung wurde teurer als im Zuwendungsbescheid einkalkuliert war. Dieser Einzelansatz im bewilligten Einzelfinanzierungsplan überschreitet nicht die 20% und kann durch eine entsprechende Einsparung bei dem Einzelansatz der Sonstigen Ausgaben ausgeglichen werden. Die TU Dresden verfügt weder über die erforderlichen Kenntnisse noch die Geräte zur Durchführung der Abkühlversuche gemäß TP Asphalt-StB 46 A. Daher war es notwendig, das Transferzentrum Straßenwesen in der Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig mbH zur genannten Dienstleistung zu beauftragen.

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig zur Erreichung der im Antrag formulierten Ziele und dementsprechend angemessen.

## **4.3 Darstellung des wissenschaftlichen-technischen Nutzens und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeit**

### **4.3.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen**

Mit den Ergebnissen des abgeschlossenen Projektes ist es gelungen eine Herangehensweise zur Optimierung von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtgemische zu entwickeln. Dabei werden als Kriterien zur Optimierung die Verformungsbeständigkeit und die Rissbeständigkeit der Gemische betrachtet und somit die primären Anforderungen an das Gebrauchsverhalten der jeweiligen Konstruktionsschicht. Die Grundlage stellen dabei die Laboruntersuchungen und die Prognoserechnungen, die die strukturelle Substanz aufgrund von materialtechnischer und stochastisch abgesicherter Kennwerte bewertet, dar. Die Gebrauchseigenschaften der Asphaltgemische werden über gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren ermittelt. Die Ergebnisse zeigten, dass bei allen untersuchten Asphaltgemischen Bereiche des Bindemittelgehaltes vorgefunden wurden, in denen sich weder das

Ermüdungsverhalten noch das Verformungsverhalten der Gemische stark änderten. Die Prognoserechnungen der Ermüdungsrissbildung konzentrierten sich innerhalb der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht. Dadurch konnte, neben der Betrachtung der Biegezugdehnungen an der Unterseite der Asphalttragschicht, zwei weitere Nachweispunkte gefunden werden. Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltdeckschicht ist die Oberseite der Deckschicht unter Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen. Die größten Zugdehnungen treten dabei 165 mm neben der Lastachse auf. Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltbinderschicht ist die Unterseite der Binderschicht unter Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen und unter der Annahme des abgeminderten Schichtenverbundes zwischen den Asphaltsschichten. Die größten Zugdehnungen treten dabei in der Lastachse auf. Das entwickelte Verfahren bietet zudem die Möglichkeit innovative und alternative Asphaltgemische zu optimieren und zeitgleich ihre Eignung im Vergleich zu herkömmlichen Asphaltgemischen nachzuweisen. Erfolgt in naher Zukunft die Kalibrierung der Ermüdungsrissbildung für die Nachweispunkte in der Deck- bzw. in der Binderschicht und eine Validierung der Verfahrensweise der Spurrinnenprognose können mit diesem Verfahren die Erhaltungs- bzw. die Erneuerungsmaßnahmen während des Nutzungszeitraums deutlich genauer geplant werden. Damit besitzen die KMU die Möglichkeit, sich im Rahmen von konventionellen Bauverträgen mit Nebenangeboten oder im Rahmen von Funktionsbauverträgen bzw. PPP-Projekten an den Vergabeverfahren zu beteiligen, da eine Abschätzung des tatsächlichen Erhaltungsaufwand geringere Risiken mit sich bringen.

#### 4.3.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Die Ergebnisse des Projektes werden im Rahmen von Funktionsbauverträgen und PPP-Projekten, die in Zukunft vermehrt vergeben werden sollen, von großer Bedeutung sein. Der Unterschied zu konventionellen Bauverträgen besteht darin, dass die Hauptleistungspflicht des Unternehmers über die vertragsmäßige Fertigstellung der Straße und die Verjährungsfrist für Mängelansprüche hinausgeht. Je nach Ausgestaltung des Vertrages schließt sich ein Zeitraum von 20 bis 30 Jahren nach Fertigstellung der Straße an, in dem das Bauunternehmen für den vertraglich geregelten Zustand der Straße zu Sorgen hat. Mit Hilfe der rechnerischen Prognoseverfahren des Gebrauchsverhaltens der Asphaltbefestigungen können Asphaltmischgüter gezielt ihrer Beanspruchung entsprechend optimiert und somit den tatsächlichen Erhaltungsaufwand der Straßenbefestigung für den Vertragszeitraum abgeschätzt werden. Damit erhöht sich die Chance der KMU vermehrt an den Vergabeverfahren von Funktionsbauverträgen und PPP-Projekten mitzuwirken. Eine weitere wirtschaftliche Bedeutung besteht in der öffentlichen Vergabe von Bauverträgen. Die Bauunternehmen besitzen die Möglichkeit ein Nebenangebot abzugeben um somit ihre Chance für die Auftragserteilung zu verbessern, wenn mit dem Änderungsvorschlag eine Kostenreduzierung innerhalb des Nutzungszeitraums für den Auftraggeber verbunden ist. In diesem Zusammenhang sind die Bauunternehmen interessiert, die

Straßenbefestigung hinsichtlich ihres Gebrauchsverhaltens zu optimieren. Durch die Ansprache der Eigenschaften der Asphaltgemische über gebrauchsvorhaltensorientierte Prüfverfahren können Prognoserechnungen durchgeführt werden, die nachweisen dass der Änderungsvorschlag den Anforderungen des Streckenabschnittes entsprechen. Die entwickelte Herangehensweise der Optimierung von Asphaltgemischen bietet die Möglichkeit innovative und alternative Asphaltgemische sicherer zu entwickeln, zu optimieren und zeitgleich ihre Eignung im Vergleich zu herkömmlichen Gemische nachzuweisen. Die gewonnen Erkenntnisse werden die Akzeptanz der gebrauchsvorhaltensorientierten Prüfverfahren weiter vorantreiben. Damit besitzen weitere Prüfinstitute die Möglichkeit ihre Ausstattung zu erweitern. Dies hat zur Folge, dass sich das Auftragsvolumen der Prüfinstitute und der Prüfgerätehersteller, die beide überwiegend KMU sind, steigern werden.

#### 4.4 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

##### 4.4.1 Beschreibung der bereits durchgeführten Transfermaßnahmen

| Maßnahme  | Ziel   | Ort/Rahmen                              | Datum                               |
|---|--|---|-------------------------------------|
| Beratung des Projektbegleitenden Ausschusses        | Fortschrittsbericht, Diskussion, Abstimmung der Maßnahmen                            | TU Dresden                              | Abgeschlossen insgesamt 5 Sitzungen |
| schriftlicher Beitrag                               | Forschungsvorhaben vorstellen  | Fachzeitschrift Asphalt                 | Ausgabe: Juni/Juli 2016             |
| Poster  | Fachleute der Branche Forschungsvorhaben vorstellen                                  | Deutscher Straßen- und Verkehrskongress | 28.-30.09.2016                      |
| Vortrag/ schriftlicher Beitrag/ Poster              | Fachleute der Branche Forschungsvorhaben und -ergebnisse vorstellen                  | Dresdner Asphalttage 2017               | 07.-08.12.2017                      |
| Vortrag   | Fachleute der Branche Forschungsergebnisse vorstellen                                | Asphaltseminar in Willingen             | 19.-21.03.2018                      |
| schriftlicher Beitrag                               | Vorstellung der ersten Forschungsergebnisse  | Fachzeitschrift Asphalt                 | Ausgabe: Juni/Juli 2018             |
| Schlussbericht                                      | Zusammenstellung der Forschungsergebnisse  | Veröffentlichung im Internet            | September 2018                      |
| Poster  | Fachleute der Branche Forschungsergebnisse vorstellen                                | Deutscher Straßen- und Verkehrskongress | 12.-14.09.2018                      |
| Akademische Ausbildung und berufliche Weiterbildung | Wissensvermittlung und Einbeziehung neuester Erkenntnisse in die Lehrveranstaltungen | Vorlesungen, Aufbaustudium Übungen      | teilweise abgeschlossen             |

Tab. 6: Beschreibung der bereits durchgeführten Transfermaßnahmen

## 4.4.2 Beschreibung der geplanten Transfermaßnahmen

| Maßnahme  | Ziel  | Ort/Rahmen  | Datum               |
|---|---|---|---------------------|
| Vortrag/ schriftlicher Beitrag/ Poster                            | Vorstellung der Forschungsergebnisse  | Fachtagungen/<br>Fachzeitschriften                      | bereits<br>begonnen |
| Vorträge  | Fachleute der Branche<br>Ergebnisse vorstellen<br>und diskutieren                             | in den<br>Arbeitskreisen der<br>FGSV und des<br>DAV/DAI | ab Oktober<br>2018  |
| Übernahme der<br>Ergebnisse in<br>Arbeitsblätter/Merk-<br>blätter | Anwendung der<br>Ergebnisse   | FGSV  | ab 2019             |
| Akademische<br>Ausbildung und<br>berufliche Weiter-<br>bildung    | Wissensvermittlung und<br>Einbeziehung neuester<br>Erkenntnisse in die<br>Lehrveranstaltungen | Vorlesungen,<br>Aufbaustudium<br>Asphalttechnik         | bereits<br>begonnen |
| Dissertation  | Wissenschaftliche<br>Qualifikation des<br>Bearbeiters des<br>Forschungsvorhabens              | TU Dresden  | ab Juli 2019        |

Tab. 7: Beschreibung der geplanten Transfermaßnahmen

#### 4.5 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzept

Die Vorstellung der Forschungsergebnisse auf Fachtagungen bzw. in Fachzeitschriften, sowie die Einbindung der gewonnenen Erkenntnissen in die Lehrveranstaltungen konnte bis zum Projektende bereits realisiert werden. Somit werden die geplanten Vorstellungen der Herangehensweise der Optimierung der Asphaltgemische und die weitere Einbeziehung der Erkenntnisse in die Lehrveranstaltungen als erfolgsversprechend eingeschätzt. Die Ergebnisse des Projektes lieferten ebenfalls neue Erkenntnisse, die bei der Überarbeitung der Richtlinien zur rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke (RDO Asphalt) sowie in den Entwurf der Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise (RSO Asphalt) eingearbeitet werden könnten. Zurzeit sind keine Arbeitsblätter/Merkblätter für den Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper vorhanden. Die durchgeführten Arbeiten der Versuchsdurchführung und der Auswertungen dieses Versuches könnten als Grundlage für Arbeitsblätter/Merkblätter der FGSV dienen. Ebenfalls die Verfahrensweise der Spurrinnenprognose konnte weiter vorangetrieben werden. Die Bewertung der plastischen Verformungen wird aber zurzeit nur über eine Abschätzung der Spurringengefährdung anhand der deviatorischen Vergleichsspannung durchgeführt. Somit werden die geplanten Anwendungen der Forschungsergebnisse in den Regelwerken der FGSV als realistisch eingeschätzt.

# **Schlussbericht**

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18472 BR

## **Thema**

Entwicklung von Asphalten für zukünftige schwerste Verkehrsbelastungen

## **Berichtszeitraum**

01. Januar 2016 bis 30. Juni 2018

## **Forschungsvereinigung**

Deutsches Asphaltinstitut e. V. (DAI)

## **Forschungseinrichtung(en)**

Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau

Dresden, September 2018

---

Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmüt Wellner  
Dipl.-Ing. Erik Kamratowsky

---

Gefördert durch:

## II Schlussbericht der Forschungsstelle TU Dresden

### Inhaltsverzeichnis

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
|           | <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>III</b> |
|           | <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>VI</b>  |
| <b>1.</b> | <b>Einleitung und Zielstellung</b>  | <b>1</b>   |
| <b>2.</b> | <b>Stand der Forschung</b>  | <b>2</b>   |
| 2.1       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten                | 2          |
| 2.2       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Tieftemperaturverhalten           | 4          |
| 2.3       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Verformungsverhalten              | 4          |
| 2.4       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Griffigkeitsverhalten             | 5          |
| <b>3.</b> | <b>Untersuchungsmethodik</b>  | <b>7</b>   |
| 3.1       | Wahl der Asphaltgemische  | 7          |
| 3.2       | Herstellung und Vorbereitung der Asphaltprobekörper                           | 11         |
| 3.3       | Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens   | 14         |
| 3.3.1     | Versuchsdurchführung  | 15         |
| 3.3.2     | Bestimmung der Hauptkurve   | 16         |
| 3.4       | Bestimmung des Ermüdungsverhaltens  | 20         |
| 3.4.1     | Versuchsdurchführung  | 20         |
| 3.4.2     | Bestimmung der Ermüdungsfunktion  | 21         |
| 3.5       | Bestimmung des Tieftemperaturverhaltens                                       | 22         |
| 3.5.1     | Versuchsdurchführung  | 23         |
| 3.5.2     | Versuchsauswertung  | 23         |
| 3.6       | Bestimmung des Verformungsverhaltens  | 23         |
| 3.6.1     | Einaxiale Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt-StB 25 B 1                    | 24         |
| 3.6.2     | Einaxiale Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper                      | 25         |
| 3.6.3     | Einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper                     | 26         |
| 3.6.4     | Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung                                       | 28         |
| 3.6.5     | Bestimmung der Impulskriechkurven   | 31         |
| 3.7       | Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens   | 31         |
| 3.7.1     | Versuchsdurchführung  | 31         |
| 3.7.2     | Versuchsauswertung  | 34         |
| <b>4.</b> | <b>Versuchsergebnisse</b>   | <b>35</b>  |
| 4.1       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Steifigkeitsverhalten             | 35         |
| 4.2       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten                | 38         |
| 4.3       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Tieftemperaturverhalten           | 43         |
| 4.4       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Verformungsverhalten              | 47         |
| 4.4.1     | Einaxiale Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt-StB 25 B 1                    | 47         |
| 4.4.2     | Einaxiale Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper                      | 50         |
| 4.4.3     | Einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper                     | 54         |
| 4.4.4     | Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung                                       | 57         |
| 4.5       | Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Griffigkeitsverhalten             | 58         |
| <b>5.</b> | <b>Statistische Auswertung</b>  | <b>61</b>  |
| 5.1.      | Prüfung der Gleichheit der Varianzen  | 61         |
| 5.2       | Regressionsanalytische Verfahren  | 62         |
| 5.2.1     | Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse zum Steifigkeitsverhalten | 63         |



|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 5.2.2     | Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse zum Ermüdungsverhalten   | 66         |
| 5.2.3     | Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse zum Verformungsverhalten | 70         |
| <b>6.</b> | <b>Prognoserechnung</b>  | <b>76</b>  |
| 6.1       | Prognoserechnung der Ermüdungsrisssbildung                                   | 76         |
| 6.1.1     | Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen in der Asphaltdeckschicht          | 79         |
| 6.1.2     | Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen in der Asphaltbinderschicht        | 83         |
| 6.1.3     | Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen in der Asphaltdeckschicht            | 86         |
| 6.1.4     | Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen in der Asphaltbinderschicht          | 89         |
| 6.1.5     | Maßgebende Nachweispunkte  | 91         |
| 6.2       | Prognoserechnung der Spurrinnenbildung                                       | 92         |
| 6.2.1     | Ermittlung der Impulskriechkurven  | 92         |
| 6.2.2     | Verfahrensweise der Spurrinnenprognose                                       | 95         |
| 6.2.3     | Parameter der Spurrinnenprognose   | 96         |
| 6.2.4     | Ergebnisse der Prognoserechnungen unter Variation der Deckschichtgemische    | 97         |
| 6.2.5     | Ergebnisse der Spurrinnenprognose unter Variation der Binderschichtgemische  | 99         |
| 6.2.6     | Vergleich der einaxialen Druck-Schwellversuche mit dem Triaxialversuch       | 102        |
| <b>7.</b> | <b>Optimierung der Asphaltgemische</b>                                       | <b>105</b> |
| 7.1       | Auswahl der zu untersuchenden Asphaltgemische                                | 105        |
| 7.2       | Auswahl der gebrauchungsverhaltenorientierten Prüfverfahren                  | 106        |
| 7.2.1     | Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens  | 107        |
| 7.2.2     | Bestimmung des Verformungsverhaltens   | 108        |
| 7.3       | Optimierung der Asphaltgemische  | 110        |
| 7.4       | Herangehensweise zur Optimierung der Asphaltgemische                         | 115        |
| <b>8.</b> | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>117</b> |
| <b>9.</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>120</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Abb. 3-1  | Hauptkurven der untersuchten Bitumen  | 9  |
| Abb. 3-2  | Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung                                | 12 |
| Abb. 3-3  | Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung                                | 12 |
| Abb. 3-4  | Sieblinie der Asphaltgemische SMA 16 B S  | 13 |
| Abb. 3-5  | Sieblinie der Asphaltgemische AC 16 B S SG  | 13 |
| Abb. 3-6  | Befestigung der Extensiometer mit Hilfe von Gummiringen (links) und Magneten (rechts)             | 15 |
| Abb. 3-7  | Grafische Darstellung der Bestimmung der Grenzwerte   | 19 |
| Abb. 3-8  | Hauptkurve eines Asphaltgemisches   | 19 |
| Abb. 3-9  | Versuchsaufbau des Spaltzug-Schwellversuches  | 20 |
| Abb. 3-10 | Bestimmung der Ermüdungslastwechselzahl $N_{\text{Makro}}$  | 22 |
| Abb. 3-11 | Belastungsschema nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1  | 24 |
| Abb. 3-12 | Versuchsaufbau des Druck-Schwellversuches am schlanke Probekörper                                 | 26 |
| Abb. 3-13 | Versuchsaufbau des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper                               | 27 |
| Abb. 3-14 | Triaxialprüfanlage der TU Dresden   | 28 |
| Abb. 3-15 | Anordnung des Magnetmesssystems   | 29 |
| Abb. 3-16 | Anordnung des radialen Messsystems  | 29 |
| Abb. 3-17 | Asphaltprobekörper des Darmstädter Poliervfahrens   | 32 |
| Abb. 3-18 | Probenrad der Schnellpoliermaschine mit den Asphaltprobekörpern                                   | 33 |
| Abb. 3-19 | SRT-Pendel  | 34 |
| Abb. 4-1  | Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Deckschichtvarianten                                     | 35 |
| Abb. 4-2  | Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Deckschichtvariante mit unterschiedlicher Bitumensorte   | 36 |
| Abb. 4-3  | Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Binderschichtvarianten                                   | 37 |
| Abb. 4-4  | Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion der Binderschichtvariante mit unterschiedlicher Bitumensorte | 37 |
| Abb. 4-5  | Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; feine Korngrößenverteilung  | 38 |
| Abb. 4-6  | Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; grobe Korngrößenverteilung  | 38 |
| Abb. 4-7  | Einfluss der Korngrößenverteilung der Deckschichtvarianten auf die Ermüdungsfunktion              | 39 |
| Abb. 4-8  | Einfluss der Korngrößenverteilung der Deckschichtvarianten auf die Ermüdungsfunktion              | 39 |
| Abb. 4-9  | Einfluss der Bitumensorte der Deckschichtvariante auf das Ermüdungsverhalten                      | 40 |
| Abb. 4-10 | Ermüdungsfunktion des AC 16 B S SG  | 41 |
| Abb. 4-11 | Ermüdungsfunktion des SMA 16 B S  | 41 |
| Abb. 4-12 | Einfluss der Korngrößenverteilung der Bindergemische  | 42 |
| Abb. 4-13 | Einfluss der Bitumensorte der Binderschichtvariante   | 42 |
| Abb. 4-14 | Ermittelte Bruchdehnung der Deckschichtgemische   | 44 |
| Abb. 4-15 | Bruchtemperaturen der Deckschichtgemische   | 44 |
| Abb. 4-16 | Einfluss der Bitumensorte auf das Tieftemperaturverhalten beim SMA 11 S                           | 45 |
| Abb. 4-17 | Ermittelte Bruchdehnungen der Bindergemische  | 45 |
| Abb. 4-18 | Bruchtemperaturen der Bindergemische  | 46 |
| Abb. 4-19 | Einfluss der Bitumensorte auf das Tieftemperaturverhalten beim AC 16 B S SG                       | 46 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Abb. 4-20 | Dehnungsraten im Wendepunkt für den SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung  | 47 |
| Abb. 4-21 | Dehnungsraten bei einer Dehnung von 40 ‰ für den SMA 11 S: feine KGV  | 48 |
| Abb. 4-22 | Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten des SMA 11 S   | 48 |
| Abb. 4-23 | Plastische Gesamtdehnung am Versuchsende für die Binderschichtgemische  | 49 |
| Abb. 4-24 | Einfluss der Bitumensorte beim AC 16 B S SG   | 50 |
| Abb. 4-25 | Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuches der Deckschichtvarianten bei $T=40^{\circ}\text{C}$ ; $\sigma_0=0,15\text{N/mm}^2$   | 51 |
| Abb. 4-26 | Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim SMA 11 S  | 51 |
| Abb. 4-27 | Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuches der Binderschichtvarianten bei $T=50^{\circ}\text{C}$ ; $\sigma_0=0,20\text{N/mm}^2$ | 52 |
| Abb. 4-28 | Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim AC 16 B S SG  | 52 |
| Abb. 4-29 | Hauptkurve der extrahierten Bitumen   | 53 |
| Abb. 4-30 | Verhärtung des Bitumens bei der Variante AC 16 B S SG   | 54 |
| Abb. 4-31 | Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuches der Deckschichtvarianten $T=30^{\circ}\text{C}$ ; $\sigma_0=0,20\text{N/mm}^2$       | 55 |
| Abb. 4-32 | Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim SMA 11 S  | 55 |
| Abb. 4-33 | Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuches der Binderschichtvarianten bei $T=50^{\circ}\text{C}$ ; $\sigma_0=0,20\text{N/mm}^2$ | 56 |
| Abb. 4-34 | Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim AC 16 B S SG  | 56 |
| Abb. 4-35 | Versuchsergebnisse des SMA 11 S mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten   | 57 |
| Abb 4-36  | Versuchsergebnisse des AC 16 B S SG mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten   | 57 |
| Abb. 4-37 | Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: grobe KGV  | 58 |
| Abb. 4-38 | Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: feine KGV  | 59 |
| Abb. 4-39 | Probekörper vor der Polierbeanspruchung   | 59 |
| Abb. 4-40 | Probekörper nach der Polierbeanspruchung  | 60 |
| Abb. 6-1  | Normierte charakteristische Temperaturprofile   | 77 |
| Abb. 6-2  | Häufigkeitsverteilung der TOF für Zone 5  | 78 |
| Abb. 6-3  | Häufigkeitsverteilung des BAB Fernverkehrs  | 78 |
| Abb. 6-4  | Gewählter Befestigungsaufbau nach RStO 12 (BK 100)  | 79 |
| Abb. 6-5  | Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltdeckschicht bei starren und abgeminderten Verbund                     | 80 |
| Abb. 6-6  | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren   | 81 |
| Abb. 6-7  | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht unter Variation der Bindergemische   | 82 |
| Abb. 6-8  | Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltbinderschicht bei starren und abgeminderten Verbund                   | 83 |
| Abb. 6-9  | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht nach 30 Jahren   | 84 |
| Abb. 6-10 | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht unter Variation der Deckschichtgemische  | 85 |
| Abb. 6-11 | Verlauf der vertikalen Dehnungen im Straßenquerschnitt  | 86 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Abb. 6-12 | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren  | 87  |
| Abb. 6-13 | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht unter Variation der Binderschichtgemische   | 88  |
| Abb. 6-14 | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbindergemische nach 30 Jahren   | 89  |
| Abb. 6-15 | Relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht unter Variation der Deckschichtgemische   | 90  |
| Abb. 6-16 | Abhängigkeit des Materialparameters A von den elastischen Anfangsdehnungen (AC 16 B S SG)  | 92  |
| Abb. 6-17 | Darstellung des Materialparameters in Abhängigkeit zur elastischen Dehnung getrennt für verschieden Temperaturen   | 93  |
| Abb. 6-18 | Darstellung des Materialparameters B in Abhängigkeit zur elastischen Dehnung   | 93  |
| Ab. 6-19  | Abhängigkeit der plastischen Dehnung von den elastischen Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel  | 94  |
| Abb. 6-20 | Schematische Darstellung der zufälligen Reihung der Belastungszustände sowie der Zufallskombination der Belastungsgrößen                                     | 96  |
| Abb. 6-21 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper    | 97  |
| Abb. 6-22 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper   | 99  |
| Abb. 6-23 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper  | 100 |
| Abb. 6-24 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gerungenen Probekörper | 101 |
| Abb. 6-25 | relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion nach 30 Jahren Nutzungsdauer   | 102 |
| Abb. 6-26 | Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schellversuches am gedrunenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung                   | 103 |
| Abb. 7-1  | Vergleich der Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion mittels der Ergebnisse des Druck-Schwellversuches und des Spaltzug-Schwellversuches                      | 107 |
| Abb. 7-2  | Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schellversuches am gedrunenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung                   | 109 |
| Abb. 7-3  | relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion nach 30 Jahren Nutzungsdauer   | 109 |
| Abb. 7-4  | Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S; feine KGV  | 111 |
| Abb. 7-5  | Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S; grobe KGV  | 112 |
| Abb. 7-6  | Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 16 B S   | 113 |
| Abb. 7-7  | Optimierung des Bindemittelgehaltes des AC 16 B S SG   | 114 |

## Tabellenverzeichnis

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tab. 2-1  | primäre Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften der jeweiligen Konstruktionsschicht   | 2  |
| Tab. 3-1  | Rohdichten der Lieferkörnungen  | 7  |
| Tab. 3-2  | Bestimmung der Kornformkennzahl   | 7  |
| Tab. 3-3  | Bestimmung des PSV-Wertes   | 8  |
| Tab. 3-4  | Bindemittelkennwerte der Bitumen  | 9  |
| Tab. 3-5  | Bindemittelbedarf der Asphaltgemische   | 10 |
| Tab. 3-6  | Übersicht der Asphaltgemische   | 11 |
| Tab. 3-7  | Versuchsparameter zur Bestimmung der Hauptkurve   | 16 |
| Tab. 3-8  | Lastwechselzahlen für die Steifigkeitsversuche  | 16 |
| Tab. 3-9  | Querdehnzahlen für die untersuchten Prüftemperaturen  | 17 |
| Tab. 3-10 | Versuchsschema des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper  | 26 |
| Tab. 3-11 | Versuchsschema der Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung  | 30 |
| Tab. 4-1  | Dehnungen und Lastwechselzahl des Wendepunktes für den SMA 11 S: grobe KGV  | 48 |
| Tab. 4-2  | Dehnungsraten am Versuchsende der Binderschichtgemische   | 50 |
| Tab. 4-3  | Bindemittelkennwerte der extrahierten Bitumen   | 53 |
| Tab. 5-1  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten  | 64 |
| Tab. 5-2  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten   | 65 |
| Tab. 5-3  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten  | 66 |
| Tab. 5-4  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten   | 66 |
| Tab. 5-5  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten  | 68 |
| Tab. 5-6  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten   | 68 |
| Tab. 5-7  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten  | 69 |
| Tab. 5-8  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten   | 69 |
| Tab. 5-9  | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)            | 71 |
| Tab. 5-10 | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)   | 71 |
| Tab. 5-11 | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)          | 72 |
| Tab. 5-12 | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper) | 73 |
| Tab. 5-13 | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)           | 73 |
| Tab. 5-14 | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)  | 74 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tab. 5-15 | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)                              | 75  |
| Tab. 5-16 | Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)                     | 75  |
| Tab. 6-1  | Parameter zur Bestimmung der Verkehrsbelastung nach RStO 12  | 78  |
| Tab. 6-2  | Ergebnisse der Prognoserechnungen der Asphaltdeckschichtgemische   | 81  |
| Tab. 6-3  | Einfluss der Eigenschaften der Asphaltbinderschicht auf den Ermüdungsstatus  | 82  |
| Tab. 6-4  | Ergebnisse der Prognoserechnungen der Asphaltbinderschichtgemische   | 84  |
| Tab. 6-5  | Einfluss der Eigenschaften der Asphaltdeckschicht auf den Ermüdungsstatus  | 85  |
| Tab. 6-6  | Ergebnisse der Prognoserechnungen der Asphaltdeckschichtgemische   | 87  |
| Tab. 6-7  | Einfluss der Eigenschaften der Asphaltbinderschicht auf den Ermüdungsstatus  | 88  |
| Tab. 6-8  | Ergebnisse der Prognoserechnung der Asphaltbinderschichtgemische   | 89  |
| Tab. 6-9  | Einfluss der Eigenschaften der Asphaltdeckschicht auf den Ermüdungsstatus  | 90  |
| Tab. 6-10 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper    | 97  |
| Tab. 6-11 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper   | 98  |
| Tab. 6-12 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper  | 100 |
| Tab. 6-13 | Relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper | 101 |
| Tab. 7-1  | Notwendige Versuche zur Optimierung von Asphaltgemischen   | 115 |

## 1 Einleitung und Zielstellung

Die Beanspruchung der Straßenbefestigungen in Deutschland wird aufgrund der Verkehrsentwicklung in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Die prognostizierte Steigerung des Schwerverkehrsanteils im Bundesfernstraßennetz, die Erhöhung der Achslasten, die Nutzung von Super-Singlereifen mit hohen Reifeninnendrücken stellen immer höhere Anforderungen an die Straßenbaustoffe und somit deren optimierte Zusammensetzung zu leistungsfähigen Baustoffgemischen hinsichtlich ihrer Gebrauchseigenschaften. In Deutschland werden Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt dagegen größtenteils auf der Grundlage empirisch gewonnener Erkenntnisse dimensioniert und ausgeführt. Die Festlegung der Dicken der gebundenen und ungebundenen Schichten von Straßenbefestigungen erfolgt unter Anwendung der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen [RStO 2012]. Des Weiteren wird das Gebrauchsverhalten der Baustoffgemische dieser Schichten indirekt über ihre Zusammensetzung und einige wenige leistungsbezogene Prüfverfahren beschrieben.

Um die noch vorhandenen Ressourcen effizienter nutzen und ein weitgehend sicheres und dauerhaftes Verkehrsnetz bieten zu können, ist es von großer Bedeutung die einzelnen Befestigungsschichten von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt ihrer Beanspruchung entsprechend zu konzipieren. Dies ist jedoch insbesondere bei Asphaltdeckschichtgemischen eine Optimierungsaufgabe. Geeignete Werkzeuge für die die Prognose der strukturellen Substanz auf der Grundlage materialtechnischer und stochastisch abgesicherter Kennwerte stellen die Verfahren der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten [RDO 2009] und die Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise [RSO Entwurf 2018], letztere jedoch nur für Asphalttragschichten, dar. In einer Weiterentwicklung an der Professur für Straßenbau der TU Dresden konnten diese Verfahren sowohl für die Anwendung in den Schichten der Asphaltdecke angepasst als auch ein Verfahren zur Prognose der Spurrinnenentwicklung in allen Asphaltsschichten entwickelt werden [Dragon 2015].

Hauptziel des Forschungsvorhabens ist es, über die Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzungen von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtgemischen auf deren Gebrauchseigenschaften eine Herangehensweise für die Asphaltkonzeption von diesen Gemischen für zukünftige schwerste Verkehrsbelastung unter Verwendung von gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfverfahren zu entwickeln. Somit sollen Asphaltgemische entworfen werden, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anforderungen optimiert sind.

## 2 Stand der Forschung

Um die noch vorhandenen Ressourcen effizienter nutzen zu können, den Verkehrsteilnehmer ein weitgehend sicheres und dauerhaftes Verkehrsnetz bieten zu können, weniger Verkehrsstaue aufgrund von Erhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen von Straßen und der damit verbundenen Beeinträchtigung der Mobilität zu erzeugen, ist es von großer Bedeutung, die einzelnen Konstruktionsschichten von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt ihrer Beanspruchung entsprechend zu konzipieren. Dies ist jedoch insbesondere bei Asphaltdeckschichtgemischen eine Optimierungsaufgabe. Die primären Anforderungen an das Gebrauchsverhalten der Deck- und Binderschichtgemische sind in Tabelle 2-1 aufgelistet.

| Konstruktionsschicht | Anforderungen   |
|----------------------|---|
| Asphaltdeckschicht   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhte Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen und gegen Ermüdung</li> <li>- erhöhte Verformungsbeständigkeit</li> <li>- erhöhte Griffigkeit und Verschleißbeständigkeit</li> </ul> |
| Asphaltbinderschicht | <ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhte Verformungsbeständigkeit</li> <li>- Beständigkeit gegen Ermüdungsrisssbildung (eingeschränkt)</li> <li>- Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen (eingeschränkt)</li> </ul>  |
| Asphalttragschicht   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhte Beständigkeit gegen Ermüdungsrisssbildung</li> <li>- Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen (eingeschränkt)</li> <li>- Verformungsbeständigkeit (eingeschränkt)</li> </ul>  |

Tab. 2-1: primäre Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften der jeweiligen Konstruktionsschicht

In einer Vielzahl von Forschungsvorhaben wurde bereits der Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf ihr Gebrauchsverhalten nachgewiesen, was entscheidend für die Konzeption bzw. Entwicklung von Asphaltgemischen und somit ebenfalls für die Entwicklung von Asphalten für zukünftige schwerste Verkehrsbelastungen ist.

### 2.1 Einfluss der Asphalzzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten

Die Ermüdung wird definiert als minimale Schädigung bei jeder kurzzeitigen Beanspruchung während der Überrollung durch einen Reifen. Infolge der Bildung von Mikrorissen führt dies zu einem Steifigkeitsverlust des Asphaltgemisches. Bei wiederholter Beanspruchung breiten sich die Mikrorisse aus und vereinigen sich zu einem Makroriss. Dies führt schließlich zum Ausfall der Asphaltbefestigung. Allerdings wirken die Effekte der Alterung und der Heilung der Ermüdung entgegen [Di Benedetto 2004, Weise 2008].

In den Forschungsvorhaben [Arand 1996, Dragon 2011, Mollenhauer 2013] wurde festgestellt, dass die Zunahme des Bindemittelgehaltes eine Erhöhung der ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Bruch bewirkt. Dabei wird ein optimaler Bindemittelgehalt erreicht, der abhängig von der Gesteinssorte und der Korngrößenverteilung ist. Ein zu hoher Bindemittelgehalt bewirkt eine Herabsetzung der Kornkontakte und eine Reduzierung der Scher- und Standfestigkeiten und somit eine Verschlechterung des



Ermüdungsverhaltens. Dagegen wirkt sich ein hoher Füllergehalt positiv auf die Ermüdungsbeständigkeit aus [Meissner 2007]. Eine feinere Korngrößenverteilung erträgt größere Lastwechselzahlen bis zum Bruch als eine gröbere Korngrößenverteilung [Arand 1996, Dragon 2015, Mollenhauer 2013]. Die Untersuchungen [Harvey 1996, Leutner 2000, Lüthje 2000] belegten, dass mit einer Abnahme des Hohlraumgehaltes bzw. mit einer Zunahme des Verdichtungsgrades des Asphaltgemisches sich die ertragbaren Bruchlastwechselzahlen erhöhen.

Die ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Bruch sind abhängig von der Viskosität des Bindemittels. Mit einer Zunahme der Viskosität erhöht sich der Steifigkeitsmodul des Asphaltes [Dragon 2015, Meissner 2007]. Die Verwendung von höher modifizierten Bitumen verbessert das Ermüdungsverhalten. Dabei bewirken steifere Sorten im hohen Temperaturbereich und weichere Sorten im tiefen Temperaturbereich eine bessere Ermüdungsrissbeständigkeit [Büchler 2008]. Lipke [Lipke 2011] konnte ebenfalls feststellen, dass polymermodifizierte Bitumen ein besseres Langzeitverhalten aufweisen. Dabei zeigte sich, dass die Auswahl der Gesteinssorte einen untergeordneten Einfluss auf das Ermüdungsverhalten besitzt.

Die Ermüdungsbeständigkeit in Asphaltbefestigungen verbessert sich durch höhere E-Module der Asphaltgemische. Die höheren E-Module führen zu geringeren Dehnungen in den Asphaltsschichten [Dragon 2011, Lipke 2011]. Dieser wird durch die Sieblinie, den Bindemittel und den Hohlraumgehalt bestimmt. Dabei bewirkt eine geringe Anzahl von Kontaktpunkten, die mit Bitumen verklebt sind, einen geringen E-Modul [Weise 2008]. In dem Forschungsvorhaben [Lipke 2011] wurde festgestellt, dass härtere Bitumen zu einem größeren E-Modul führen. Außerdem wird der E-Modul mit steigendem Bindemittelgehalt bis zu einem Optimum erhöht. In den Untersuchungen [Mollenhauer 2013] besaßen die Varianten mit einem geringen Bindemittelgehalt und einer geringen Verdichtungsgrad die geringsten Steifigkeitsmodule.

In [Dragon 2015] wurden Asphalttragschichten unterschiedlicher Zusammensetzungen untersucht und anhand der Versuchsergebnisse Prognoserechnungen durchgeführt. Die Berechnungen zeigten eine sehr hohe Spanne der Nutzungsdauern für die unterschiedlichen Varianten der Asphalttragschichtgemische. Dabei war der Einfluss der Zusammensetzung deutlich erkennbar. Somit müssten Anforderungen an die Performanceeigenschaften der Asphaltgemische formuliert werden. Die Ergebnisse in [Mollenhauer 2013] zeigten ebenfalls eine hohe Spanne der Nutzungsdauern der unterschiedlichen Varianten. Dies weist darauf hin, dass Asphalttragschichten mit optimierten Materialeigenschaften aufgrund der hohen Verkehrsbelastung verwendet werden sollten.

## **2.2 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Tieftemperaturverhalten**

Die Rissbeständigkeit von Asphalten bei tiefen Temperaturen beschreibt den Widerstand von Asphalten gegen kälteinduzierte Rissbildung. Diese Eigenschaft wird durch den Abkühlversuch angesprochen und mit dessen Hilfe erfolgt die Bestimmung der sogenannten kryogenen Spannungen, welche bei tiefen Temperaturen durch behinderte thermische Dehnungen auftreten, sowie der Bruchspannung und Bruchtemperatur.

Die Forschungsvorhaben [Arand 2000, Hauser 2008] stellten fest, dass die Bruchtemperatur und Bruchspannung im Wesentlichen von der Viskosität des vorhandenen Bindemittels und dessen Kälteeigenschaften, der Korngrößenverteilung und der Gesteinssorte abhängig ist. Dabei besitzt der Bindemittelgehalt einen geringen Einfluss auf die beiden Kenngrößen. In [Büchler 2008] wurden erhebliche Spannweiten der Tieftemperatureigenschaften von SMA 8 S bei Verwendung von unterschiedlichen Bitumenprodukte gleicher Sorte bei ansonsten gleicher Asphaltzusammensetzung festgestellt. Die Untersuchungen ergaben, dass die Bruchtemperatur von der Viskosität des Bitumens und die Bruchspannung vom Bindemittelgehalt und der Zusammensetzung abhängig sind. Bitumen, die höher modifiziert sind, weisen ein deutlich besseres Tieftemperaturverhalten auf genauso wie niedrigviskose Sorten. Die Alterung der Asphaltgemische bewirkt erhöhte Bruchspannungen und eine Verschiebung der Kurvenverläufe der kryogenen Spannung in positiveren Temperaturbereiche.

Die Verwendung einer gröberen Korngrößenverteilung und geringen Bindemittelgehalten bewirkt, dass geringere kryogene Zugspannungen im Asphaltgemisch induziert werden. Dies zeigt, dass der Hohlraumgehalt eine maßgebende Einflussgröße auf die Zugfestigkeit besitzt [Mollenhauer 2013]. Walzasphalte mit einer feineren Korngrößenverteilung weisen niedrigere Bruchtemperaturen und somit ein besseres Tieftemperaturverhalten auf [Eulitz 1987].

## **2.3 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Verformungsverhalten**

Die Verformungsbeständigkeit von Asphaltgemischen beschreibt den Widerstand gegenüber plastischen Verformungen, welche die Ursache für die Bildung von Spurrinnen darstellen.

Durch die Erhöhung des Verdichtungsgrades kann die Beständigkeit gegenüber plastischen Verformungen erreicht werden [Leutner 2000]. Dies konnte durch die Untersuchungsergebnisse [Lüthje 2000, Mollenhauer 2013] bestätigt werden. Dabei führen allerdings ein zu hoher Verdichtungsgrad sowie ein zu niedriger Hohlraumgehalt zu einer Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Der optimale Verdichtungsgrad ist von der Asphaltart und dessen Verdichtungseigenschaften abhängig [Lüthje 2000]. [Karcher 2005] bestätigte den Zusammenhang, dass die Raumdichte der Asphaltgemische einen optimalen Wert in Bezug auf den Bindemittelgehalt erreicht. Die Erhöhung der Raumdichte bewirkt dabei eine höhere Lagerungsdichte. Dadurch entstehen mehr Korn-zu-Korn-Kontakte und somit ein verspanntes Korngerüst, welches

eine höhere Verformungsbeständigkeit aufweist. Die Untersuchungen zeigten allerdings auch, dass zu hohlraumreiche und zu hohlraumarme Splittmastixasphalte keine plausiblen Versuchsergebnisse mit dem Druck-Schwellversuch lieferten. In [Blab 1999] konnte nachgewiesen werden, dass gut abgestufte Korngemische nach der Fuller-Parabel eine sehr gute Verformungsbeständigkeit aufweisen. Dagegen müssen eigene Überlegungen für Asphaltgemische nach dem Splittmastixprinzip und für offenporige Asphaltgemische getroffen werden. Diese besitzen trotz der Ausfallkörnung eine sehr gute Beständigkeit gegenüber Spurrinnen.

Der Widerstand gegenüber plastischen Verformungen wird durch den Bindemittelgehalt beeinflusst. Durch die Zunahme des Bindemittelgehaltes wird der Hohlraumgehalt reduziert und damit die Gleitflächen innerhalb des Asphaltgemisches vergrößert [Blab 1999]. [Roos 2003] untersuchte die Verformungsbeständigkeit an verschiedenen Varianten von Splittmastixasphalten mit Hilfe des Druck-Schwellversuches. Die Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkte dabei eine Verringerung der Verformungsbeständigkeit. Dies zeigten auch die Untersuchungen von [Arand 2000, Mollenhauer 2013]. In den Untersuchungen [Mollenhauer 2013] konnte festgestellt werden, dass eine feinere Korngrößenverteilung empfindlicher auf die Änderung des Bindemittelgehaltes reagiert als eine gröbere Korngrößenverteilung. [Arand 2000] zeigte, dass splittreiche Splittmastixasphalte ebenfalls eine geringere Empfindlichkeit des Verformungswiderstandes gegenüber der Änderung des Bindemittelgehaltes aufweisen. [Hauser 2008] stellte dagegen einen optimalen Bindemittelgehalt gegenüber dem Widerstand plastischer Verformung fest.

Asphalte mit Bitumen, die eine geringere Viskosität besitzen, weisen deutlich geringere Steifigkeiten auf und sind somit anfälliger gegenüber plastischen Verformungen [Blab 1999]. Weitere Untersuchungen [Mollenhauer 2013, Roos 2003] bestätigen dieses Ergebnis. Die Bindemittelviskosität scheint dabei weniger bedeutend zu sein als die anderen kompositionellen Merkmale [Steinhauer 2006].

#### **2.4 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Griffigkeitsverhalten**

Die Griffigkeit bezeichnet die Wirkung von Textur und stofflicher Beschaffenheit einer Fahrbahnoberfläche auf den Reibungswiderstand des Fahrzeugreifens unter festgelegten Bedingungen und wird über den Kraftschlussbeiwert beschrieben [TP Griff-StB 2007]. Entsprechend der ZTV Asphalt-StB 07/13 sind zum Zeitpunkt der Abnahme bis zum Ablauf der Verjährungsfrist Grenzwerte für Griffigkeitsmessungen mit dem Seitenkraftmessverfahren festgelegt. Somit gilt für Asphaltdeckschichtgemische demzufolge, diese hinsichtlich der Eigenschaft Griffigkeit zu optimieren.

Die Verwendung eines kleineren Größtkorns wirkt sich positiv auf das Griffigkeitsverhalten aus [Huschek 2002]. [Behle 2005] untersuchte den Einfluss unterschiedlicher polierresistente, grober Gesteinskörnungen 2/5 und 5/8 auf die Griffigkeitsentwicklung von Splittmastixasphalten SMA 8 S. Dabei zeigten die Asphaltgemische, welche in der Korngruppe 2/5 die Gesteinssorten mit einem höheren

PSV-Wert enthielten, auch im eingebauten Zustand das bessere Griffigkeitsverhalten. Der Einsatz von polierresistenteren Sanden 0/2 und Splitten 2/4 führen zur Verbesserung der Griffigkeit [Pfeiler 2005]. Dabei besitzt die Kornklasse 0/2 den größten Einfluss bei Asphaltbetonen, bei Splittmastixasphaltgemische ist hingegen die Kornklasse 4/8 maßgebend. Die Untersuchungen von [Lehne 2007] ergaben, dass bei der Verwendung der gleichen Gesteinssorte sandreiche und splittarme Asphaltgemische ein besseres Griffigkeitsverhalten aufweisen als sandarme und splittreiche Asphaltgemische. Außerdem nimmt die Griffigkeit mit der Zunahme des Bindemittelgehaltes und der Zunahme des Hohlraumgehaltes ab. Die Verwendung von polymermodifizierten Bitumen verbessert die Griffigkeit [Behle 2005].

Um die Griffigkeitsanforderungen zu erfüllen, ist es notwendig die zu erwartende Griffigkeitsentwicklung der Straßenoberfläche bereits bei der Konzeption und beim Nachweis der Eignung des Asphaltmischgutes abschätzen zu können. Daraufhin wurde das „Darmstädter Polierverfahren“ entwickelt mit dem es möglich ist, vergleichende Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Asphaltmischungen durch zu führen. Somit kann der Einfluss der Zusammensetzung des Asphaltmischgutes bei der Konzeption berücksichtigt werden. Die Versuchsergebnisse ergaben einen engen Zusammenhang zwischen den Poliereigenschaften der verwendeten Mineralstoffen und der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche. Der Brechsand in den Splittmastixasphalten beeinflusst die Griffigkeit nur bei weniger griffigen Splitt. Dabei besitzt der feine Splitt 2/5 den größeren Einfluss auf das Griffigkeitsverhalten als die Kornfraktion 5/8 [Bald 2004].

### 3 Untersuchungsmethodik

#### 3.1 Wahl der Asphaltgemische

In die Untersuchungen wurden als Asphaltdeckschichtgemisch ein Splittmastixasphalt mit einem Größtkorn von 11 mm (SMA 11 S) unter zweifacher Variation der Korngrößenverteilung sowie als Asphaltbindergemische ein stetig gestufter Asphaltbeton (AC 16 B S SG) und ein Bindergemisch nach dem Splittmastixprinzip (SMA 16 B S) mit jeweils einem Größtkorn von 16 mm einbezogen. Bevor die Zusammensetzungen der verschiedenen Asphaltgemische endgültig festgelegt werden konnte, erfolgte die Bestimmung der Korngrößenverteilung, der Rohdichten, der Kornform und des PSV-Wertes der verwendeten Lieferkörnungen, sowie die Ermittlung der Bindemittelkennwerte der verwendeten Polymermodifizierten Bitumen.

Als Gesteinsmaterial für die unterschiedlichen Gesteinskörnungen wird Grauwacke verwendet, welche im sächsischen Raum abgebaut wird. Die benötigten Proben für die verschiedenen Untersuchungen wurden direkt am Asphaltmischwerk in Dresden entnommen. An diesem Asphaltmischwerk in Dresden erfolgte ebenfalls die Herstellung der Asphaltmischgüter. Die Korngrößenverteilung der einzelnen Lieferkörnungen ist in der Anlage 1 dargestellt. Die Ergebnisse zur Bestimmung der Rohdichten und der Kornformkennzahl sind in Tabelle 3-1 und 3-2 zusammengefasst.

| Lieferkörnung       | Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ] |
|---------------------|--------------------------------|
| Fremdfüller         | 2,76                           |
| Lieferkörnung 0/2   | 2,74                           |
| Lieferkörnung 2/5   | 2,72                           |
| Lieferkörnung 5/8   | 2,73                           |
| Lieferkörnung 8/11  | 2,73                           |
| Lieferkörnung 11/16 | 2,73                           |

Tab 3-1: Rohdichten der Lieferkörnungen

| Kornklasse<br>[mm] | Masse der<br>Messprobe<br>[g] | Masse der nicht<br>kubischen Körner<br>[g] | Kornformkennzahl<br>[M-%] |
|--------------------|-------------------------------|--|---------------------------|
| 11-16              | 999,7                         | 85,5                                       | 9                         |
| 8-11               | 499,8                         | 31,9                                       | 6                         |
| 5,6-8              | 101,7                         | 7,5  | 7                         |
| 4-5,6              | 22,1                          | 3,8  | 17                        |

Tab 3-2: Bestimmung der Kornformkennzahl

Die Bestimmung des Polierwiderstandes erfolgte an vier Probekörpern mit Hilfe des Pendelgerätes, nachdem die Probekörper in der Schnellpoliermaschine poliert wurden. Als Kontrollgestein wurde ein Herrnholzer Granit verwendet. Die Ergebnisse der Griffigkeitsmessung des Prüfgesteins sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Der PSV-Wert ermittelt sich nach Gleichung 1.

$$PSV = S + 56 - C$$

Gleichung 1

mit:

S Mittelwert des Prüfgestein [-]

C Mittelwert des Kontrollgesteins [-]

|                     | Probe<br>körper | Pendelwerte |    |    | MW<br>PK | MW<br>DG | MW<br>Gestein | PSV |
|---------------------|-----------------|-------------|----|----|----------|----------|---------------|-----|
| Prüf<br>gestein     | I               | 51          | 51 | 50 | 50,7     | 50,2     | 49,7          | 56  |
|                     | II              | 44          | 44 | 43 | 43,7     |          |               |     |
|                     | III             | 50          | 50 | 50 | 50,0     | 49,2     |               |     |
|                     | IV              | 49          | 48 | 48 | 48,3     |          |               |     |
| Kontroll<br>gestein | I               | 49          | 48 | 48 | 48,3     | 48,3     | 49,4          |     |
|                     | II              | 48          | 48 | 49 | 48,3     |          |               |     |
|                     | III             | 52          | 51 | 50 | 51,0     | 50,5     |               |     |
|                     | IV              | 50          | 50 | 50 | 50,0     |          |               |     |

Tab. 3-3: Bestimmung des PSV-Wertes

Die verwendeten Gesteinskörnungen erfüllen die Anforderungen der TL Gestein-StB 04 und sind somit für den Einsatz im Straßenbau zulässig.

In die Untersuchungen kamen zwei polymermodifizierte Bitumensorten zum Einsatz. Die Proben für die Bitumenuntersuchungen stellte das Asphaltmischwerk in Dresden bereit. Die Bindemittelkennwerte der zu verwendeten Bitumen sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst. Beide Bitumensorten entsprechen den Anforderungen der TL Bitumen-StB 07 und sind somit für den Einsatz im Straßenbau zulässig. Des Weiteren wurden die rheologischen Kennwerte des Absolutwertes des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels der Bitumen mit dem Dynamic Sher-Rheometer (DSR) ermittelt. Der Versuch wurde als Temperatur-Frequenz-Sweep durchgeführt. Der untersuchte Temperaturbereich liegt zwischen 70°C und -5°C, wobei die Änderung der Temperatur zwischen den einzelnen Messungen 10K beträgt. Bei den durchgeführten DSR-Versuchen betrug der Probendurchmesser 25 mm und die Probenhöhe 2 mm in dem Temperaturbereich vom 30°C bis 70°C. Aufgrund der hohen Bindemittelsteifigkeiten wurden die Versuche im Temperaturbereich von 40°C bis -5°C an Proben mit einem geringeren Durchmesser von 8 mm und einer Höhe von 1 mm durchgeführt. Bei dem Versuch wird die Frequenz je untersuchte Temperatur erhöht. Die Startfrequenz beträgt 1 rad/s (0,16 Hz) und wird bis zu einer Frequenz von 100 rad/s (15,92 Hz) erhöht. Aus den Ergebnissen der DSR Versuche werden die Hauptkurven der Bitumen bestimmt. In Anlehnung der Bestimmung der Hauptkurve für Asphalte [TP Asphalt-StB Teil 26, Entwurf 2017], kann ebenfalls mit einem Faktor  $\alpha_T$  die Äquivalenz zwischen Prüftemperatur und Belastungsfrequenz bezogen auf den Schermodul hergestellt werden. Mit der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz können die Hauptkurven der Bitumen für eine Referenztemperatur ermittelt werden. Die Gleichung des Faktors  $\alpha_T$  lautet:

$$\alpha_T = e^{m \cdot \left( \frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{T_0+273,15} \right)}$$

Gleichung 2

mit:

 $\alpha_T$  Verschiebungsfaktor [-]

m Materialspezifischer Parameter (20.000) [-]

T Temperatur des Versuches [°C]

 $T_0$  Referenztemperatur (20°C) [°C].

Die somit erhaltenen Hauptkurven der zu untersuchenden Bitumen sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

| Bindemittelkennwert                  | 25/55-55A | 10/40-65A |
|--------------------------------------|-----------|-----------|
| Nadelpenetration bei 25°C [1/10 mm]  | 41        | 20        |
| Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C] | 60,4      | 70,8      |
| Brechpunkt nach Fraaß [°C]           | -14       | -10       |
| Elastische Rückstellung              | 55        | 58        |

Tab. 3-4: Bindemittelkennwerte der Bitumen

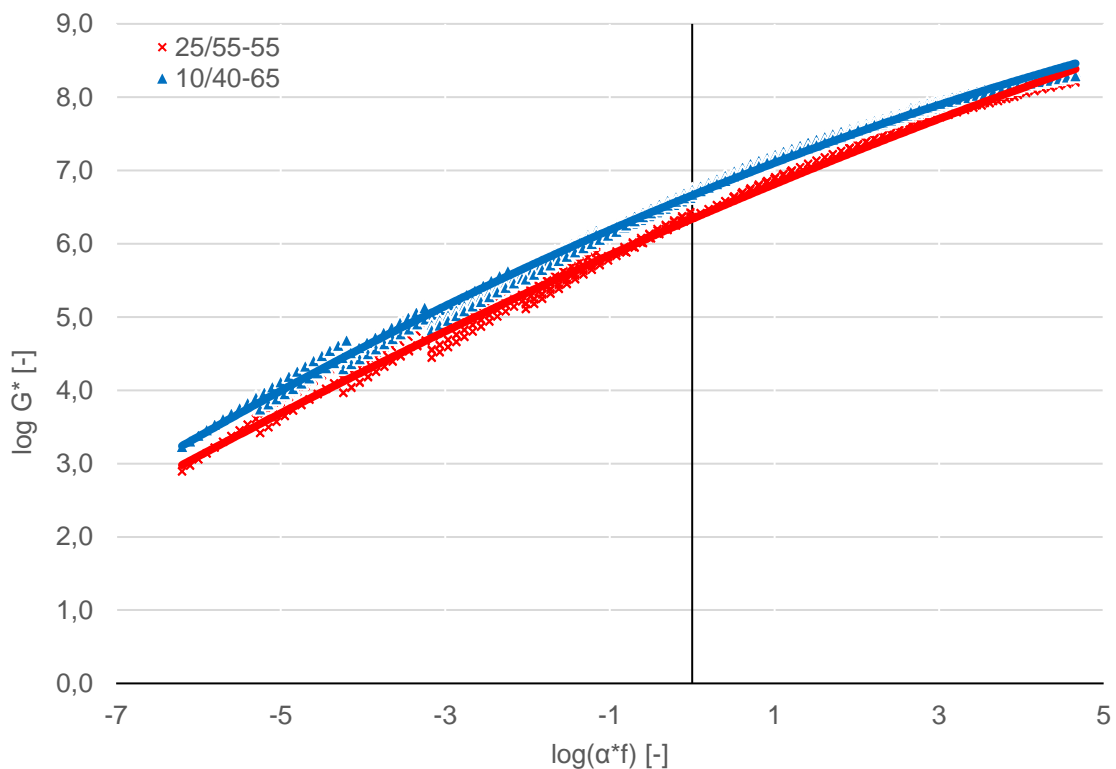


Abb. 3-1: Hauptkurven der untersuchten Bitumen

Nach den Untersuchungen an den Ausgangsstoffen der Asphaltgemische wurde deren endgültige Zusammensetzung festgelegt. Dabei sollte die Korngrößenverteilung der Deck- und Binderschichten zweifach und der Bindemittelgehalt je Korngrößenverteilung mindestens vierfach variiert werden. Des Weiteren wurde bei jeweils einer Deck- und

Binderschicht die Bitumensorte variiert. Damit der Einfluss der Korngrößenverteilung der Asphaltgemische auf die Materialeigenschaften bestimmt werden konnte, mussten die Sieblinien der einzelnen Deck- und Binderschichtgemische möglichst weit auseinander liegen. Somit wurde für die Variation der Korngrößenverteilung (KGV) des SMA 11 S die obere (feine KGV) und die untere (grobe KGV) des Toleranzbereiches der TL Asphalt-StB 07/13 verwendet. Die Korngrößenverteilung der Binderschichtgemische wurde nach dem gleichen Prinzip variiert. Somit wurde für den AC 16 B S SG die obere (feine KGV) und für den SMA 16 B S die untere (grobe KGV) nach den Vorlagen Hinweise für die Planung und Ausführung von alternativen Asphaltbindergemische (H AI ABi) als Sieblinie verwendet.

Mithilfe der Untersuchungen des Gesteins und der Bitumen wurde als nächster Schritt der Bindemittelbedarf der Asphaltgemische nach dem Verfahren von Radenberg und Bedekovic ermittelt [Radenberg 1996; Bedekovic 1957]. Bei diesem Verfahren wird der notwendige Bindemittelbedarf unter der Betrachtung der spezifischen Oberfläche, der Bitumenfilmdicke, dem tatsächlichen Massenanteil der Gesteinsfraktion und der Kornformkennzahl ermittelt. Der notwendige Bindemittelbedarf wird durch die Gleichungen 3 bis 5 berechnet. Die ausführlichen Berechnungen der Asphaltgemische sind in Anlage 2 dargestellt. In der Tabelle 3-5 sind die Ergebnisse des Bindemittelbedarfs der Asphaltgemische zusammengefasst.

$$O = \sum O_{spk} * \frac{M_K}{\rho_{RK}} \quad \text{Gleichung 3}$$

$$f_{sK} = 0,36 * O * M_{sK} \quad \text{Gleichung 4}$$

$$BM = O * (f_{sK} + B_f) \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

- O Gesamtoberfläche der Mineralstoffe [cm<sup>2</sup>/g]
- O<sub>spk</sub> spezifische Oberfläche [cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>]
- M<sub>K</sub> Massenanteil der Gesteinsfraktion [Gew.-%/100]
- P<sub>RK</sub> Gesteinsrohichte [g/cm<sup>3</sup>]
- f<sub>sK</sub> Faktor schlecht geformter Körner [cm<sup>2</sup>/g]
- M<sub>sK</sub> Anteil schlecht geformter Körner [Gew.-%/100]
- BM Bindemittelbedarf
- B<sub>f</sub> [g/cm<sup>2</sup>\*100]

| Asphaltgemisch                       | Bindemittelbedarf |
|--------------------------------------|-------------------|
| SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung | 7,0 M-%           |
| SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung | 5,8 M-%           |
| AC 16 B S SG                         | 7,0 M-%           |
| SMA 16 B S                           | 5,4 M-%           |

Tab. 3-5: Bindemittelbedarf der Asphaltgemische



Das Verfahren wurde zur Ermittlung des Bindemittelbedarfs für dünne Schichten im Kalteinbau entwickelt. Für die Asphaltdeckschichtgemische und dem SMA 16 B S wird mithilfe des Verfahrens jeweils ein realistischer Bindemittelbedarf ermittelt. Das Verfahren zeigt jedoch Grenzen bei der Ermittlung des Bindemittelbedarfs für den stetig gestuften Asphaltbeton, aufgrund des deutlich zu hohen Bindemittelgehaltes des Asphaltbindergemisches, auf. Somit wurden zur endgültigen Festlegung der Spanne für die Variation des Bindemittelgehaltes Erstprüfungen an allen Asphaltgemischen durchgeführt. Durch diese beiden Untersuchungen und dem Beschluss des Projektbegleitenden Ausschusses wurde der Bindemittelgehalt, wie in Tabelle 3-6 ersichtlich, variiert.

| Asphaltgemisch      | Bitumen-sorte | Anzahl der Gemische | Bindemittelgehalt [M-%] |
|---------------------|---------------|---------------------|-------------------------|
| SMA 11 S: feine KGV | 25/55-55A     | 5                   | 6,0/ 6,5/ 7,0/ 7,5/ 8,0 |
| SMA 11 S: grobe KGV | 25/55-55A     | 4                   | 6,0/ 6,5/ 7,0/ 8,0      |
| SMA 11 S: feine KGV | 10/40-65A     | 1                   | 7,0                     |
| AC 16 B S SG        | 10/40-65A     | 5                   | 4,5/ 5,0/ 5,5/ 6,0/ 6,5 |
| SMA 16 B S          | 10/40-65A     | 4                   | 5,0/ 5,5/ 6,0/ 6,5      |
| AC 16 B S SG        | 25/55-55A     | 1                   | 5,5                     |

Tab. 3-6: Übersicht der Asphaltgemische

### 3.2 Herstellung und Vorbereitung der Asphaltprobekörper

Die Asphaltmischgüter wurden an einem Mischwerk in Dresden unter realen Bedingungen hergestellt. Die Asphaltgemische mit derselben Bitumensorte wurden an einem Tag hergestellt um zu gewährleisten, dass das Bitumen aus derselben Charge stammt. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Sieblinie der Asphaltgemische wurden zuvor Probemischungen hergestellt und extrahiert um die Mischwerkseinstellungen für die jeweilige Korngrößenverteilung zu optimieren. Im Straßenbaulabor der TU Dresden erfolgte anschließend die Extraktion der Asphaltgemische und die Bestimmung der Roh- und Raumdichten am Marshallprobekörper. Die Abbildungen 3-2 bis 3-5 stellen die Extraktionsergebnisse für die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen dar. Die Sieblinien der untersuchten Asphaltgemische entsprechen zum Größtenteils den Vorgaben. Die Differenzen der Korngrößenverteilung befinden sich im Toleranzbereich der Vorgaben der ZTV Asphalt-StB 07. Somit kann der Einfluss des Bindemittelgehaltes innerhalb einer Korngrößenverteilung auf die Asphalteeigenschaften ermittelt werden. Die vollständigen Ergebnisse der Extraktionen sind in Anlage 3 aufgeführt.

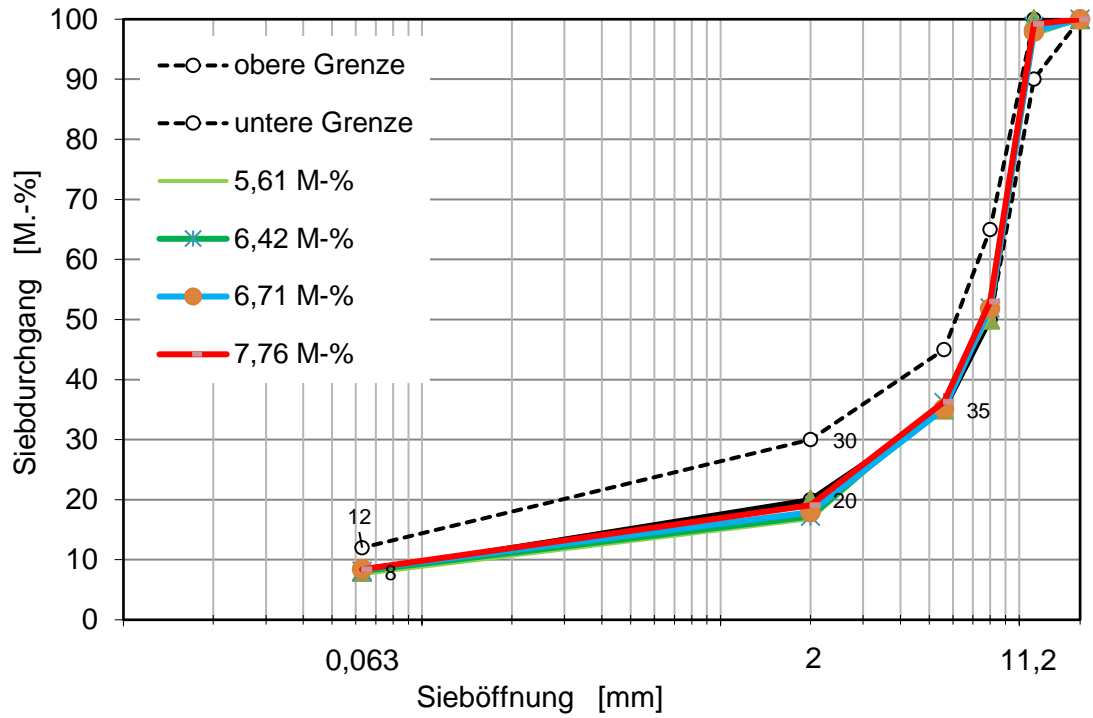


Abb. 3-2: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

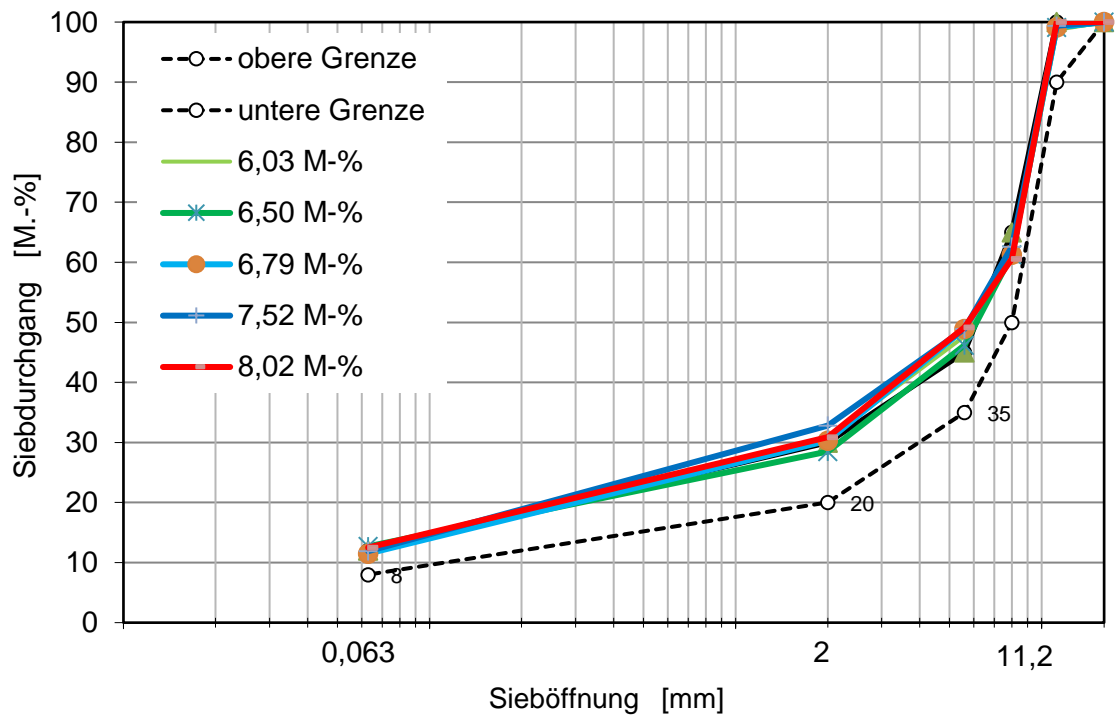


Abb. 3-3: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung

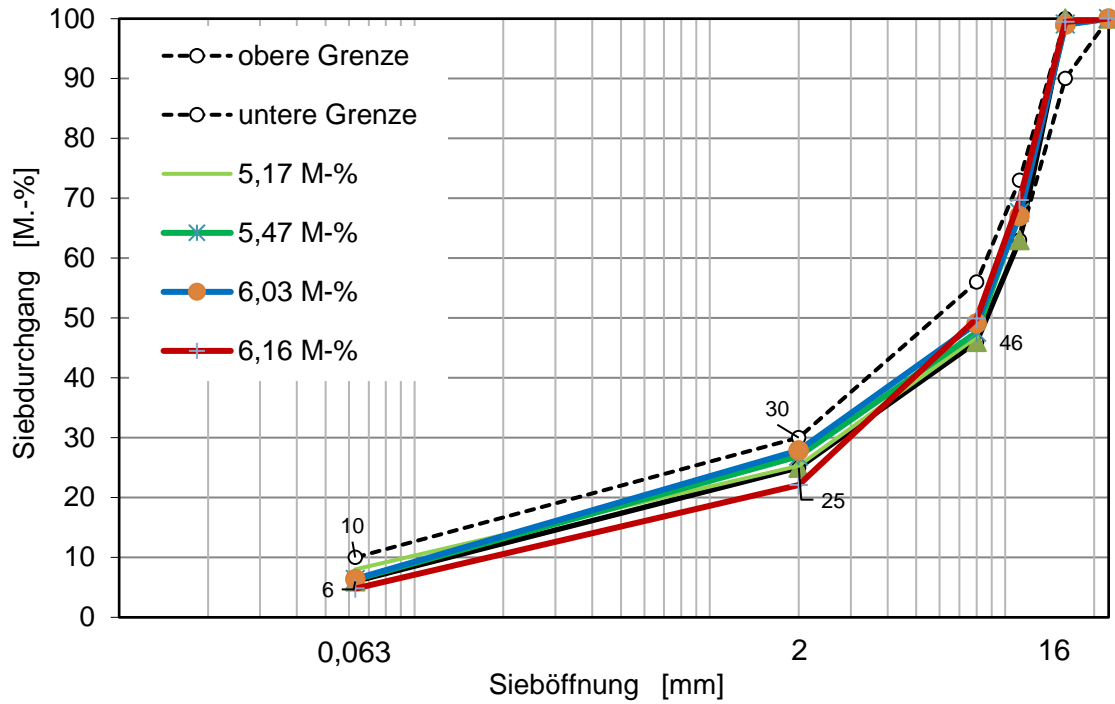


Abb. 3-4: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 16 B S

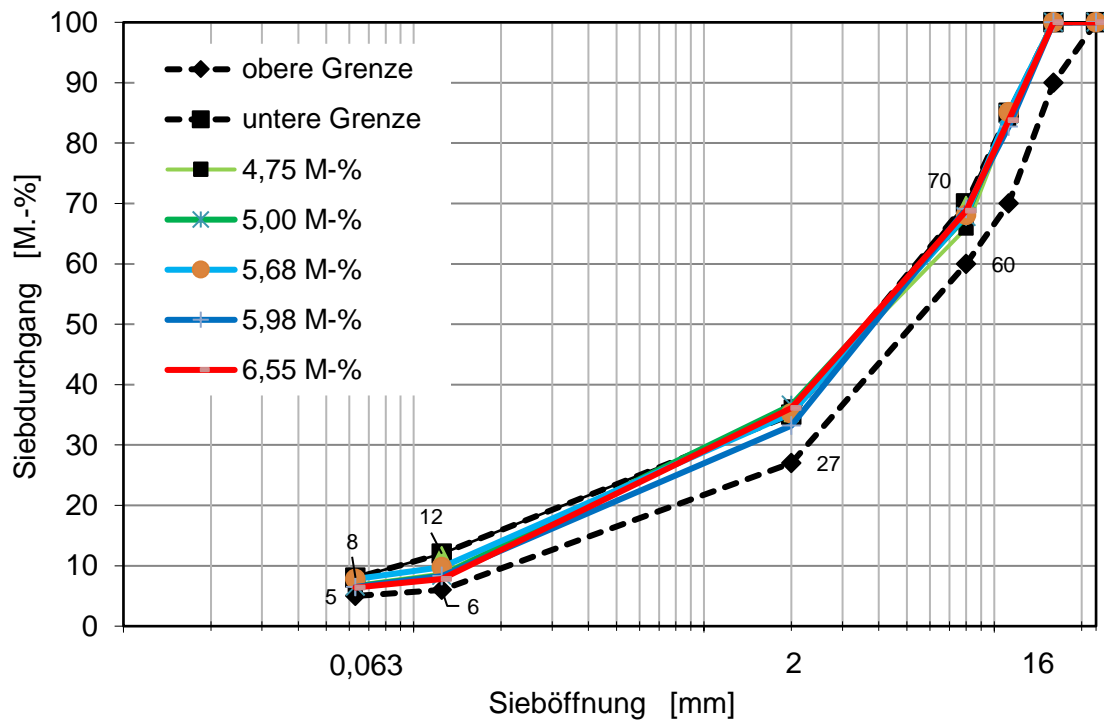


Abb. 3-5: Sieblinie der Asphaltgemische AC 16 B S SG

Die Variante SMA 16 B S mit einem Bindemittelgehalt von 6,16 M-% wurde allerdings mit deutlichen Abweichungen zur geplanten Gemischzusammensetzung in der Asphaltmischanlage hergestellt. Die Sieblinie unterschied sich deutlich von den anderen Varianten und der Bindemittelgehalt war ebenfalls zu gering. Von einer erneuten Herstellung dieser Variante wurde jedoch abgesehen, da dann die Vergleichbarkeit aufgrund einer anderen Bitumencharge nicht mehr gegeben wäre. Die Versuchsergebnisse dieser Variante werden deshalb im Folgenden nicht mit behandelt.

Die Plattenherstellung erfolgte nach der Prüfvorschrift TP Asphalt-StB Teil 33 A mit einem Walzsegmentverdichter der Firma Infratest, der es ermöglicht Asphaltplatten bis zu einer Höhe von 32 cm herzustellen. Dadurch ist es möglich, alle Probekörper, ebenfalls für den Triaxialversuch, in Verdichtungsrichtung aus den hergestellten Platten herauszubohren und somit praxisadäquate Eigenschaften der Probekörper sicherzustellen. Zur Sicherstellung eines homogenen Verdichtungsgrades innerhalb der Probekörper, werden die Asphaltplatten ab einer Höhe von 20 cm mehrlagig hergestellt. Dabei wird die Zwischenlage mit Hilfe einer Spachtel angeraut, um den Verbund zwischen den Lagen zu gewährleisten. Anschließend werden die Probekörper aus den Platten herausgebohrt, auf Länge gesägt, gegebenenfalls planparallel geschliffen und ausgemessen. Die Lagerung erfolgt in einem geschlossenen Raum, vor Sonnen-einstrahlung und Witterung geschützt und bei einer Lufttemperatur von circa 20°C.

### **3.3 Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens**

Die Bestimmung der Hauptkurve der Asphaltgemische zur Beurteilung des Steifigkeitsverhaltens sollte anhand von einaxialen Druck-Schwellversuchen erfolgen. Zur Optimierung der Versuchsanordnung wurden Vorversuche mit einem Kunststoffprobekörper, dessen E-Modul bei Raumtemperatur bekannt war, durchgeführt.

Die Messung der vertikalen Dehnungen konnte zum einen über drei induktive Wegaufnehmer, die an der Oberseite des Laststempels angeordnet sind, oder über drei Extensiometer, die direkt am Probekörper befestigt sind, erfolgen. Anschließend wurde auf Grundlage der gemessenen Verformungen der E-Modul des Probekörpers bestimmt. Die Vorversuche zeigten, dass die Ermittlung des E-Moduls des Kunststoffprobekörpers mit Hilfe der Aufzeichnung der vertikalen Verformungen über die Extensiometer deutlich näher am bekannten E-Modul lag.

Bei diesen Vorversuchen wurden die Extensiometer in Probekörpermitte direkt an der Mantelfläche mithilfe von Gummiringen (Abbildung 3-6) befestigt. Die Extensiometer besitzen allerdings eine gerade Schneide, sodass nur eine punktuelle Berührung mit der zylindrischen Mantelfläche des Probekörpers möglich ist. Des Weiteren kam es bei dieser Befestigung dazu, dass die Extensiometer aufgrund der Belastung wegrutschten und somit fehlerhafte Messergebnisse lieferten. Deshalb wurden die Magnete mit Sekundenkleber an den Probekörper befestigt um die Schneiden der Extensiometer daran zu befestigen (Abbildung 3-6). Dies sollte eine flächige Berührung der Schneiden mit dem Magneten und somit mit dem Probekörper

ermöglichen und Messfehler weiter minimieren. Die Vorversuche mit dem Kunststoffprobekörper belegten, dass bei dieser Befestigung der Extensiometer der bekannte E-Modul des Dummys ermittelt wurde und dass die Streuung der Versuchsergebnisse deutlich geringer war als bei der Befestigung mit den Gummiringen.

Aufgrund dieser Vorversuche wurde festgelegt, dass die Messung der vertikalen Verformungen anhand der Extensiometer erfolgt und diese mit Hilfe von Magneten direkt am Probekörper befestigt werden.



Abb. 3-6: Befestigung der Extensiometer mithilfe von Gummiringen (links) und Magneten (rechts)

### 3.3.1 Versuchsdurchführung

Die Bestimmung der Hauptkurven zur Beurteilung des Steifigkeitsverhaltens erfolgte anhand einaxialer Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm. Damit kann die Hauptkurve der Asphaltgemische ebenfalls bei Temperaturen über 20°C versuchstechnisch bestimmt werden. Der Probekörper wurde mindestens 6 Stunden vor Versuchsbeginn auf die jeweilige Prüftemperatur temperiert und anschließend zentrisch unter den Laststempel in die Prüfeinrichtung eingebaut. Zur Minimierung der Querdehnungsbehinderung wird zwischen dem Probekörper und dem Laststempel bzw. der Lastplatte eine Teflonfolie angeordnet.

Die Versuche wurden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen und Frequenzen durchgeführt in Anlehnung zur TP Asphalt-StB Teil 26 (Entwurf Stand 2017). Die Belastung der Probekörper erfolgt in Form einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwellbelastung ohne Lastpausen. Die Unterspannung dient der Lagesicherung des Probekörpers während des Versuches und beträgt 0,035 MPa für alle Versuche. Die Oberspannung wird in Abhängigkeit der Prüftemperatur und der Prüffrequenz so festgelegt, dass die elastischen Dehnungen in Probekörpermitte circa 0,065 ‰ betragen.

Die Oberspannungen werden mit Hilfe von Vorversuchen an separaten Probekörpern versuchstechnisch ermittelt. Die Versuchsparameter zur Bestimmung der Hauptkurve der Asphaltgemische sind in Tabelle 3-7 aufgeführt. Die Prüfreihenfolge beginnt aufsteigend mit der geringsten Temperatur und absteigend mit der höchsten Frequenz. Für die Versuche bei einer Temperatur von 35°C wurde ein neuer Probekörper verwendet, damit Teilschädigungen aus den vorangegangenen Versuchen, die das Ergebnis beeinflussen können, ausgeschlossen sind. Die Messung der vertikalen Verformungen während des Versuches erfolgen über drei Extensiometer, die in Probekörpermitte jeweils um 120° versetzt angeordnet sind.

| T [°C]         | F [Hz]                   | $\epsilon_{ele,anf}$ [‰] | $\sigma_u$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_o$ [N/mm <sup>2</sup> ]     |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| -10; 5; 20; 35 | 10; 5; 3; 1;<br>0,1; 0,3 | ca. 0,065                | 0,035                           | temperatur- und<br>frequenzabhängig |

Tab. 3-7: Versuchsparameter zur Bestimmung der Hauptkurve

### 3.3.2 Bestimmung der Hauptkurve

Die Bestimmung der Hauptkurve für die Asphaltgemische erfolgte in Anlehnung zur TP Asphalt-StB Teil 26 (Stand Entwurf 2017).

Die Versuche werden in Abhängigkeit zur Belastungsfrequenz mit einer bestimmten Anzahl an Lastwechsel durchgeführt. Zur Bestimmung der Regressionsparameter für die aufgebrachte Last und der vertikalen Verformungen werden nur bestimmte Bereiche der Lastwechsel ausgewertet. Diese sind in Tabelle 3-8 angegeben.

| Belastungsfrequenz f [Hz] | Lastwechselzahl N [-] | Auswertung der Lastwechsel |
|---------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 10,0                      | 110                   | 98 - 102                   |
| 5,0                       | 100                   | 93 - 97                    |
| 3,0                       | 60                    | 53 - 57                    |
| 1,0                       | 0                     | 13 - 17                    |
| 0,3                       | 15                    | 8 - 12                     |
| 0,1                       | 10                    | 3 - 7                      |

Tab. 3-8: Lastwechselzahlen für die Steifigkeitsversuche

Die Regressionsmodelle für die Bestimmung der Parameter für die aufgebrachte Kraft sind durch Gleichung 6 bzw. für die vertikale Verformung durch Gleichung 7 angegeben.

$$F(t) = A + B + \sin(2 * \pi * f * t + C) \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

- F Kraft [N]
- f Belastungsfrequenz [Hz]
- t Zeitpunkt des Messpunktes [s]
- A Absolutglied des Sinussignals der Kraft [N]
- B Amplitude der Kraft [N]
- C Phasenwinkel des Sinussignals der Kraft [rad]

$$u(t) = a + b * \sin(2 * \pi * f + c) + d * t \quad \text{Gleichung 7}$$

mit:

- u vertikale Gesamtverformung des Probekörpers [mm]
- f Belastungsfrequenz [Hz]
- t Zeitpunkt des Messpunktes [s]
- a Absolutglied des Sinussignals der vertikalen Verformung [mm]
- b Amplitude der vertikalen Verformung [mm]
- c Phasenwinkel des Sinussignals der vertikalen Verformung [rad]
- d linearer Term des Sinussignals der vertikalen Verformung [mm/s]

Die elastischen Dehnungen im Mittelpunkt des Probekörpers werden nach Gleichung 8 ermittelt.

$$\epsilon_{el} = \frac{\Delta u}{H} * \frac{(1+3*\nu)}{(4+\pi*\nu-\pi)} * 1000 \quad \text{Gleichung 8}$$

mit:

- $\epsilon_{el}$  elastische vertikale Dehnung [‰]
- H Probekörperhöhe [mm]
- $\Delta u$  Differenz von maximaler und minimaler vertikalen Gesamtverformung [mm]
- $\nu$  Querdehnzahl [-]

Die Querdehnzahl wird in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt. In Tabelle 3-9 ist die Querdehnzahl für die untersuchten Prüftemperaturen angegeben.

| Temperatur T [°C] | Querdehnzahl $\nu$ [-] |
|-------------------|------------------------|
| -10               | 0,174                  |
| 5                 | 0,217                  |
| 20                | 0,298                  |
| 35                | 0,394                  |

Tab. 3-9: Querdehnzahl für die untersuchten Prüftemperaturen

Die Berechnung des Steifigkeitsmoduls für die Einzelversuche erfolgt über Gleichung 9.

$$|E^*| = \frac{\Delta F}{\Delta u * D} * \left(\frac{4}{\pi} - 1 + \nu\right) \quad \text{Gleichung 9}$$

mit:

- $|E^*|$  absoluter Wert des komplexen E-Moduls [MPa]
- $\Delta F$  Differenz von maximaler und minimaler Kraft [N]
- $\Delta u$  Differenz von maximaler und minimaler vertikaler Gesamtverformung [mm]
- D Durchmesser des Probekörpers [mm]
- $\nu$  Querdehnzahl [-]

Die Hauptkurve kann mit Hilfe der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz für eine Referenztemperatur bestimmt werden. Dadurch kann mit nur einem Faktor die Äquivalenz zwischen Prüftemperatur und Belastungsfrequenz auf den Steifigkeitsmodul hergestellt werden. Der Faktor  $\alpha_T$  bewirkt eine Verschiebung der Steifigkeitsmoduln einer Temperatur in Richtung der Frequenzachse. Die Gleichung des Faktors lautet:

$$\alpha_T = e^{\Phi * \left( \frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{T_0+273,15} \right)} \quad \text{Gleichung 10}$$

mit:

- $\alpha_T$  Verschiebungsfaktor [-]
- $\Phi$  materialspezifischer Parameter [-]
- $T$  Prüftemperatur [°C]
- $T_0$  Referenztemperatur 20°C.

Die Bestimmung der Hauptkurve erfolgt über Gleichung 11.

$$|E^*| = |E^*|_{-\infty} + \frac{|E^*|_{+\infty} - |E^*|_{-\infty}}{1 + e^{z_1 * x^* + z_0}} \quad \text{Gleichung 11}$$

mit:

- $|E^*|$  absoluter Wert des komplexen E-Moduls [MPa]
- $|E^*|_{+\infty}$  Grenzwert des Steifigkeitsmoduls bei sehr niedrigen Temperaturen und/oder hohen Frequenzen [MPa]
- $|E^*|_{-\infty}$  Grenzwert des Steifigkeitsmoduls bei sehr hohen Temperaturen und/oder niedrigen Frequenzen [MPa]
- $x^*$  beliebiger Wert auf der Abszissenachse der Hauptkurve [Hz]
- $z_1; z_0$  Materialparameter der Hauptkurve [-]

Dabei wird der beliebige Wert auf der Abszissenachse  $x^*$  mit folgender Gleichung berechnet:

$$x^* = \frac{\ln(\alpha_T * f)}{\ln(10)} \quad \text{Gleichung 12}$$

mit:

- $x^*$  beliebiger Wert auf der Abszissenachse der Hauptkurve [Hz]
- $\alpha_T$  Verschiebungsfaktor (Gleichung 10) [-]
- $f$  Belastungsfrequenz [Hz].

Die Grenzwerte der Hauptkurve werden über die Abhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen der aufgebrachten Kraft und den vertikalen Verformungen von dem Steifigkeitsmodul bestimmt. Abweichend von der TP Asphalt-StB Teil 26 wird nicht ein linearer Funktionsansatz zur Bestimmung der Grenzwerte verwendet, sondern ein Polynom 2. Grades. Dadurch kann der Grenzwert bei sehr hohen Temperaturen



und/oder niedrigen Frequenzen ebenfalls bestimmt werden. Der Funktionsansatz ist in Gleichung 13 angegeben.

$$\delta = k_1 |E^*|^2 + k_2 |E^*| + k_3 \quad \text{Gleichung 13}$$

mit:

$\delta$  Phasenverschiebung [rad]

$|E^*|$  absoluter Wert des komplexen E-Moduls [MPa]

$k_1, k_2$  Parameter zur Bestimmung der Grenzwerte

$k_3$  Parameter zur Bestimmung der Grenzwerte

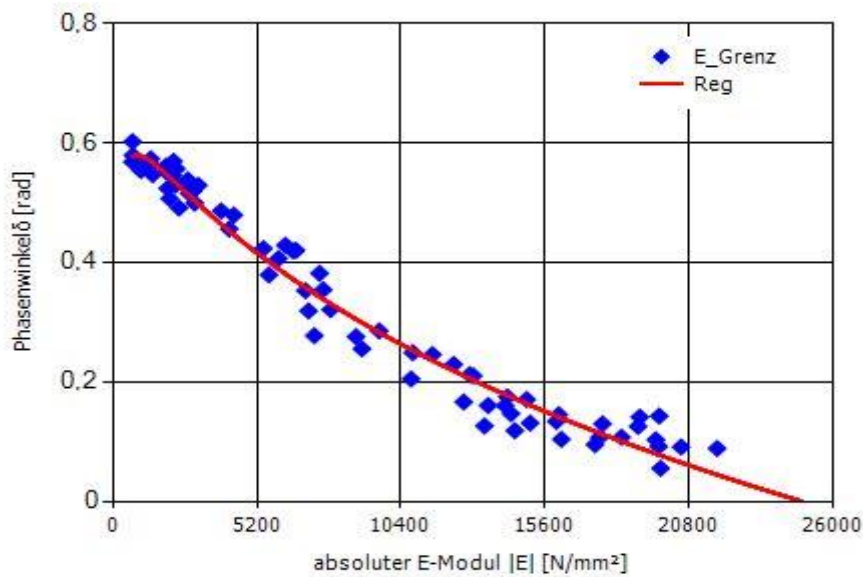


Abb. 3-7: grafische Darstellung der Bestimmung der Grenzwerte

In Abbildung 3-7 wird für ein Asphaltgemisch die Bestimmung der Grenzwerte über ein Polynom 2. Grades dargestellt. Die Schnittpunkte des Polynoms mit der Abszissenachse stellen jeweils die Grenzmodule dar. Bei diesem Asphaltgemisch wäre somit  $|E^*|_{-\infty} = 31$  MPa und  $|E^*|_{+\infty} = 24.881$  MPa. Die Hauptkurve des Asphaltgemisches ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

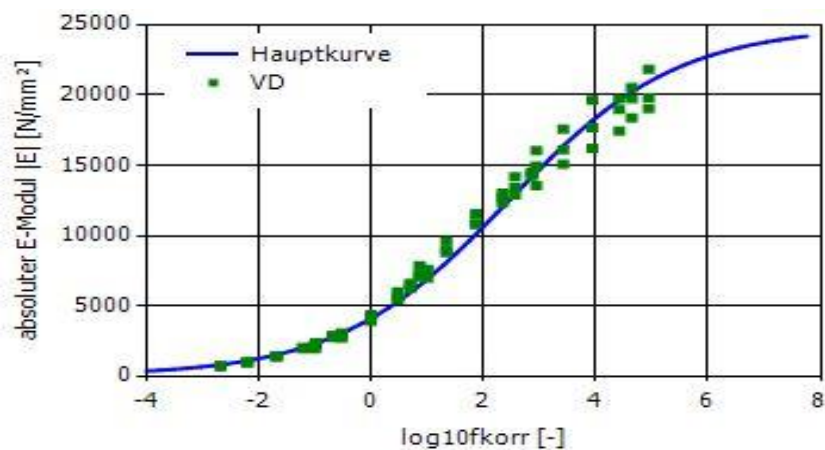


Abb. 3-8: Hauptkurve eines Asphaltgemisches

### 3.4 Bestimmung des Ermüdungsverhaltens

Die Bestimmung des Ermüdungsverhaltens der Asphaltgemische erfolgte mit Hilfe des Spaltzug-Schwellversuches in Anlehnung an die TP Asphalt-StB Teil 24, Entwurf 2018.

#### 3.4.1 Versuchsdurchführung

Die Spaltzug-Schwellversuche erfolgten an Probekörpern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 40 mm (bis zu einem Größtkorn von 16mm). Die Probekörper wurden aus Platten herausgebohrt, die mit Hilfe des Walzsegmentverdichters hergestellt wurden. Die vorbereiteten Probekörper temperierten vor Versuchsbeginn mindestens 4 Stunden bei Prüftemperatur. Anschließend erfolgte der Einbau der Probekörper in den Halterahmen zur Positionierung der beiden induktiven Wegaufnehmer. Die Wegaufnehmer wurden an den Probekörper befestigt, sodass die Messung der Verformung in der Mitte des Probekörpers unter der Lastachse erfolgte. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

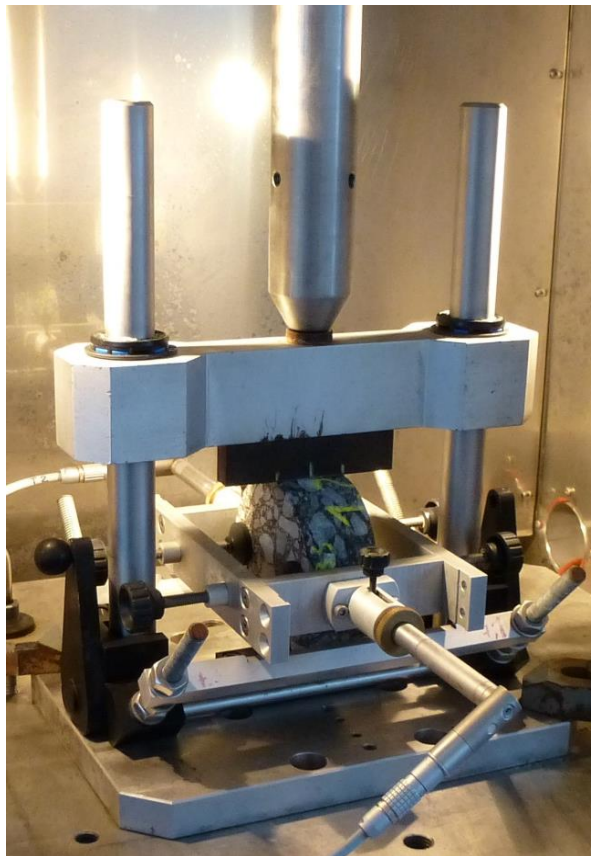


Abb. 3-9: Versuchsaufbau des Spaltzug-Schwellversuches

Zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion eines Asphaltgemisches wird ein Probekörper zur Bestimmung der Oberspannungen als Vorversuch und jeweils drei Probekörper je Beanspruchungszustand benötigt. Zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion werden drei Beanspruchungszustände aufgebracht. Bei allen Versuchen beträgt die Belastungsfrequenz 10 Hz und die Prüftemperatur 20°C. Die Belastung der Probekörper erfolgt in Form einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwingung ohne Lastpause. Die

Unterspannung beträgt 0,035 MPa und dient der Lagesicherung des Probekörpers. Die Oberspannung wird mit Hilfe des Vorversuches bestimmt. Dabei werden drei unterschiedliche Spannungszustände aufgebracht, sodass die elastischen Anfangsdehnungen zwischen 0,050 ‰ und 0,300 ‰ und die Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums zwischen 1.000 und 1000.000 liegen. Während des Versuches ist die axiale Kraft, die horizontalen Verformungen, die Lastwechselzahl und die Versuchszeit aufzuzeichnen.

### 3.4.2 Bestimmung der Ermüdungsfunktion

Die Bestimmung der Ermüdungsfunktion erfolgte nach TP Asphalt-StB Teil 24 (Entwurf, Stand 2017). Die Regressionsmodelle zur Bestimmung der Regressionsparameter für die axiale Kraft und die horizontalen Verformungen werden durch Gleichung 6 bzw. Gleichung 7 bestimmt. Die elastischen horizontalen Dehnungen werden nach Gleichung 14 ermittelt.

$$\epsilon_{el} = \frac{\Delta u}{D} * \frac{(1+3*\nu)}{(4+\pi*\nu-\pi)} * 1000 \quad \text{Gleichung 14}$$

mit:

$\epsilon_{el}$  elastische vertikale Dehnung [‰]

D Probekörperdurchmesser [mm]

$\Delta u$  Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung [mm]

$\nu$  Querdehnzahl [-]

Die Berechnung des Steifigkeitsmoduls erfolgt über Gleichung 15.

$$|E^*| = \frac{\Delta F}{\Delta u * H} * \left(\frac{4}{\pi} - 1 + \nu\right) \quad \text{Gleichung 15}$$

mit:

$|E^*|$  absoluter Wert des komplexen E-Moduls [MPa]

$\Delta F$  Differenz von maximaler und minimaler Kraft [N]

$\Delta u$  Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung [mm]

H Probekörperhöhe [mm]

$\nu$  Querdehnzahl [-]

Auf Grundlage des Konzeptes der dissipierten Energieverhältnisse [Rowe 1993] wird zunächst der Energy Ratio nach Gleichung 15 berechnet und als Funktion in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl dargestellt (Abbildung 3-10).

$$ER_N = |E_N^*| * N \quad \text{Gleichung 16}$$

mit:

$ER_N$  Energy Ratio bei der betrachteten Lastwechselzahl  $N$  [MPa]

$|E_N^*|$  berechneter Steifigkeitsmodul bei der betrachteten Lastwechselzahl  $N$  [MPa]

$N$  betrachtete Lastwechselzahl [-]

Die Lastwechselzahl, bei der im Probekörper Makrorisse auftreten, wird als Ermüdungslastwechselzahl  $N_{\text{Makro}}$  definiert. Diese Ermüdungslastwechselzahl kann über das Maximum der Funktion von  $ER_N$  ermittelt werden.

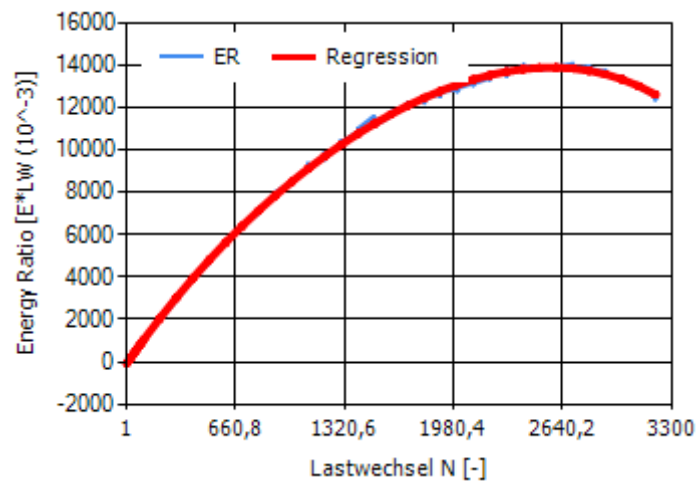


Abb. 3-10: Bestimmung der Ermüdungslastwechselzahl  $N_{\text{Makro}}$

Die Ermüdungsfunktion wird in Abhängigkeit der elastischen, horizontalen Anfangsdehnungen bestimmt. Die Berechnung der elastischen Anfangsdehnung erfolgt über Gleichung 15. Dabei wird die Differenz zwischen maximaler und minimaler horizontaler Verformung des Probekörpers zwischen dem 98. und 102. Lastwechsel bestimmt. Die Ermüdungsfunktion lautet:

$$N_{\text{Makro}} = k * \varepsilon_{el,anf}^n \quad \text{Gleichung 17}$$

mit:

$N_{\text{Makro}}$  Ermüdungslastwechselzahl [-]

$\varepsilon_{el,anf}$  elastische, horizontale Anfangsdehnung [‰]

$k, n$  Materialparameter [-]

### 3.5 Bestimmung des Tieftemperaturverhaltens

Zur Ermittlung der Zugspannungen, welche bei tiefen Temperaturen durch behinderte thermische Dehnungen auftreten können, wurden Abkühlversuche gemäß TP Asphalt-StB 46 A durchgeführt. Es wurden je Asphaltvarianten drei Probekörper getestet. Die Versuche wurden am Transferzentrum Straßenwesen in der Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig mbH durchgeführt.

### 3.5.1 Versuchsdurchführung

Die Probekörper werden quer zur Walzrichtung aus den Asphaltplatten gesägt. Die Probekörperabmessungen (Breite x Höhe x Länge) betragen je nach Größtkorn D:

- für  $D \leq 11,2$  mm 40 mm x 40 mm x 160 mm
- für  $11,2$  mm  $< D \leq 22,4$  mm 50 mm x 50 mm x 160 mm.

Mittels eines Zwei-Komponentenkleber auf Epoxidharzbasis werden die Probekörper mit den beiden Adapterplatten verklebt und anschließend belastungs- und verformungsfrei gelagert bis eine dauerhafte Klebeverbindung sichergestellt ist. Der prismatische Probekörper wird zusammen mit den Adapterplatten der Länge nach in die Prüfeinrichtung eingespannt und auf die Starttemperatur von 20°C temperiert. Die Lufttemperatur der Prüfkammer wird bei Versuchsbeginn mit einer Temperaturrate von  $dT = -10 \frac{K}{h}$  abgekühlt. Während des Versuches wird die Probekörperlänge konstant gehalten und die auftretende axiale Kraft zusammen mit der Kerntemperatur des Probekörpers aufgezeichnet. Der Abkühlversuch wird beendet, wenn der Probekörper gerissen ist oder die Lufttemperatur -40°C erreicht wird.

### 3.5.2 Versuchsauswertung

Die Ergebnisse des Abkühlversuches sind der Verlauf der kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit der Kerntemperatur des Probekörpers, sowie die erreichte Bruchspannung mit der dazugehörigen Bruchtemperatur.

## 3.6 Bestimmung des Verformungsverhaltens

Der Einfluss der Asphaltzusammensetzungen auf das Verformungsverhalten wird mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch und an ausgewählten Asphaltgemischen mit dem Triaxialversuch mit Druckbeanspruchung überprüft. Die Untersuchung der Verformungsbeständigkeit erfolgt in Teilschritten:

- Einaxiale Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1
- Einaxiale Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörpern
- Einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper
- Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung an den optimierten Asphaltgemischen.

Die verschiedenen Versuchsdurchführungen kommen zur Anwendung, um in Auswertung der Versuche und der geplanten Prognoserechnungen der Spurrinnenbildung beurteilen zu können, ob zum einen der einaxiale Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 den Widerstand der Asphalte gegenüber bleibenden Verformungen korrekt beurteilen kann. Zum anderen soll die Frage beantwortet werden, ob es möglich ist, ausschließlich anhand der Ergebnisse der einaxialen Druck-Schwellversuche Spurrinnenprognoserechnungen durchführen und auf die Verwendung von Triaxialversuchen verzichten zu können.

## 3.6.1 Einaxiale Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1

Bei dem einaxialen Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 werden Asphaltprobekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 60 mm geprüft. Die Probekörper werden aus Platten herausgebohrt und anschließend planparallel geschliffen. Der vorbereitete Probekörper wird für 3 Stunden auf die Versuchstemperatur von 50°C temperiert und anschließend zentrisch unter den Laststempel in die Prüfeinrichtung eingebaut. Der Versuch beginnt mit der Aufbringung einer Vorbelastung über eine Dauer von 120 s. Danach folgen die Impulsbelastung mit einer Oberspannung von 0,35 MPa und anschließend eine Lastpause von 1,5 s. Während der Lastpause beträgt die Unterspannung zur Lagesicherung des Probekörpers 0,025 MPa. Das Belastungsschema ist in Abbildung 3-11 dargestellt.

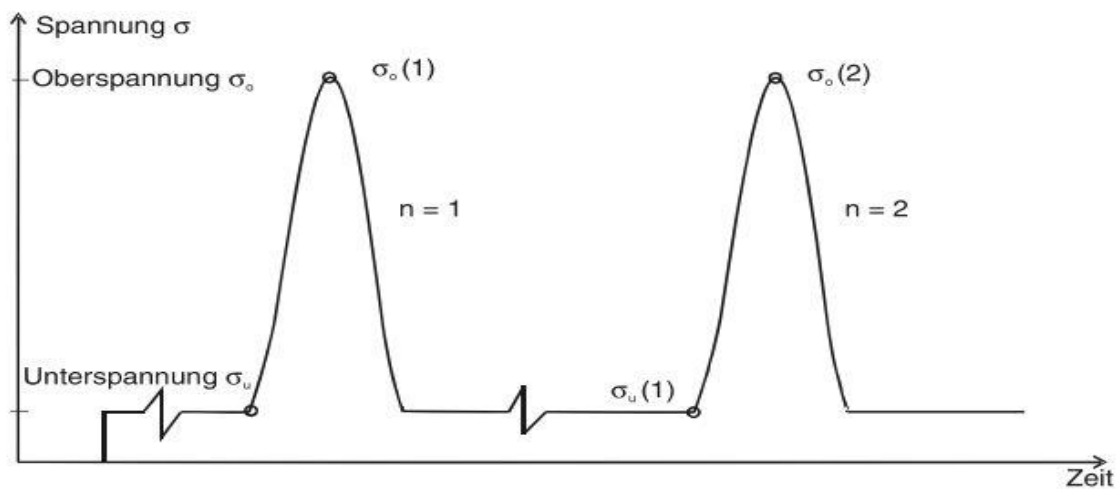


Abb. 3-11: Belastungsschema nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 [TP Asphalt-StB]

Während des Versuches werden die Belastungszyklen gezählt und die bleibenden Verformungen unter der oberen Lastplatte in Abhängigkeit der Belastungszyklen durch drei induktive Wegaufnehmer aufgezeichnet. Die induktiven Wegaufnehmer werden auf der oberen Lastplatte angeordnet. Der Versuch wird entweder nach 10.000 Belastungszyklen oder beim Überschreiten einer Dehnung von 40 ‰ beendet.

Die Grundlage der Auswertung bildet die aus dem Versuch erhaltenen plastischen Verformungen in Abhängigkeit zu der Anzahl der Belastungszyklen. Die daraus resultierenden Dehnungen werden nach Gleichung 18 ermittelt. Als weitere Kenngröße wird die Dehnungsrate im Punkt ( $n_i$ ;  $\varepsilon_i$ ) nach Gleichung 19 berechnet.

$$\varepsilon_n = \frac{h_0 - h_n}{h_0} * 1000 \quad \text{Gleichung 18}$$

$$\varepsilon_i^* = \frac{\varepsilon_{(i+100)} - \varepsilon_{(i-100)}}{n_{(i+100)} - n_{(i-100)}} \quad \text{Gleichung 19}$$

mit:

$\varepsilon_n$  Dehnung des Probekörpers nach n Belastungszyklen [%]

$h_0$  Höhe des Probekörpers nach der Vorbelastung [mm]

$h_n$  Höhe des Probekörpers nach n Belastungszyklen [mm]

$\varepsilon_i^*$  Dehnungsrate des Probekörpers im Messpunkt i [%\*10<sup>-4</sup>/n]

$\varepsilon_i$  Dehnung des Probekörpers im Messpunkt i [%]

$n_i$  Anzahl der Belastungszyklen im Messpunkt i [-]

Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens der Asphaltgemische wird die Impulskriechkurve mit folgendem Approximationsansatz gebildet:

$$\varepsilon(n) = a + b * n^k + c * (e^{d*n} - 1) \quad \text{Gleichung 20}$$

mit:

a; b; c; d; k Materialparameter.

Als maßgebende Kenngröße wird nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 die Dehnungsrate im Wendepunkt herangezogen. Die jeweilige Dehnung und die Anzahl der Belastungszyklen soll mit angegeben werden. Die Bestimmung des Wendepunktes erfolgt über den Verlauf der Kurve der Dehnungsrate, die aus der Impulskriechkurve abgeleitet wird. Das Minimum dieser Kurve stellt die Dehnungsrate im Wendepunkt dar. Wenn der Wendepunkt im Versuch nicht erreicht wird, ist die Dehnungsrate am Versuchsende die maßgebende Kenngröße. Die dazugehörige Dehnung und die Anzahl der Belastungszyklen sind ebenfalls mit anzugeben.

### 3.6.2 Einaxiale Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper

Bei dem einaxialen Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper werden Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm geprüft. Der Probekörper wurde mindestens 6 Stunden vor Versuchsbeginn auf die jeweilige Prüftemperatur temperiert und anschließend zentrisch unter den Laststempel in die Prüfeinrichtung eingebaut. Zur Minimierung der Querdehnungsbehinderung wird zwischen dem Probekörper und dem Laststempel bzw. der Lastplatte eine Teflonfolie angeordnet. Die Versuche werden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen bei einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Der Versuch beginnt mit einer Vorbelastung mit 500 Lastwechsel um eventuelle Unebenheiten des Probekörpers auszugleichen. Die Belastung der Probekörper erfolgt in Form einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwellbelastung ohne Lastpausen. Die Unterspannung dient der Lagesicherung des Probekörpers während des Versuches und beträgt 0,020 MPa für alle Versuche. Während eines Versuches wird der Probekörper mit 3 unterschiedlichen Oberspannungen mit jeweils 30.000 Lastwechsel belastet. In Tabelle 3-10 ist das Versuchsschema für ein Asphaltgemisch dargestellt. Die Messung der vertikalen Verformungen während des Versuches erfolgten über drei Extensiometer, die in

Probekörpermitte jeweils um  $120^\circ$  versetzt angeordnet sind. Die Extensiomter wurden mit Hilfe von Gummiringen direkt am Probekörper angebracht, da die Klebeverbindung mit dem Magneten über die Versuchsdauer von 3 Stunden unter den Belastungen versagte. Zusätzlich sind noch 3 induktive Wegaufnehmer auf dem Laststempel positioniert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Der Versuch endet nach dem Aufbringen der 3 unterschiedlichen Oberspannungen oder wenn die plastische Gesamtverformung von 9 mm erreicht wird.

| Probekörper | T<br>[°C] | Laststufe (je 30.000 Lastwechsel) [MPa] |       |       |      |
|-------------|-----------|---|-------|-------|------|
|             |           | 1                                       | 2     | 3     | 4    |
| PK 1        | 30        | 0,10                                    | 0,30  | 0,50  | 0,70 |
| PK 2        | 30        | 0,20                                    | 0,40  | 0,60  | -    |
| PK 3        | 30        | 0,15                                    | 0,35  | 0,55  | -    |
| PK 4        | 40        | 0,10                                    | 0,3   | 0,5   | -    |
| PK 5        | 40        | 0,20                                    | 0,35  | 0,45  | -    |
| PK 6        | 40        | 0,15                                    | 0,25  | 0,45  | -    |
| PK 7        | 50        | 0,075                                   | 0,15  | 0,225 | -    |
| PK 8        | 50        | 0,10                                    | 0,175 | 0,25  | -    |
| PK 9        | 50        | 0,125                                   | 0,20  | 0,275 | -    |

Tab. 3-10: Versuchsschema des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper



Abb. 3-12: Versuchsaufbau des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

### 3.6.3 Einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper

Bei dem einaxialen Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper werden Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 60 mm geprüft. Der Probekörper wurde mindestens 3 Stunden vor Versuchsbeginn auf die jeweilige



Prüf­temperatur temperiert und anschließend zentrisch unter den Laststempel in die Prüfeinrichtung eingebaut. Zur Minimierung der Querdehnungsbehinderung wird zwischen dem Probekörper und dem Laststempel bzw. der Lastplatte eine Teflonfolie angeordnet. Die Versuche werden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen bei einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Der Versuch beginnt mit einer Vorbelastung mit 500 Lastwechsel um eventuelle Unebenheiten des Probekörpers auszugleichen. Die Belastung der Probekörper erfolgt in Form einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwellbelastung ohne Lastpausen. Die Unterspannung dient der Lagesicherung des Probekörpers während des Versuches und beträgt 0,020 MPa für alle Versuche. Während eines Versuches wird der Probekörper mit drei unterschiedlichen Oberspannungen mit jeweils 30.000 Lastwechsel belastet. In Tabelle 3-10 ist das Versuchsschema, welches analog zu den Druck-Schwellversuchen am schlanken Probekörper erfolgt, für ein Asphaltgemisch dargestellt. Die Messung der vertikalen Verformungen während des Versuches erfolgt über drei induktive Wegaufnehmer, die auf dem Laststempel jeweils um 120° versetzt angeordnet sind. Der Versuch endet nach dem Aufbringen der drei unterschiedlichen Oberspannungen oder in Anlehnung an die TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 wenn die plastische Gesamtdehnung von 40 ‰ erreicht wird.



Abb. 3-13: Versuchsaufbau des Druck-Schwellversuches am gedrun­genen Probekörper

### 3.6.4 Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung



Abb. 3-14: Triaxialprüfanlage der TU Dresden

Die Triaxialprüfanlage der TU Dresden (Abbildung 3-14) ermöglicht es, Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm in einem triaxialen Spannungszustand zu prüfen. Die zylindrischen Probekörper werden dabei aus Platten, die mit Hilfe des Walzsegmentverdichters hergestellt wurden, herausgebohrt und anschließend planparallel geschliffen. Zur Messung der Verformungen werden die Magnete in die vorbereiteten Löcher im Probekörper mit Hilfe von erwärmten Bitumen eingeklebt. Der zylindrische Probekörper wird zwischen einer kreisrunden, starren Grundplatte und einem kreisrunden, beweglichen Laststempel eingespannt. Zur Verminderung der Reibung zwischen Probekörper und Grundplatte bzw. Laststempel wird eine Teflonfolie eingelegt. Zum Schutz vor dem Hydrauliköl wird dem Probekörper eine Latexmembran angelegt und im oberen Bereich bündig abgeschnitten. Danach wird die Grundplatte mitsamt dem Probekörper in die Prüfanlage hineingehoben und am Rahmen der Prüfanlage festgeschraubt.

Die Messung der vertikalen Verformungen erfolgt über ein berührungsfreies Magnetmesssystem. Dieses besteht aus drei Magnetmessbänken mit jeweils zwei übereinander liegenden Magneten. Dabei sind die Messbänke um jeweils 120° versetzt angeordnet und liegen auf einer Höhe von 75 mm bzw. 225 mm über der Grundplatte. Die Anordnung der Magnete ist in Abbildung 3-15 ersichtlich.

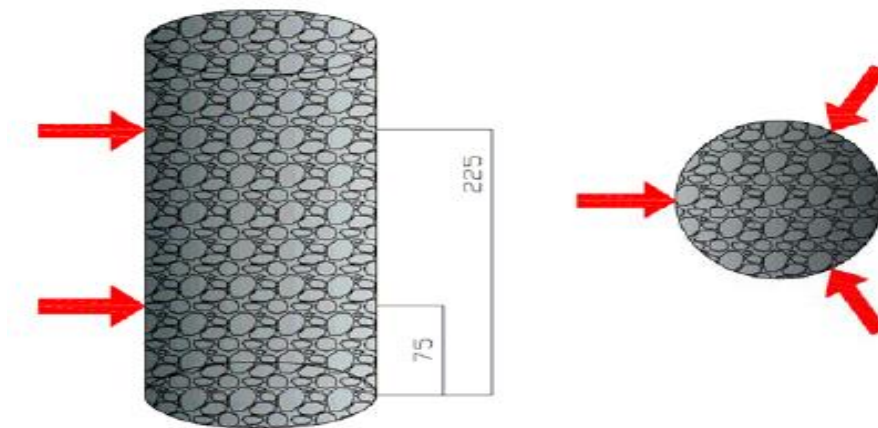


Abb. 3-15: Anordnung des Magnetmesssystems [Wellner 2007]

Die Vertikalbewegung des gerichteten Feldes der Magneten bei einer Verformung des Probekörpers wird durch das Magnetfeldmesssystem erkannt und in ein Messsignal mit einer Auflösung von 0,001 mm umgewandelt. Der Vorteil dieser berührungslosen Messung ist die Messung der Axialverformung direkt am Probekörper und der damit einhergehenden Ausschluss der Beeinflussung der Messergebnisse durch Schwingungsüberlagerung der Prüfeinrichtung und der Eigenschwingung der Messeinrichtung [Wellner 2007].

Das radiale Wegmesssystem besteht aus 9 induktiven Wegaufnehmern. Dabei liegen drei Wegaufnehmer übereinander in einer Höhe von 75 mm, 150 mm bzw. 225 mm über der Grundplatte. Die verschiedenen Messbänke sind wiederum um 120° versetzt angeordnet (Abbildung 3-16). Um Überlagerungen der beiden Messsysteme auszuschließen, sind diese um 20° versetzt angeordnet [Wellner 2007].

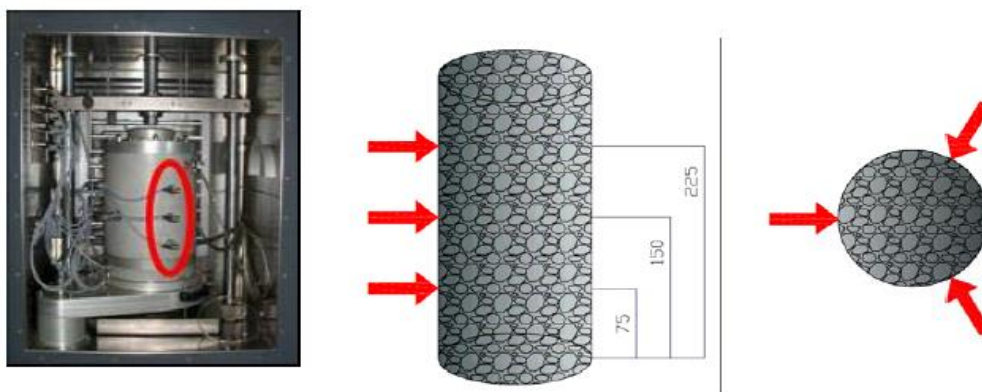


Abb. 3-16: Anordnung des radialen Wegmesssystems [Wellner 2007]

Der Probekörper wird vor Versuchsbeginn für mindestens 6 Stunden auf die Prüftemperatur temperiert. Die Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung werden als Multistage-Versuche über mehrere Temperaturen durchgeführt. Die axiale Oberspannung wird während des Versuches nach jeweils 30.000 Lastwechsel erhöht.

Die Prüffrequenz der axialen und radialen Belastung beträgt jeweils 10 Hz. Aus maschinentechnischen Gründen kommt es bei der Belastungsfrequenz von 10 Hz zu einem Zeitversatz zwischen dem Aufbringen der axialen und radialen Oberspannung. Dieser Zeitversatz wird über einen Vorversuch ermittelt und ausgeglichen, sodass die axialen und radialen Oberspannungen zeitgleich auf den Probekörper wirken. Die radiale Belastung des Probekörpers erfolgt über eine kraftgeregelter, harmonische Sinusschwellbelastung ohne Lastpause. Die Unterspannung dient dazu, dass die Gummimembran während des gesamten Versuches an dem Probekörper anliegt und beträgt 0,085 MPa. Die Oberspannung der radialen Belastung wurde für jede Temperatur auf 0,3 MPa, 0,6 MPa und 0,9 MPa festgelegt. Die vertikale Belastung der Probekörper erfolgt in Form einer kraftgeregelter, harmonischen Sinusschwellbelastung ohne Lastpausen. Die Unterspannung beträgt 0,035 MPa und dient der Lagesicherung des Probekörpers. Die Oberspannungen wurden so festgelegt, dass die deviatorische Spannung dem der einaxialen Druck-Schwellversuchen entsprechen. Die deviatorische Spannung ist definiert als Differenz der axialen und radialen Spannungen (Gleichung 21). Bei den einaxialen Druck-Schwellversuchen beträgt die radiale Spannung  $\sigma_{2,3} = 0$  MPa. Nach Gleichung 21 ist somit die gewählte Oberspannung im einaxialen Spannungszustand identisch mit dem deviatorischen Spannungsanteil.

$$\sigma_{dev} = \sigma_1 - \sigma_{2,3} \quad \text{Gleichung 21}$$

mit:

$\sigma_{dev}$  deviatorische Spannung [MPa]

$\sigma_1$  axiale Spannung [MPa]

$\sigma_{2,3}$  radiale Spannung [MPa]

Die Oberspannungen ergeben sich somit aus den gewählten radialen Oberspannungen und den festgelegten deviatorischen Spannungen, die aufgebracht werden sollen. Das Versuchsschema ist in Tabelle 3-11 aufgeführt.

| Probekörper | Temperatur<br>[°C] | $\sigma_{2,3}$<br>[MPa] | Deviatorische Spannung je Laststufe [MPa] |       |       |
|-------------|--------------------|-------------------------|---|-------|-------|
|             |                    |                         | 1   | 2     | 3     |
| PK 1        | 30                 | 0,3                     | 0,30                                      | 0,50  | 0,70  |
| PK 2        | 30                 | 0,6                     | 0,20                                      | 0,40  | 0,60  |
| PK 3        | 30                 | 0,9                     | 0,15                                      | 0,35  | 0,55  |
| PK 4        | 40                 | 0,3                     | 0,10                                      | 0,30  | 0,50  |
| PK 5        | 40                 | 0,6                     | 0,20                                      | 0,35  | 0,45  |
| PK 6        | 40                 | 0,9                     | 0,15                                      | 0,25  | 0,40  |
| PK 7        | 50                 | 0,3                     | 0,075                                     | 0,15  | 0,225 |
| PK 8        | 50                 | 0,6                     | 0,10                                      | 0,175 | 0,25  |
| PK 9        | 50                 | 0,9                     | 0,125                                     | 0,20  | 0,275 |

Tab. 3-11: Versuchsschema der Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung

Der Versuch wird nach 90.000 Lastwechsel oder beim Erreichen von einer axialen Gesamtdehnung von 40 ‰ beendet.

Die Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung wurden ausschließlich für jeweils eine optimierte Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtvariante und an einer Asphalttragschichtvariante durchgeführt. Durch den Beschluss des Projektbegleitenden Ausschusses wurden folgende Asphaltgemische untersucht:

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 7,0 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,0 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, feine Korngrößenverteilung, 4,5 M-% Bindemittelgehalt mit dem Straßenbaubitumen 50/70

### 3.6.5 Bestimmung der Impulskriechkurven

Die Druck-Schwellversuche am schlanken bzw. am gedrunenen Probekörper und die Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung werden in gleicher Weise ausgewertet. Zur Beurteilung der Verformungsbeständigkeit der Asphaltgemische wird die Impulskriechkurve in Anlehnung der TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 mit der Gleichung 22 approximiert. Die Grundlage der Auswertung bildet die aus dem Versuch erhaltenen plastischen Verformungen in Abhängigkeit zu den Lastwechselzahlen. Die daraus resultierenden Dehnungen werden nach Gleichung 18 ermittelt. Als weitere Kenngröße wird die Dehnungsrate im Punkt ( $n_i$ ;  $\epsilon_i$ ) nach Gleichung 19 berechnet.

$$\epsilon_{pl} = a * \log_{10}(N + 1)^b \quad \text{Gleichung 22}$$

mit:

$\epsilon_{pl}$  plastische, axiale Dehnungen [‰]

N Lastwechselzahl [-]

a, b Materialparameter [-]

Die Regressionsparameter a und b der Impulskriechkurve können anhand der Versuchsbedingungen ermittelt werden. Die Impulskriechkurven bilden die Grundlage für die Prognoserechnungen der Spurrinnenbildung. Daher wird die Ermittlung der Materialparameter in Kapitel 6.2 genauer erläutert.

## 3.7 Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens

Der Einfluss der Zusammensetzung der Asphaltdeckschichtvarianten auf das Griffigkeitsverhalten wurde mit dem „Darmstädter Polierverfahren“ [Bald 2004] getestet und beurteilt. Bei diesem Verfahren werden die Asphaltprobekörper in der Schnellpoliermaschine poliert und die Griffigkeit mittels dem SRT-Pendel gemessen.

### 3.7.1 Versuchsdurchführung

Die Probekörper wurden aus Asphaltplatten (Höhe 4cm) mit den Abmessungen Länge x Breite: 88 mm x 45 mm herausgesägt. Um eine praxisadäquate Beanspruchung der

Probekörper beim Poliervorgang sicher zu stellen, erfolgte die Anordnung der längeren Seite parallel zur Walzrichtung. Die Probekörperplättchen wurden anschließend auf eine Dicke von 8 mm gesägt. Für den Einbau der Asphaltprobekörper in die Schnellpoliermaschine benötigten diese eine bestimmte Krümmung. Dazu wurden die Probekörper in eine PSV-Form gelegt und für 20 min bei 50°C in einem Wärmeschrank erwärmt [Bald 2004]. Die Krümmung stellt sich entweder durch das Eigengewicht und der Erwärmung von selbst ein oder kann durch vorsichtiges andrücken des Probekörpers an die PSV-Form erzielt werden. Nach der Abkühlung der Probekörper in der PSV-Form wurden diese mit Epoxidharz vergossen. Zur Herstellung der notwendigen Krümmung des Epoxidharzes wurde die Form mit einem dafür vorgesehenen Deckel verschlossen, mit Gewichten beschwert und über Nacht zum Aushärten stehen gelassen. Der Asphaltprobekörper (Abbildung 3-17) konnte anschließend aus der PSV-Form ausgebaut und von dem überstehenden Epoxidharz gesäubert werden.



Abb. 3-17: Asphaltprobekörper des Darmstädter Polierverfahrens

Für jedes Asphaltdeckschichtgemisch wurden jeweils 4 Probekörper hergestellt. Die Schnellpoliermaschine besteht aus zwei übereinander angeordneten und sich berührenden Räder. Die insgesamt 14 Probekörper werden in das untere Rad (Probenrad) eingebaut, welches durch einen elektrischen Motor mit einer Geschwindigkeit von 320 Umdrehungen pro Minute angetrieben wird. Das Probenrad mit den eingebauten Asphaltprobekörpern ist in Abbildung 3-18 dargestellt. Das obere Rad ist ein Vollgummirad und wird mit einer Kraft von 725 N konstant auf das Probenrad gedrückt. Die Polierwirkung wird durch das Poliermittel unter ständiger Zugabe von Wasser erzeugt. Als Poliermittel kommt in den ersten 3 Stunden Grobkorund und in den letzten 3 Stunden Feinkorund zum Einsatz. Die Griffigkeiten der Asphaltprobekörper

werden vor und nach der Polierbeanspruchung mit Hilfe des SRT-Pendels ermittelt [Bald 2004].



Abb. 3-18: Probenrad der Schnellpoliermaschine mit den Asphaltprobekörpern

Aufgrund der geringen Erfahrung mit dem „Darmstädter Polierverfahren“ wurden Voruntersuchungen an verschiedenen Asphaltgemischen durchgeführt. Die Prüfung der Asphaltprobekörper erfolgte zusammen mit dem Kontrollgestein in der Schnellpoliermaschine. Das Polieren der Probekörper dauerte dabei jeweils drei Stunden mit dem Grob- und dem Feinkorund. Die Griffigkeit der Asphaltprobekörper wurde vor Versuchsbeginn, nach der Polierbeanspruchung mit dem Grobkorund und nach Versuchsende gemessen. Es konnte dabei festgestellt werden, dass sich die gemessenen PSV-Werte über die Versuchszeit einer Asphaltvariante nur sehr gering unterschieden. Dies konnte an allen vier einbezogenen Asphaltdeckschichtgemischen in dieser Voruntersuchungen festgestellt werden. Der PSV-Wert für das Kontrollgestein wurde dabei eingehalten. Somit erfolgte die Entscheidung, dass die Polierbeanspruchung mit dem Grob- und Feinkorund auf jeweils 6 Stunden angehoben wird, um somit den Einfluss der Zusammensetzung der Asphaltdeckschichtgemische auf das Griffigkeitsverhalten genauer beurteilen zu können. Des Weiteren wurden die Probekörper einer Korngrößenverteilung mit aufsteigendem Bindemittelgehalt durchgängig nummeriert. Dadurch wurde beim Einbau der Probekörper in die Schnellpoliermaschine die Reihenfolge in Anlehnung der DIN EN 1097 Teil 8 berücksichtigt. Somit konnte ebenfalls sichergestellt werden, dass die Probekörper nach der Griffigkeitsmessung nach der Polierbeanspruchung mit dem Grobkorund in derselben Reihenfolge in die Schnellpoliermaschine wieder eingebaut werden.

### 3.7.2 Versuchsauswertung

Die Griffigkeiten der Asphaltprobekörper wurden mittels dem SRT-Pendel (Abbildung 3-18) jeweils vor dem Versuchsbeginn (0 min), nach der Polierbeanspruchung mit dem Grobkorund (360 min) und nach Versuchsende (720 min) gemessen. Dazu wird das SRT-Pendel zuerst an seine festdefinierte Ausgangslage verankert und der Probekörper in die dafür vorgesehene Halterung eingebaut. Der Gummigleitkörper am Ende des Pendels und der Asphaltprobekörper werden vor der Griffigkeitsmessung angefeuchtet. Anschließend wird das Pendel aus der Ausgangslage ausgelöst und beim Durchschwingen des Pendels streicht der Gleitkörper die Oberfläche des Probekörpers. Durch diesen Energieverlust wird die Höhe des Pendelausschlages verringert, was durch einen Schleppzeiger an der Skala des SRT-Pendels angezeigt wird. Dieser Wert stellt den PSV-Wert dar. Die Griffigkeitsmessungen werden in einem temperierten Raum bei ca. 20°C durchgeführt. Als Ergebnis wurden die Mittelwerte der Griffigkeitsmessungen der 4 Probekörper je Asphaltdeckschichtgemische verwendet.



Abb. 3-18: SRT-Pendel



## 4 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse für sämtliche Asphaltgemische sind in den Anlagen 4 bis 8 zusammengefasst.

### 4.1 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Steifigkeitsverhalten

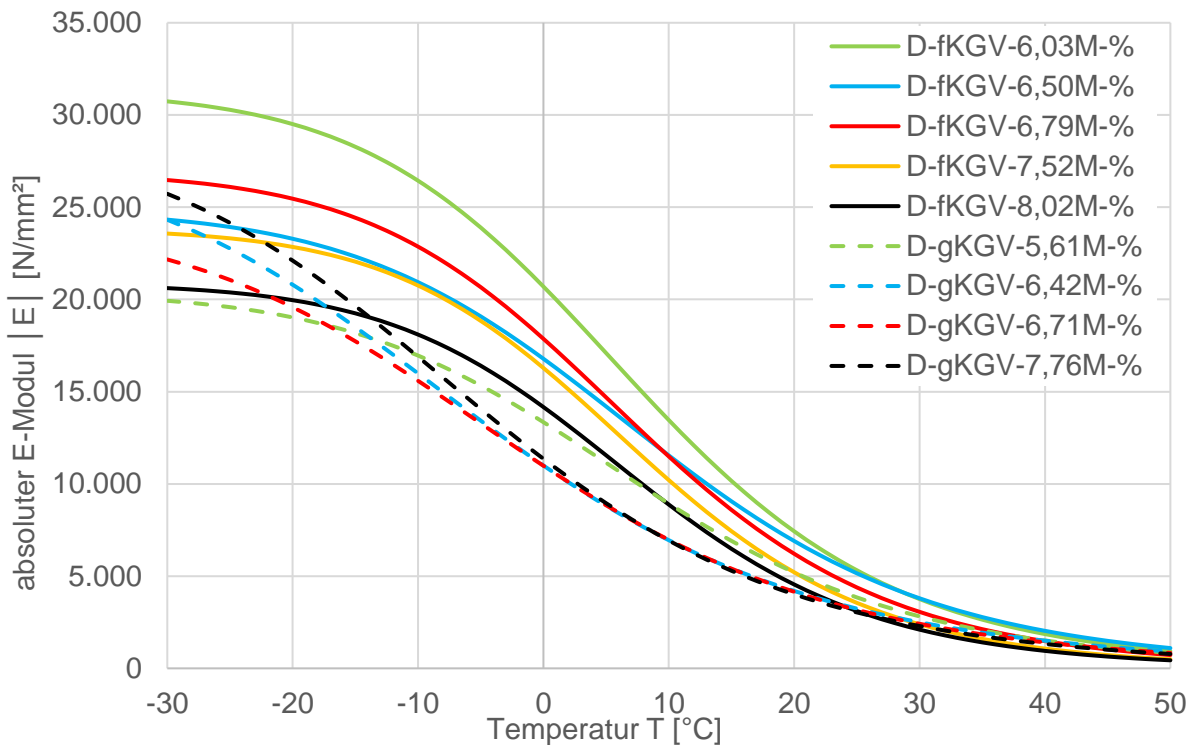


Abb. 4-1: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Deckschichtvarianten

In Abbildung 4-1 sind die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen der untersuchten Asphaltdeckschichtvarianten (SMA 11 S) unter Variation der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes dargestellt. Die Deckschichtvarianten mit der groben Korngrößenverteilung sind als gestrichelte Linien abgebildet. Der Einfluss der Sieblinie ist deutlich erkennbar. Die feinere Korngrößenverteilung zeigen höhere Steifigkeiten bei gleichem Bindemittelgehalt.

Die Steifigkeiten der untersuchten Gemische mit einer feinen Korngrößenverteilung sinken zudem mit zunehmendem Bindemittelgehalt. Eine Ausnahme stellt die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,79 M-% dar. Diese Variante besitzt höhere Steifigkeiten bei tieferen Temperaturen als die Varianten mit einem geringeren Bindemittelgehalt. Bei den Gemischen mit der groben Korngrößenverteilung bewirkt die Erhöhung des Bindemittelgehaltes ebenfalls eine Reduzierung der Steifigkeiten. Des Weiteren sind die Verläufe der Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion bei den grobkörnigen Varianten ab einem Bindemittelgehalt von 6,42 M-% relativ identisch bei Temperaturen über 0°C.

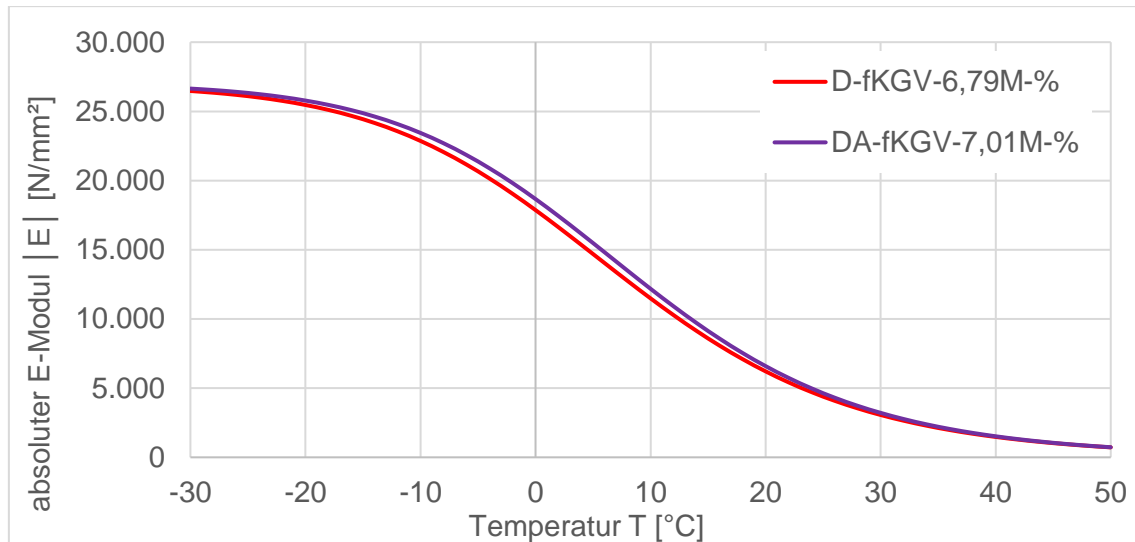


Abb. 4-2: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Deckschichtvariante mit unterschiedlicher Bitumensorte

Die beiden, in Abbildung 4-2 dargestellten, Asphaltdeckschichtgemische besaßen dieselben Vorgaben der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes. Die Variante „D-fKGV-6,79M-%“ wurde mit einem polymermodifizierten Bitumen der Sorte 25/55-55A und die Variante „DA-fKGV-7,01M-%“ mit dem Bitumen 10/40-65A hergestellt. Aufgrund der Herstellung der Asphaltgemische in einem Asphaltmischwerk unter realen Bedingungen konnten die Vorgaben der Asphaltzusammensetzungen nur mit gewissen Schwankungen eingehalten werden. So beträgt die Differenz des Bindemittelgehaltes der beiden Varianten 0,22 M-%, was ebenfalls einen Einfluss auf das Materialverhalten bewirken kann. Die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen beider Asphaltgemische verlaufen im gesamten untersuchten Temperaturbereich mit relativ identisch.

In Abbildung 4-3 sind die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen der untersuchten Asphaltbinderschichtvarianten unter Variation der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes dargestellt. Die Bindergemische nach dem Splittmastixprinzip werden als gestrichelte Linien abgebildet. Bei den untersuchten Binderschichtvarianten ist der Einfluss der Sieblinie deutlich geringer als bei den Deckschichtvarianten. Im untersuchten Temperaturbereich verlaufen die Funktionen für die Varianten mit demselben Bindemittelgehalt annähernd identisch.

Mit zunehmendem Bindemittelgehalt steigen die Steifigkeiten des stetig gestuften Asphaltbetons zunächst bis zu einem Gehalt von 5,68 M-% danach sinken die Steifigkeiten wieder. Der Einfluss des Bindemittelgehaltes bei der Variante SMA 16 B S ist deutlich geringer als bei dem stetig gestuften Asphaltbeton. Im untersuchten Temperaturbereich verlaufen die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktionen annähernd identisch.

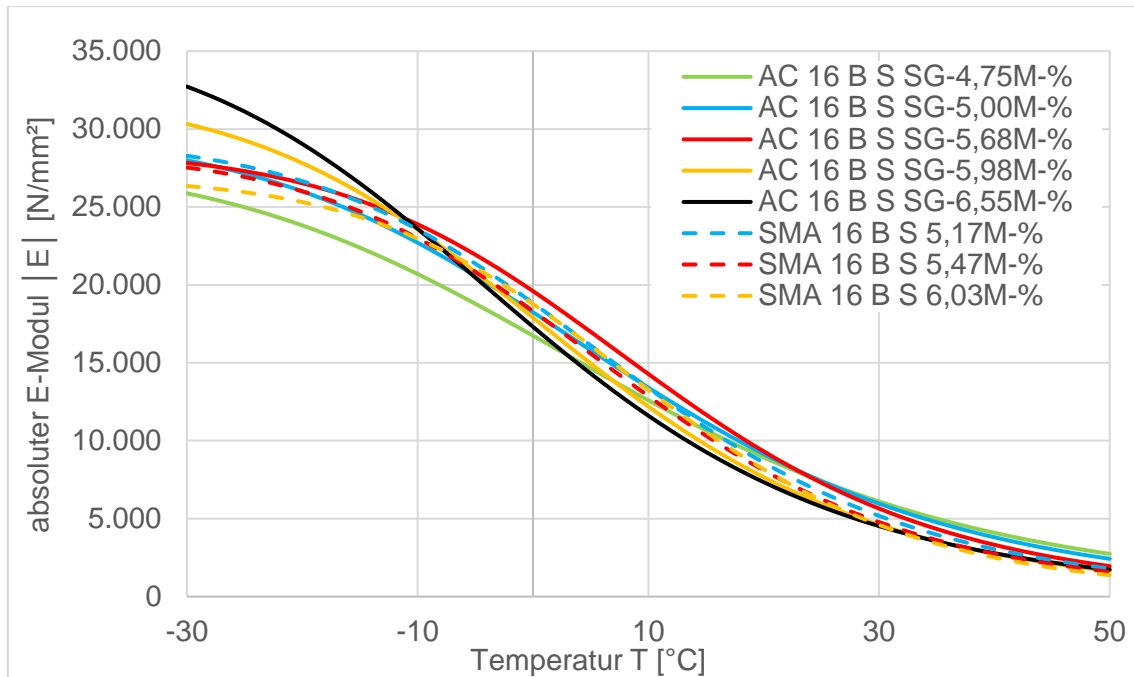


Abb. 4-3: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Binderschichtvarianten

Die beiden, in Abbildung 4-2 dargestellten, Asphaltbinderschichtgemische besaßen dieselben Vorgaben der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes. Die Variante „AC 16 B S SG-5,00M%“ wurde mit einem polymermodifizierten Bitumen der Sorte 10/40-65A und die Variante „BA-5,28M-%“ mit dem Bitumen 25/55-55A hergestellt. Aufgrund der Herstellung der Asphaltgemische in einem Asphaltmischwerk unter realen Bedingungen konnten die Vorgaben der Asphaltzusammensetzungen nur mit gewissen Schwankungen eingehalten werden. So beträgt die Differenz des Bindemittelgehaltes der beiden Varianten 0,28 M-%, was ebenfalls einen Einfluss auf das Materialverhalten bewirken kann. Die Verwendung des weicheren Bitumens PmB 25/55-55A hat zur Auswirkung, dass sich die Steifigkeiten bei tieferen Temperaturen als 0°C erhöhen. Bei höheren Temperaturen reduzieren sich die Steifigkeiten geringfügig.

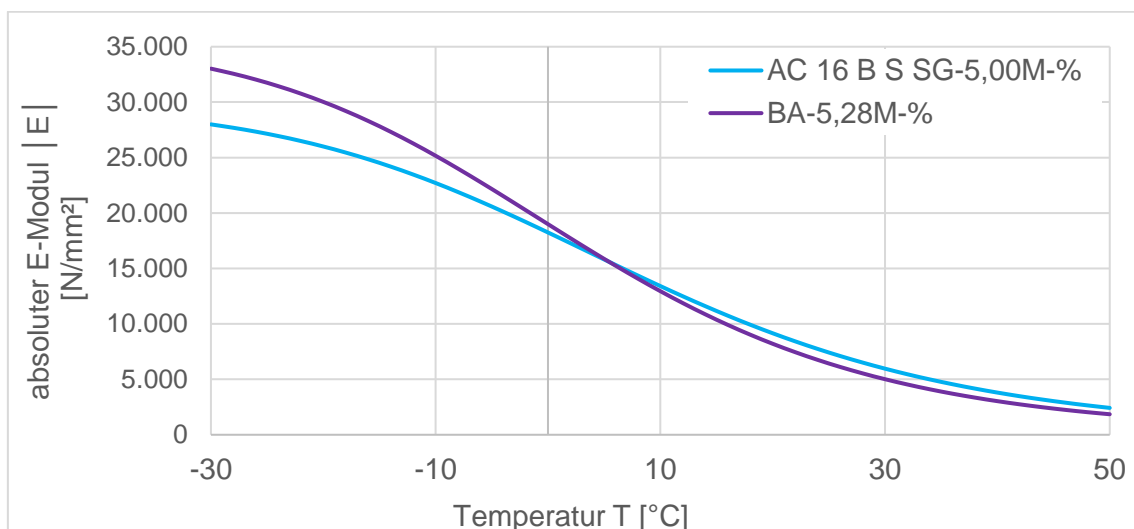


Abb. 4-4: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Binderschichtvariante mit unterschiedlicher Bitumensorte

## 4.2 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten

In Abbildung 4-5 und 4-6 sind die Ermüdungsfunktionen der Deckschichtgemische dargestellt. Bei beiden Korngrößenverteilungen der Deckschichtvarianten nehmen die ertragbaren Lastwechselzahlen mit zunehmendem Bindemittelgehalt bei gleichen elastischen Anfangsdehnungen zu. Bei der feinen Korngrößenverteilung verschlechtert sich die Ermüdungsfunktion erst ab der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 8,02 M-%. Dabei verschieben sich die Ermüdungsfunktionen mit Zunahme des Bindemittelgehaltes bei beiden Sieblinien annähernd parallel zueinander.

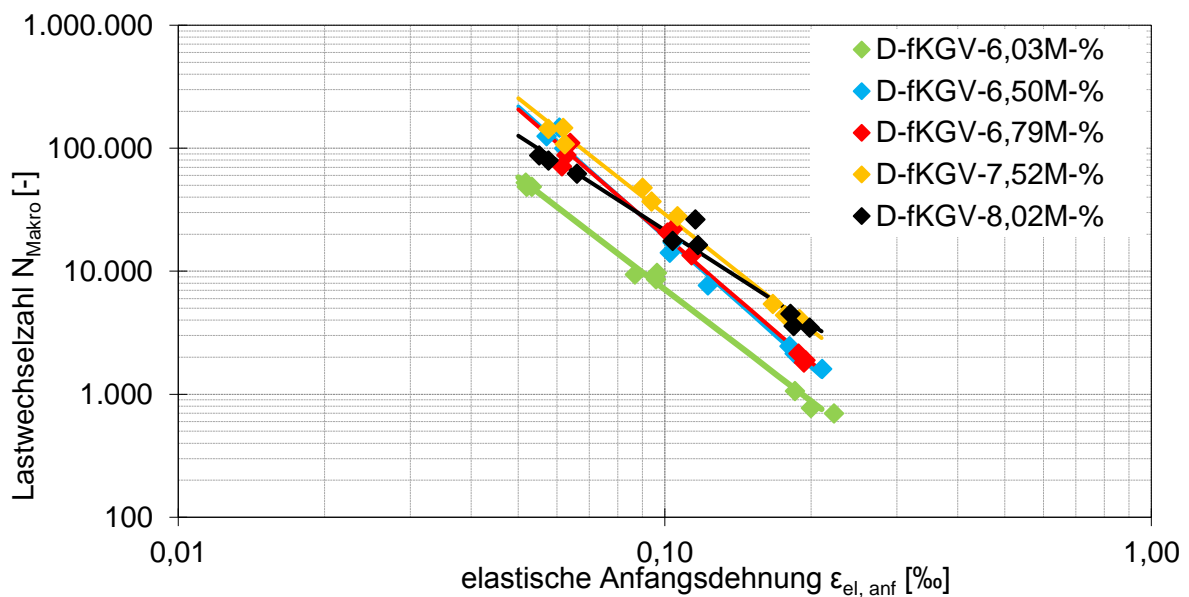


Abb. 4-5: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; feine Korngrößenverteilung

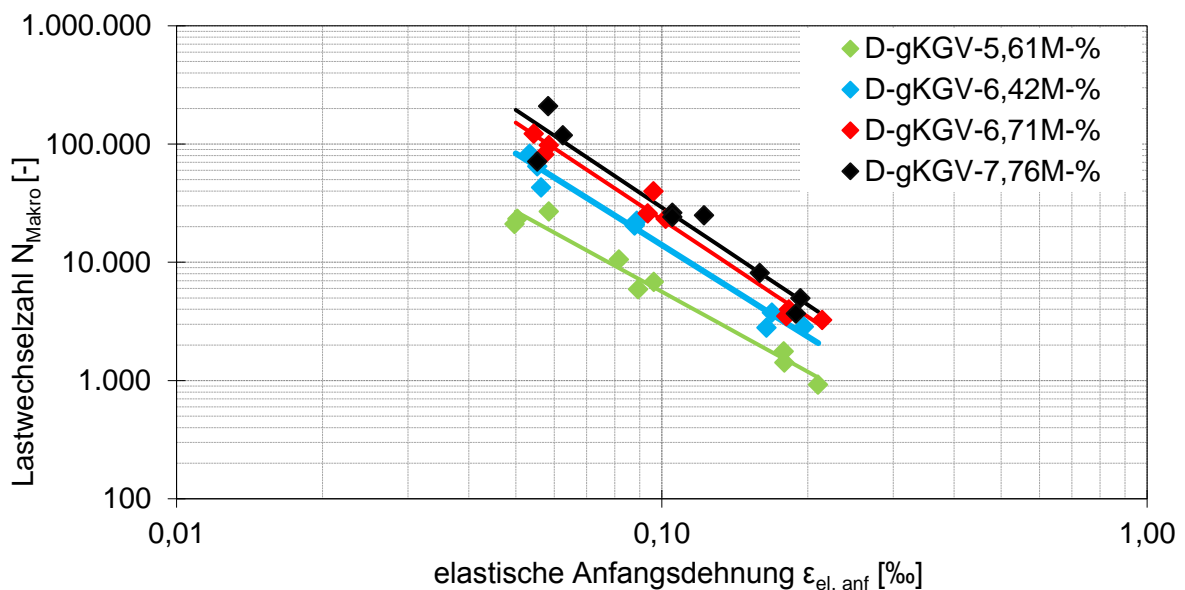


Abb. 4-6: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; grobe Korngrößenverteilung

Bei elastischen Anfangsdehnungen von  $\epsilon_{el,anf} \leq 0,12 \text{ ‰}$  weisen die Varianten der feinen Korngrößenverteilung bei gleichem Bindemittelgehalt eine bessere Ermüdungsfunktion auf, als die Varianten mit der groben Sieblinie bis zu einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-% (Abbildung 4-7). In Abbildung 4-8 ist zu erkennen, dass die grobe Korngrößenverteilung bei einem Bindemittelgehalt von circa 6,7 M-% eine bessere Ermüdungsfunktion ab einer elastischen Anfangsdehnungen von  $\epsilon_{el,anf} \leq 0,085 \text{ ‰}$  als die feine Korngrößenverteilung besitzt. Bei dem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% besitzt die grobe Sieblinie ein besseres Ermüdungsverhalten im gesamten untersuchten Bereich als die der feineren.

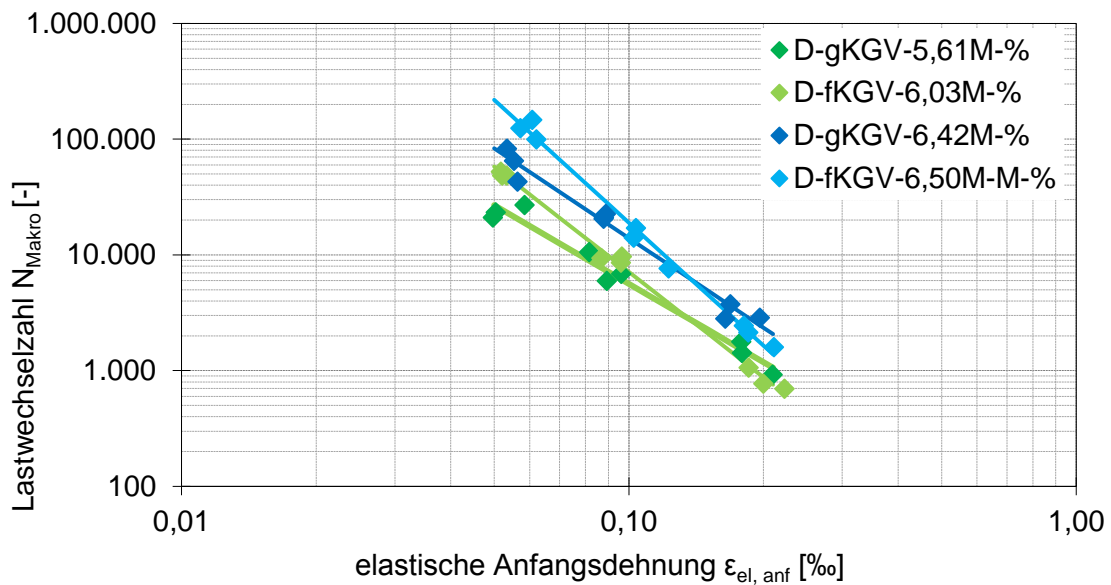


Abb. 4-7: Einfluss der Korngrößenverteilung der Deckschichtvarianten auf die Ermüdungsfunktion

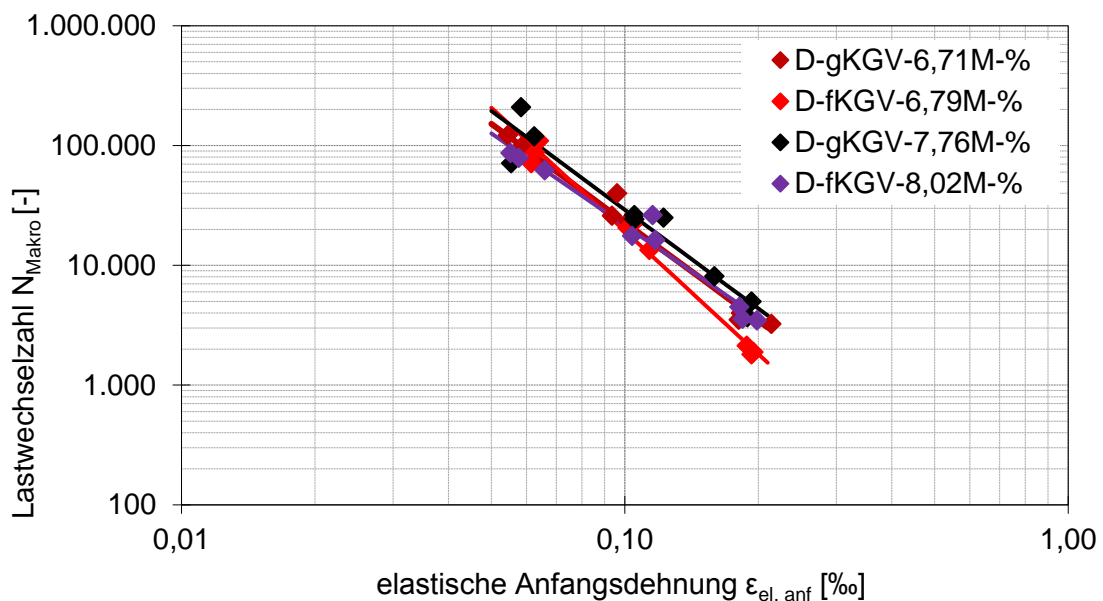


Abb. 4-8: Einfluss der Korngrößenverteilung der Deckschichtvarianten auf die Ermüdungsfunktion

Die Abbildung 4-9 zeigt die Deckschichtvariante bei der die Bitumensorte variiert wurde. Die Verwendung des steiferen Bitumen PmB 10/40-65A bewirkt eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens. Bei der Variation der Bitumensorte verschiebt sich die Ermüdungsfunktion ebenfalls annähernd parallel.

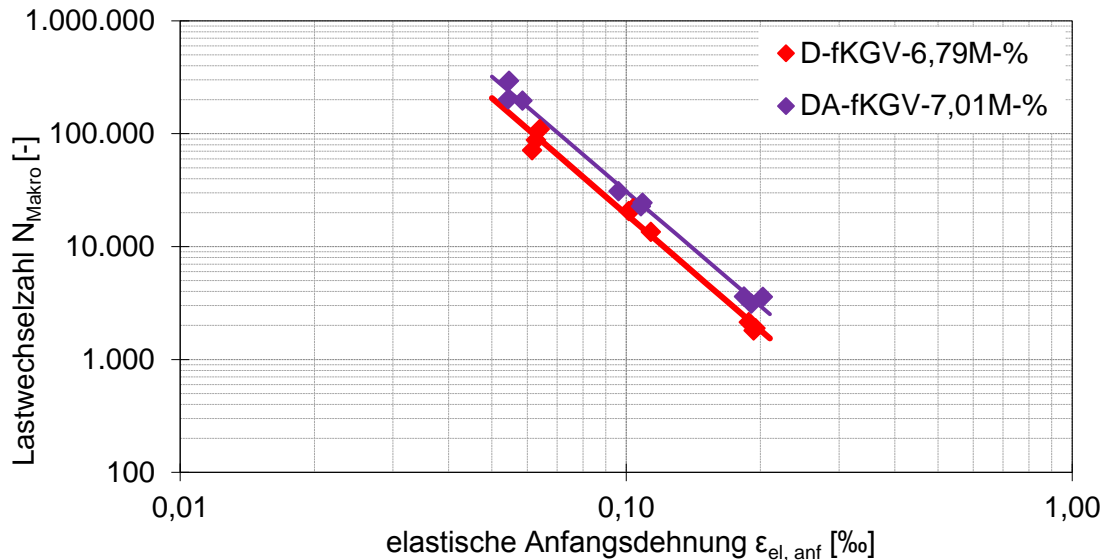


Abb. 4-9: Einfluss der Bitumensorte der Deckschichtvariante auf das Ermüdungsverhalten

In Abbildung 4-10 sind die Ermüdungsfunktionen der Varianten des AC 16 B S SG dargestellt. Mit zunehmendem Bindemittelgehalt verbessert sich die Ermüdungsfunktion. Bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% verdrehen sich die Ermüdungsfunktionen leicht gegeneinander und weisen somit ein ähnliches Ermüdungsverhalten auf. Bei einer weiteren Bindemittelzugabe verschieben sich die Ermüdungsfunktionen annähernd parallel. Dies wurde ebenfalls bei den Deckschichtvarianten festgestellt. Die Steifigkeiten reduzieren sich mit zunehmendem Bindemittelgehalt bei Temperaturen über  $-10^{\circ}\text{C}$ , sodass nicht unbedingt von einem geringeren Ermüdungsfortschritt in der Befestigung bei höheren Bindemittelgehalten ausgegangen werden kann. In Abbildung 4-11 sind die Ermüdungsfunktionen der Varianten des SMA 16 B S dargestellt. Bei dieser Variante besitzt der Bindemittelgehalt, zumindest in der untersuchten Spanne, keinen Einfluss auf die Ermüdungsfunktion.

Der Einfluss der Korngrößenverteilung auf das Ermüdungsverhalten wird in Abbildung 4-12 dargestellt. Für eine übersichtlichere Darstellung wird für den SMA 16 B S nur die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,47 M-% mit abgebildet, da der Bindemittelgehalt bei dieser Variante keinen Einfluss aufwies. Im Vergleich zum stetig gestuften Asphaltbeton besitzt das Bindergemisch nach dem Splittmastixprinzip ein besseres Ermüdungsverhalten bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,47 M-%.

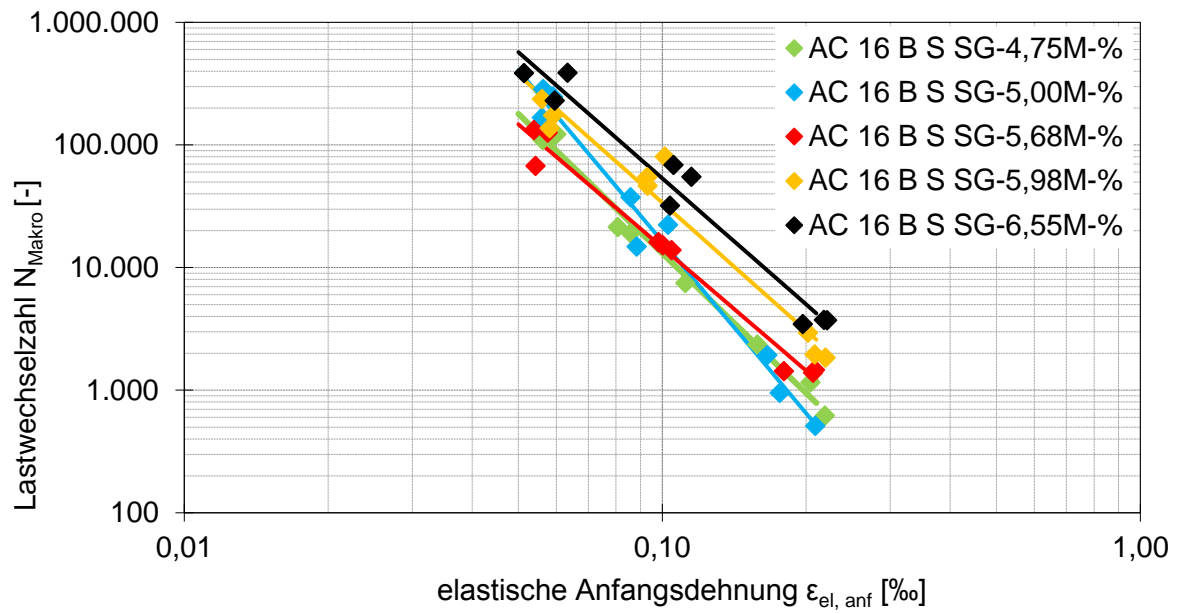


Abb. 4-10: Ermüdungsfunktion des AC 16 B S SG

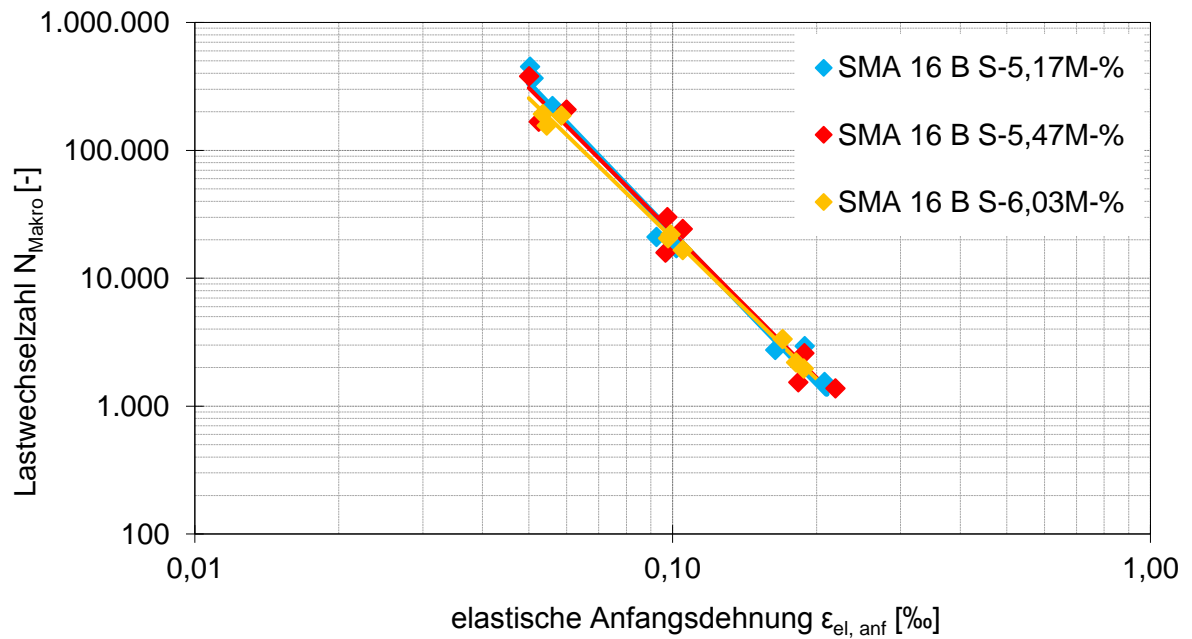


Abb. 4-11: Ermüdungsfunktion des SMA 16 B S

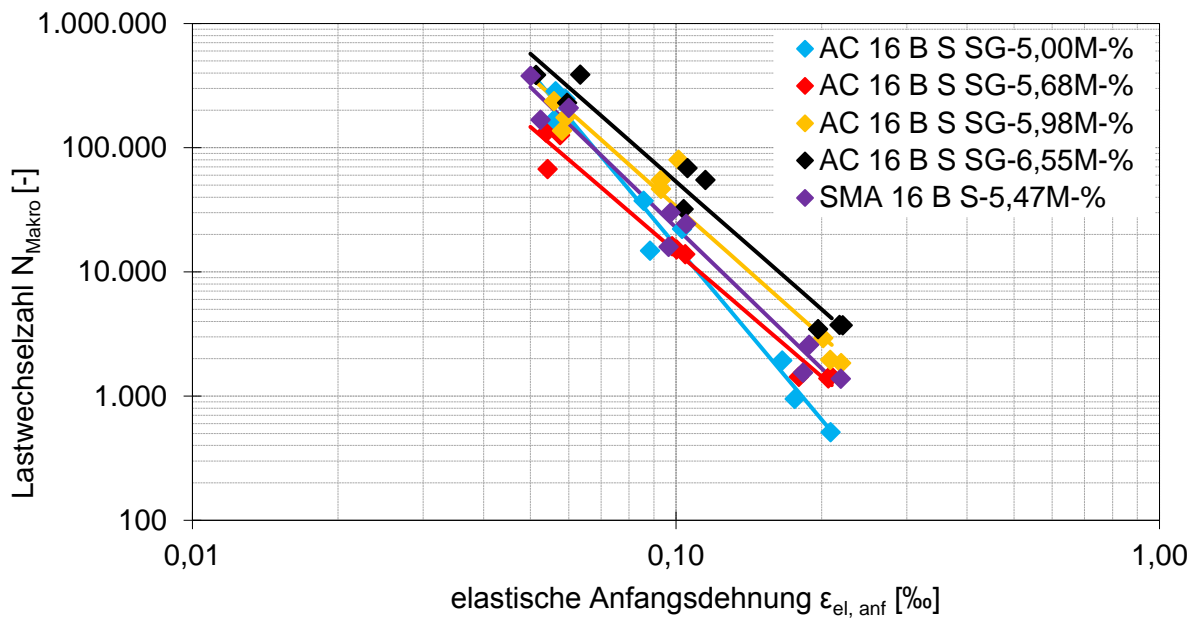


Abb. 4-12: Einfluss der Korngrößenverteilung der Binderschichtgemische

Abbildung 4-13 zeigt die Binderschichtvariante bei der die Bitumensorte variiert wurde. Die Verwendung des weicheren Bitumen PmB 25/55-55A bewirkt eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens bei elastischen Anfangsdehnungen von  $\epsilon_{el, anf} \leq 0,12$  ‰.

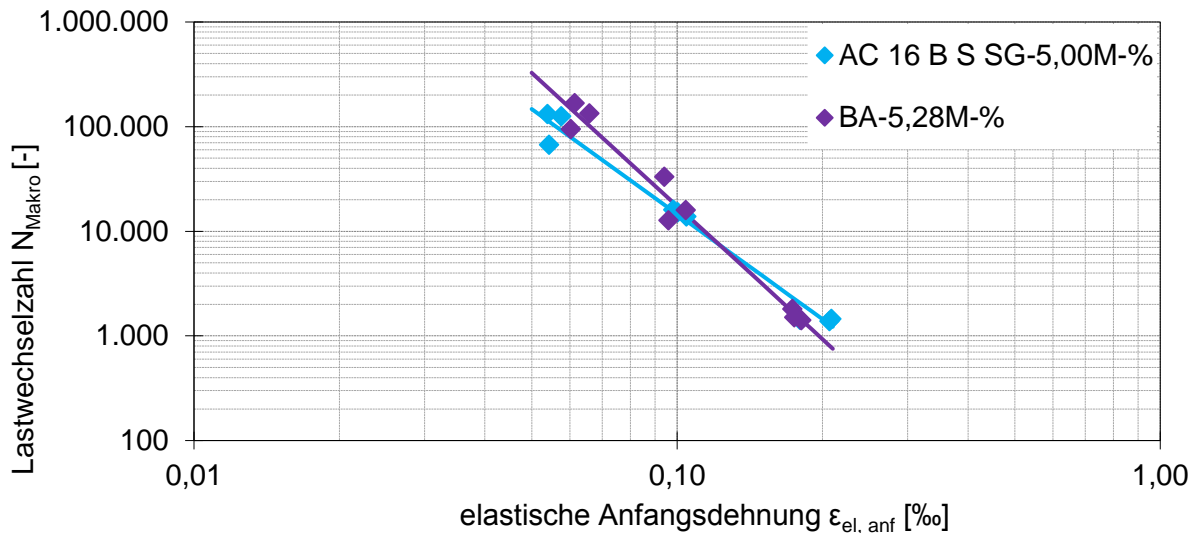


Abb. 4-13: Einfluss der Bitumensorte der Binderschichtvariante



### 4.3 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Tieftemperaturverhalten

Für jedes Asphaltgemisch wurden jeweils 3 Probekörper geprüft. Als Ergebnis des Abkühlversuches pro Variante wird jeweils der Mittelwert der 3 Teilversuche verwendet.

Der Verlauf der kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit der Kerntemperatur des Probekörpers kann mittels einer Regression mit einem Polynom 4. Grades (Gleichung 23) approximiert werden. Dabei werden die Regressionsparameter über die Mittelwerte der Messdaten je Asphaltgemisch ermittelt.

$$\sigma_{kry} = a * T^4 + b * T^3 + c * T^2 + d * T + e \quad \text{Gleichung 23}$$

mit:

$\sigma_{kry}$  kryogene Zugspannungen [MPa]

T Temperatur [°C]

a, b, c, d, e Regressionsparameter [-]

Die Verläufe der kryogenen Zugspannungen sind innerhalb einer Korngrößenverteilung sehr ähnlich und somit für eine vergleichende, grafische Darstellung unübersichtlich. Deshalb werden die Versuchsergebnisse der Bruchspannung mit der dazugehörigen Bruchtemperatur im Weiteren dargestellt. Die Verläufe der kryogenen Zugspannungen für die Asphaltgemische werden bei den Prognoserechnungen der Ermüdungsrissbildung benötigt.

Zur Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens sind nicht nur die induzierten Zugspannungen, die infolge von behinderter thermischer Dehnungen auftreten können, von Interesse, sondern auch die jeweiligen Steifigkeiten bei tiefen Temperaturen. Daher werden die Bruchspannungen in die jeweiligen Bruchdehnungen über die Gleichung 24 berechnet. Der Steifigkeitsmodul wird über die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion ermittelt.

$$\varepsilon_{Bruch} = \frac{\sigma_{Bruch}}{|E|} * 1000 \quad \text{Gleichung 24}$$

mit:

$\varepsilon_{Bruch}$  Bruchdehnung [‰]

$\sigma_{Bruch}$  Bruchspannung [MPa]

|E| absoluter E-Modul zur Bruchtemperatur [MPa]

Die Abbildung 4-14 stellt die Bruchdehnungen der Deckschichtvarianten in Abhängigkeit zu ihrem Bindemittelgehalt dar. Die feinere Korngrößenverteilung erreicht im gesamten untersuchten Bindemittelbereich höhere Bruchdehnungen als die grobe Korngrößenverteilung. Dabei steigt die Bruchdehnung mit zunehmendem Bindemittelgehalt bei der feinen Korngrößenverteilung zunächst an. Allerdings erreicht diese Sieblinie ihre höchste Bruchdehnung bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Einen Einfluss des Bindemittelgehaltes bei der groben Korngrößenverteilung auf die Bruchdehnung ist nicht

erkennbar. Die Bruchdehnungen bleiben in der untersuchten Spanne des Bindemittelgehaltes annähernd konstant.

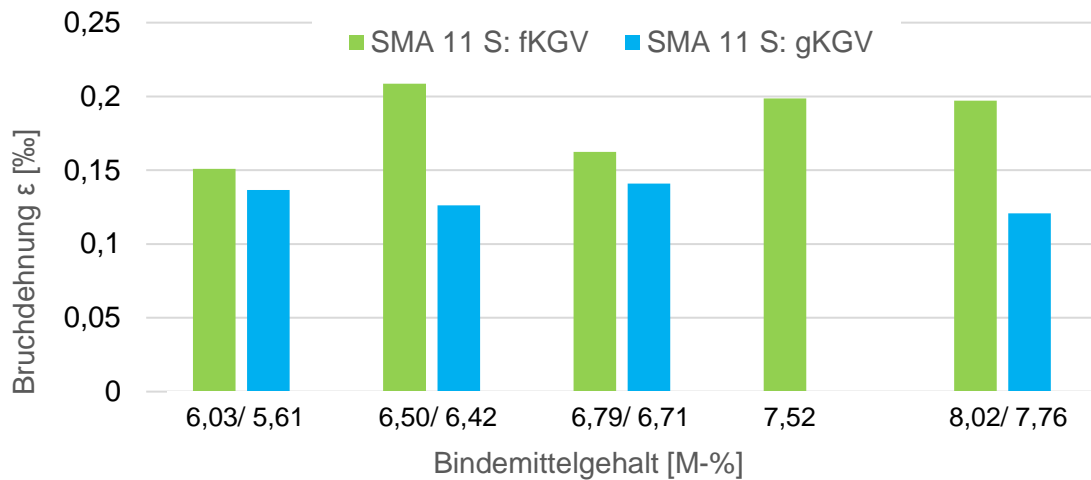


Abb. 4-14: ermittelte Bruchdehnungen der Deckschichtgemische

Einen Einfluss des Bindemittelgehaltes bei der groben Korngrößenverteilung auf die Bruchtemperatur ist in Abbildung 4-15 dagegen erkennbar. Mit zunehmenden Bindemittelgehalt erhöhen sich die Bruchtemperaturen. Die feine Korngrößenverteilung erreicht die niedrigsten Bruchtemperaturen bei den hohen Bindemittelgehalten. Ein genauer Trend zum Einfluss des Bindemittelgehaltes ist allerdings aus den Versuchsergebnissen nicht erkennbar. Die höchste Bruchtemperatur wird bei einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-% erreicht. Die feine Korngrößenverteilung erreicht gegenüber der groben Korngrößenverteilung insbesondere bei hohen Bindemittelgehalten (ab 7,52 M-%) niedrigere Bruchtemperaturen. Die Bruchtemperaturen beider Sieblinien sind im Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,50 M-% bis 7,00 M-% identisch. In Zusammenhang mit den höheren Bruchdehnungen kann davon ausgegangen werden, dass die feinere Korngrößenverteilung (mit Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-%) ein besseres Tieftemperaturverhalten aufweist.

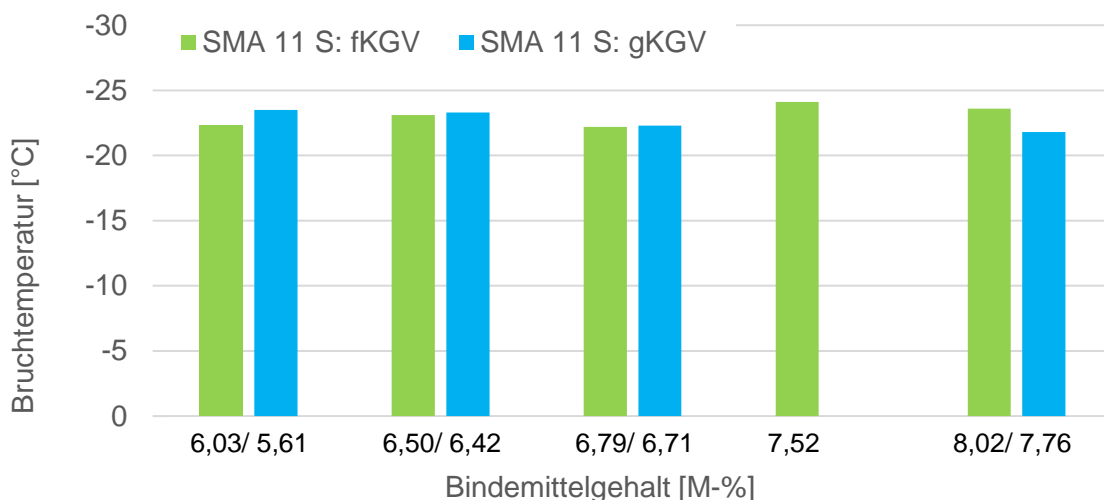


Abb. 4-15: Bruchtemperaturen der Deckschichtgemische

Der Einsatz des steiferen Bindemittels PmB 10/40-65A bewirkt ein geringfügig besseres Tieftemperaturverhalten (Abbildung 4-16). Der Bruch des Probekörpers wird bei einer niedrigeren Temperatur und bei einer größeren Dehnung erst erreicht. Dies kann allerdings auch auf die Differenz des Bindemittelgehaltes (0,22 M-%) zurückzuführen sein.

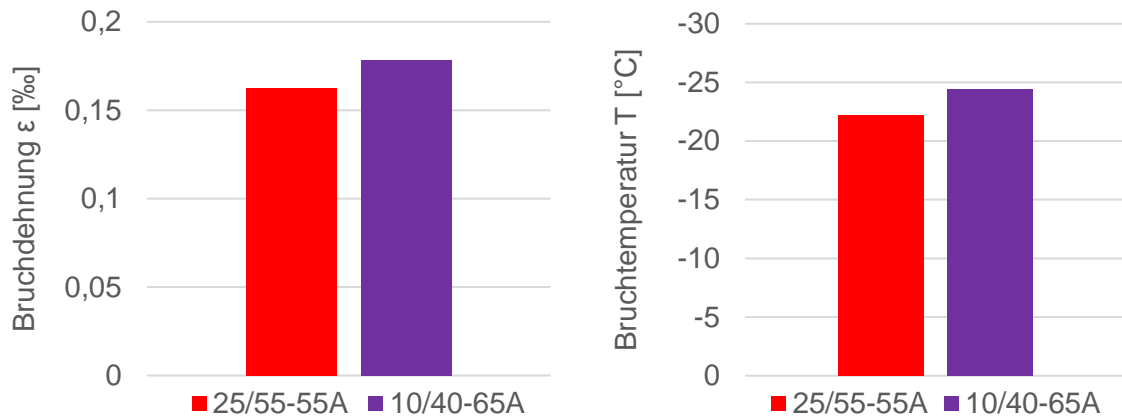


Abb. 4-16: Einfluss der Bitumensorte auf das Tieftemperaturverhalten beim SMA 11 S

Die Abbildung 4-17 stellt die Bruchdehnungen in Abhängigkeit der Bindemittelgehalte der Bindergemische dar. Für beide Korngrößenverteilungen konnte im Zuge der Untersuchungen kein Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Bruchdehnungen festgestellt werden. Der stetig gestufte Asphaltbeton mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% erreicht eine höhere Bruchdehnung als die anderen Varianten derselben Korngrößenverteilung. Die Korngrößenverteilung der Binderschicht nach dem Splittmastixprinzip erreicht größere Bruchdehnungen als der stetig gestufte Asphaltbeton.

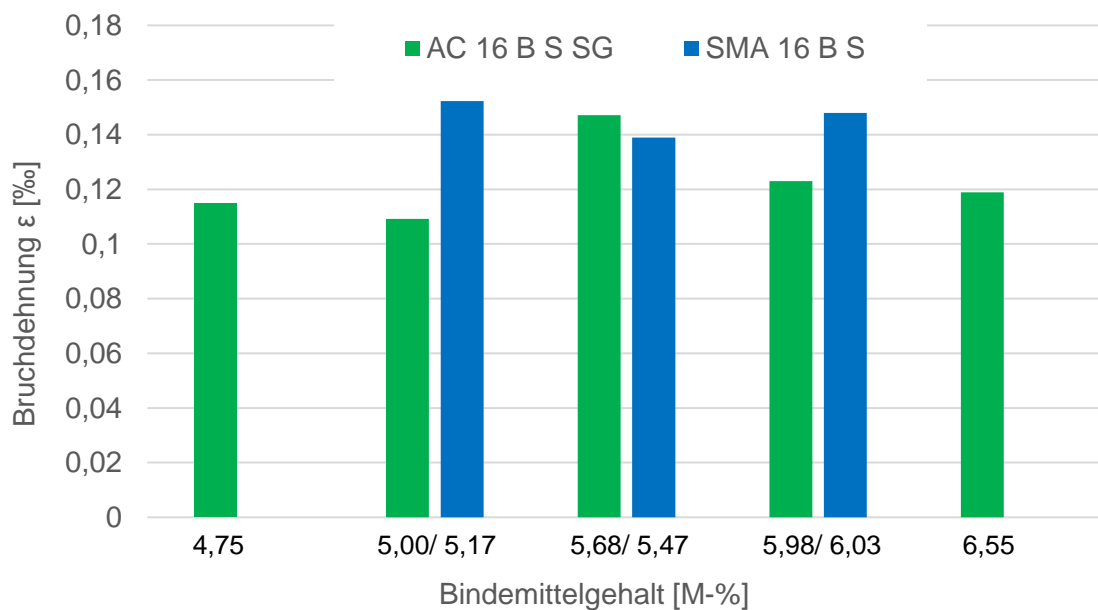


Abb. 4-17: ermittelte Bruchdehnungen der Binderschichtgemische

Einen Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Bruchtemperatur ist bei dem Bindergemisch SMA 16 B S ebenfalls nicht erkennbar, zumindest in der untersuchten Spanne des Bindemittelgehaltes (Abbildung 4-18). Bei dem stetig gestuften Asphaltbeton reduziert sich die Bruchtemperatur mit zunehmenden Bindemittelgehalt bis zu einem Gehalt von 5,98 M-%. Die Verwendung der feineren Sieblinie des AC 16 B S SG hat zur Folge, dass höhere Bruchtemperaturen erreicht werden als die der Varianten des SMA 16 B S. In Zusammenhang mit den Ergebnissen der Bruchdehnung besitzt die grobe Korngrößenverteilung der Varianten des SMA 16 B S ein besseres Tieftemperaturverhalten als der stetig gestufte Asphaltbeton.

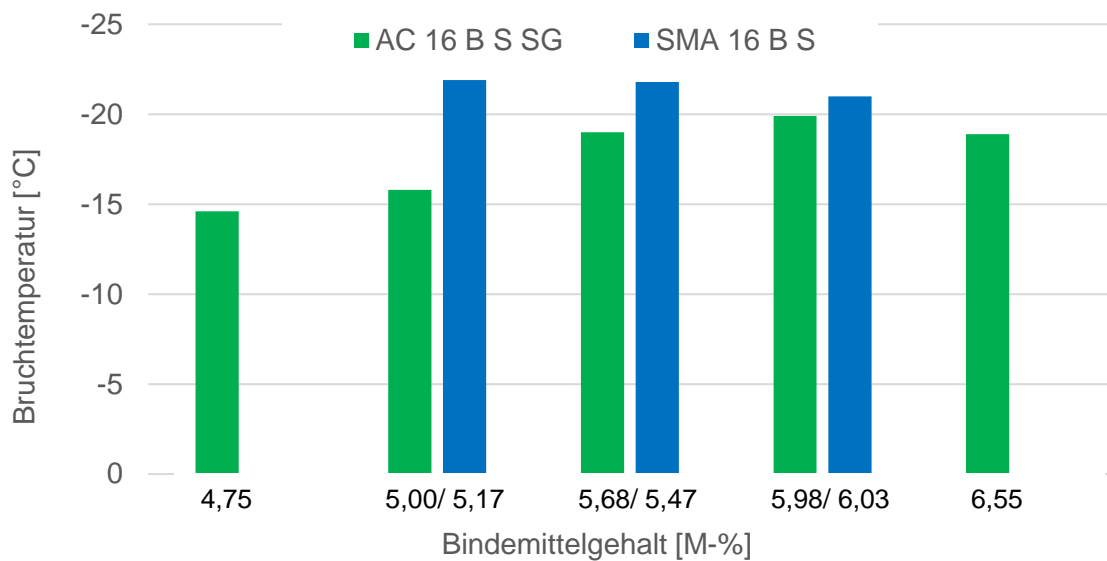


Abb. 4-18: Bruchtemperaturen der Binderschichtgemische

Der Einsatz des weicheren Bindemittels PmB 25/55-55A bewirkt, im Gegensatz zu dem Ergebnis des Deckschichtgemisches, ein besseres Tieftemperaturverhalten (Abbildung 4-18). Der Bruch des Probekörpers wird bei einer niedrigeren Temperatur und bei einer größeren Dehnung erst erreicht. Dies kann allerdings auch auf die Differenz des Bindemittelgehaltes (0,28 M-%) zurückzuführen sein.

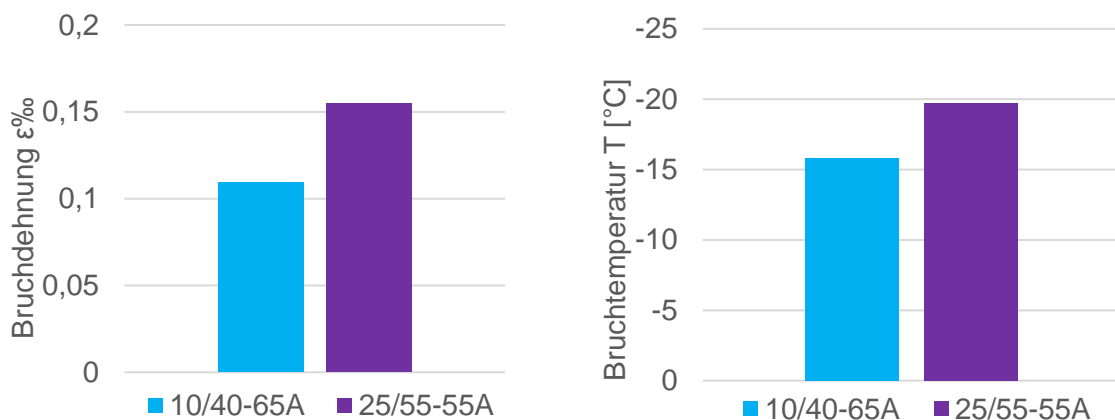


Abb. 4-19: Einfluss der Bitumensorte auf das Tieftemperaturverhalten beim AC 16 B S SG

#### 4.4 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Verformungsverhalten

##### 4.4.1 Einaxiale Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt-StB 25 B 1

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Asphaltgemische für die einaxialen Druck-Schwellversuche nach TP Asphalt 25 B 1 aufgeführt. Dabei mussten allerdings verschiedene Punkte der Impulskriechkurven für die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen ausgewertet werden, um somit den Einfluss des Bindemittelgehaltes innerhalb einer Korngrößenverteilung beurteilen zu können. Für die Binderschichtgemische wurde die Dehnung bzw. die Dehnungsrate am Versuchsende zu Rate gezogen. Die maßgebende Kenngröße bei den Deckschichtgemischen mit der feinen Korngrößenverteilung war die Dehnungsrate der Impulskriechkurve bei der die Dehnung von 40 ‰ erreicht wurde. Die Dehnungsrate am Wendepunkt konnte nicht zur Auswertung herangezogen werden, da einige Varianten keinen Wendepunkt besaßen. Für die Deckschichtgemische mit der groben Korngrößenverteilung wurde die Dehnung bzw. die Dehnungsrate im Wendepunkt ausgewertet.

Die Dehnungsrate (Abbildung 4-20) und die dazugehörigen Dehnungen (Tabelle 4-1) im Wendepunkt nehmen bei der groben Korngrößenverteilungen der Asphaltdeckschichtgemische mit zunehmenden Bindemittelgehalt ab bis zu einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-%. Danach steigen die Dehnungsrate und die Dehnung im Wendepunkt wieder gering an. Der Bindemittelgehalt von 6,71 M-% stellt aber nicht zwangsläufig den optimalen Bindemittelgehalt in Bezug auf die Verformungsbeständigkeit dieser Korngrößenverteilung dar. Es besteht die Möglichkeit, dass die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 7,50 M-% eine noch bessere Verformungsbeständigkeit aufweisen könnte. Die Versuche belegen lediglich, dass die Verformungsbeständigkeit bei einem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% sich wieder verschlechtern.

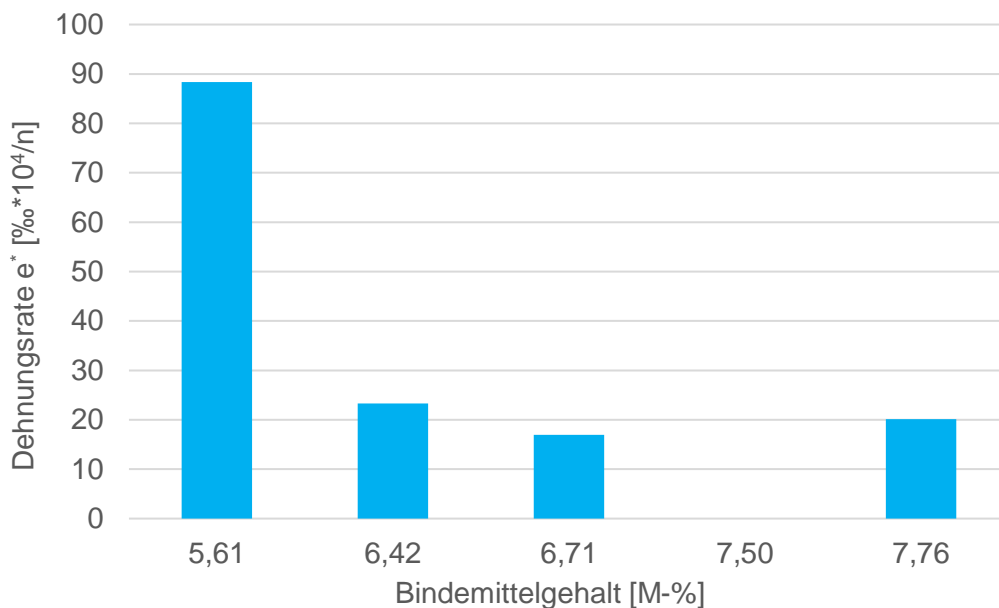


Abb. 4-20: Dehnungsraten im Wendepunkt für den SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

|                         |      |       |       |       |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|
| Bindemittelgehalt [M-%] | 5,61 | 6,42  | 6,71  | 7,76  |
| Dehnung im WP [%o]      | 37,9 | 37,94 | 31,14 | 32,76 |
| Lastwechselzahl des WP  | 2727 | 6015  | 6406  | 8806  |

Tab. 4-1: Dehnungen und Lastwechselzahl des Wendepunktes für den SMA 11 S: grobe KGV

In Abbildung 4-21 sind die Dehnungsraten der feinen Korngrößenverteilung dargestellt bei der die plastische Dehnung von 40 %o erreicht wurde. Der optimale Bindemittelgehalt dieser Korngrößenverteilung liegt bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Die anderen Varianten weisen eine schlechtere Verformungsbeständigkeit auf. Besonders ab einem Bindemittelgehalt von 7,52 M-% weist die feine Korngrößenverteilung eine hohe Verformungsanfälligkeit auf. Der Einfluss der Bitumensorte ist in Abbildung 4-22 dargestellt. Die Verwendung des steiferen Bindemittels hat scheinbar zur Folge, dass die Verformungsbeständigkeit deutlich reduziert wird. Dies könnte allerdings auch der höhere Bindemittelgehalt bewirken.

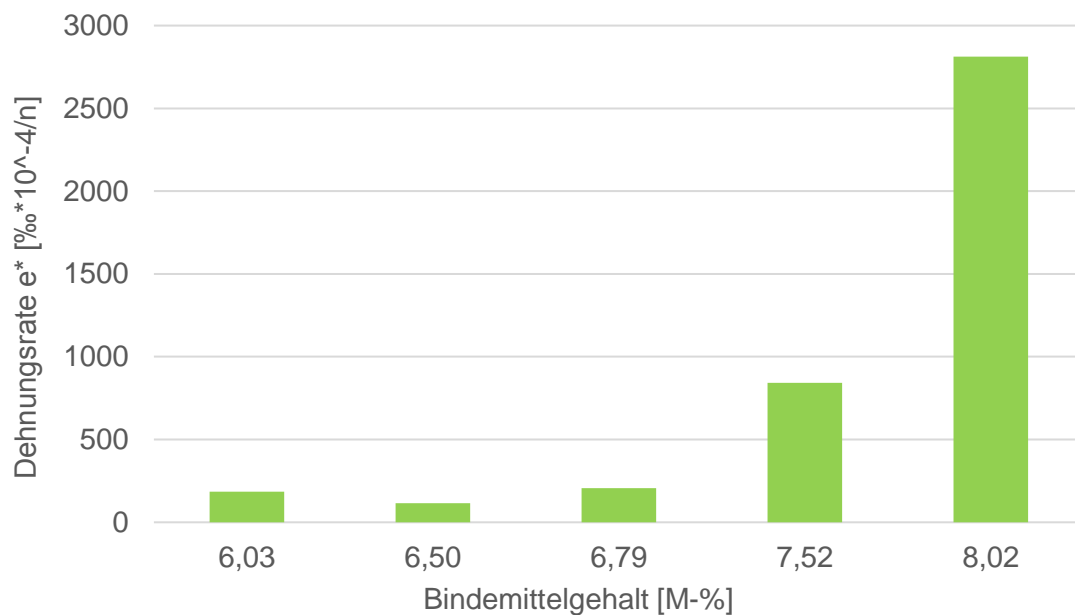


Abb. 4-21: Dehnungsraten bei einer Dehnung von 40 %o für den SMA 11 S: feine KGV

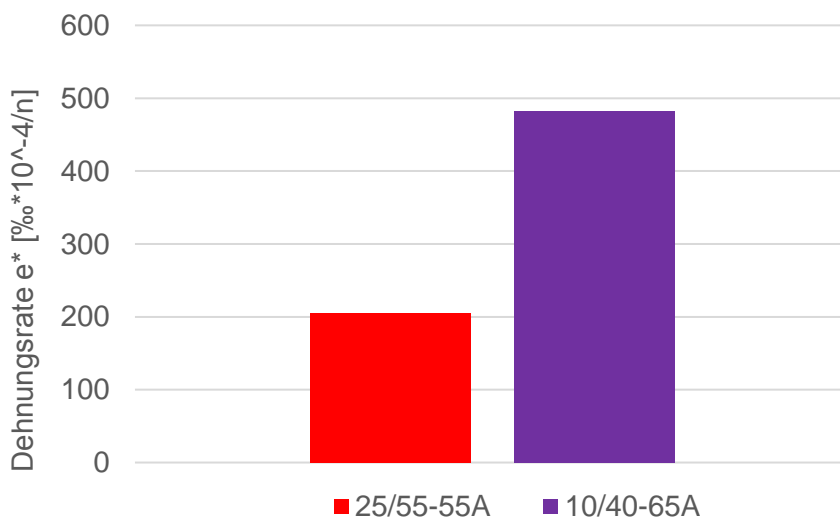


Abb. 4-22: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten des SMA 11 S

Die grobe Korngrößenverteilung besitzt gegenüber der feineren eine bessere Verformungsbeständigkeit. Die Varianten mit der feinen Korngrößenverteilung erreichten schon nach wenigen Belastungszyklen eine plastische Gesamtdehnung von 40 ‰. Dagegen erreichten einige Varianten der groben Korngrößenverteilung selbst nach 10.000 Belastungszyklen diese plastische Dehnung nicht. Die Dehnungsraten sind ebenfalls deutlich geringer.

Die plastischen Gesamtdehnungen nach Versuchsende für die beiden Korngrößenverteilungen der Binderschichtgemische sind in Abhängigkeit zum Bindemittelgehalt in Abbildung 4-23 dargestellt. Die dazugehörigen Dehnungsraten sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Der SMA 16 B S besitzt die beste Verformungsbeständigkeit bei einem Bindemittelgehalt von 5,47 M-%. Bei dieser Variante ist die plastische Gesamtdehnung ebenfalls geringer als bei dem stetig gestuften Asphaltbeton. Ansonsten weist der AC 16 B S SG eine bessere Verformungsbeständigkeit bei ähnlichen Bindemittelgehalten auf. Die plastischen Dehnungen erhöhen sich mit Zunahme des Bindemittelgehaltes bei der Korngrößenverteilung des AC 16 B S SG bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-%. Anschließend reduzieren sich die plastischen Dehnungen mit der weiteren Zugabe des Bindemittelgehaltes. Durch Untersuchungen des Bindemittels an Reserveprobekörpern für den Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper konnte nach Extraktion festgesellt werden, dass diese Varianten ein verhärtetes Bitumen aufweisen (genaue Erklärung in Abschnitt 4.4.2.). Dies konnte aber nur bei den Untersuchungen zur Verformungsbeständigkeit festgestellt werden.

Die Verwendung eines weicheren Bitumen PmB 25/55-55A bei dem AC 16 B S SG hat scheinbar zur Folge, dass die Verformungsbeständigkeit reduziert wird. Dies ist in Abbildung 4-24 dargestellt. Dieser Umstand kann aber auch durch den höheren Bindemittelgehalt (Differenz des Bindemittelgehaltes 0,28 M-%) erklärt werden.

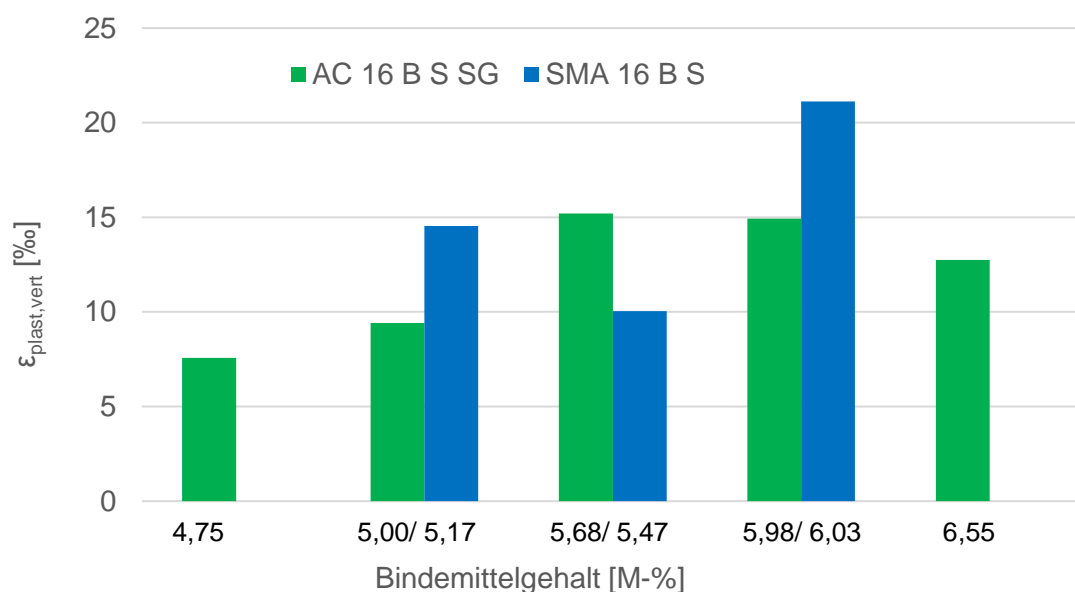


Abb. 4-23: plastische Gesamtdehnung am Versuchsende für die Binderschichtgemische

|   |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Soll-Bindemittelgehalt [M-%]                          | 4,50  | 5,00  | 5,50  | 6,00  | 6,50  |
| Dehnungsrate [ $\% \cdot 10^{-4}/n$ ]<br>AC 16 B S SG | 2,235 | 3,491 | 3,230 | 2,853 | 1,834 |
| Dehnungsrate [ $\% \cdot 10^{-4}/n$ ]<br>SMA 16 B S   | -     | 2,255 | 1,961 | 3,339 | -     |

Tab. 4-2: Dehnungsraten am Versuchsende der Binderschichtgemische

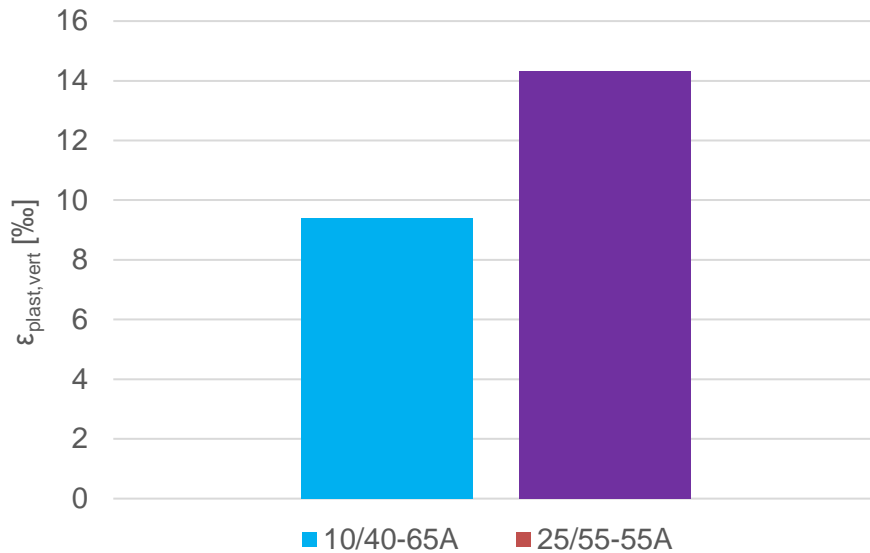


Abb. 4-24: Einfluss der Bitumensorte beim AC 16 B S SG

#### 4.4.2 Einaxiale Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper

Die Ergebnisse des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper werden in diesem Abschnitt beschrieben. Zur Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzung der Asphaltgemische auf das Verformungsverhalten werden die plastischen Dehnungen am Ende eines Versuches getrennt für die Deck- und Binderschichtgemische dargestellt.

In Abbildung 4-25 sind die plastischen Dehnungen der Deckschichtvarianten in Bezug auf den Bindemittelgehalt dargestellt. Für beide Korngrößenverteilungen ist zu erkennen, dass sich die plastischen Dehnungen mit zunehmendem Bindemittelgehalt zunächst reduzieren. Bei dem Bindemittelgehalt von 6,7 M-% bewirkt eine weitere Zugabe an Bitumen eine Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Des Weiteren weisen die Varianten mit der feinen Korngrößenverteilung gegenüber denen mit der größeren eine schlechtere Verformungsbeständigkeit mit gleichem Bindemittelgehalt und eine deutlichere Zunahme der plastischen Dehnungen ab einem Bindemittelgehalt von 6,7 M-% auf. Der Bindemittelgehalt von 6,71 M-% stellt aber nicht zwangsläufig den optimalen Bindemittelgehalt in Bezug auf die Verformungsbeständigkeit der groben Korngrößenverteilung dar. Es besteht die Möglichkeit, dass die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 7,50 M-% eine bessere Verformungsbeständigkeit aufweisen könnte. Die Versuche belegen lediglich, dass sich das Verformungsverhalten bei einem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% sich wieder verschlechtert.



Die Abbildung 4-26 zeigt den Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten der Asphaltdeckschicht. Das steifere Bitumen PmB 10/40-65A bewirkt ein Anstieg der plastischen Dehnungen. Diese Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit kann eher über den höheren Bindemittelgehalt erklärt werden, da ein steiferes Bitumen das Verformungsverhalten verbessern sollte.

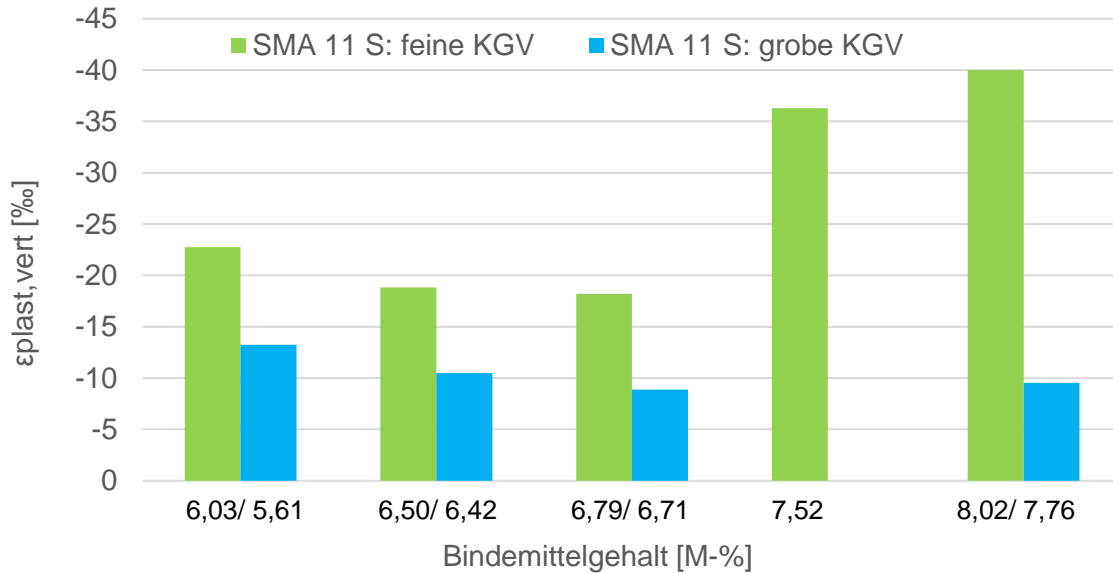


Abb. 4-25: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei  $T=40^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,15 \text{ N/mm}^2$

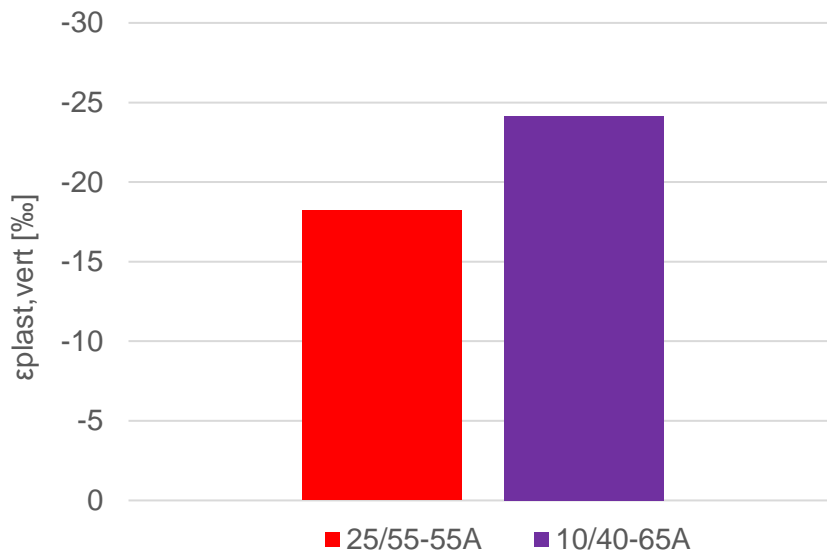


Abb. 4-26: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim SMA 11 S

In Abbildung 4-27 sind die plastischen Dehnungen der Binderschichtvarianten in Bezug auf den Bindemittelgehalt dargestellt. Der stetig gestufte Asphaltbeton mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% besitzt die höchste Verformungsbeständigkeit. Bei einer weiteren Zunahme des Bindemittelgehaltes erfährt der Asphaltbeton deutlich höhere plastische Dehnungen. Die plastischen Dehnungen der Varianten des SMA 16 B S sind zunächst deutlich höher als die des Asphaltbetons. Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes ist die Änderung der plastischen Gesamtdehnung deutlich geringer als bei der Variante AC 16 B S SG, sodass bei höheren Bindemittelgehalten die Verformungsbeständigkeit annähernd identisch ist. Als optimierte Binderschichtvariante stellt sich bei dem Kriterium der Verformungsbeständigkeit der AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% heraus. Die Abbildung 4-28 zeigt den Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten der Asphaltbinderschicht. Das weichere Bitumen PmB 25/55-55A bewirkt ein Anstieg der plastischen Dehnungen bei gleichen Versuchsbedingungen. Bei diesen beiden Varianten beträgt der Unterschied des Bindemittelgehaltes 0,28 M-%.

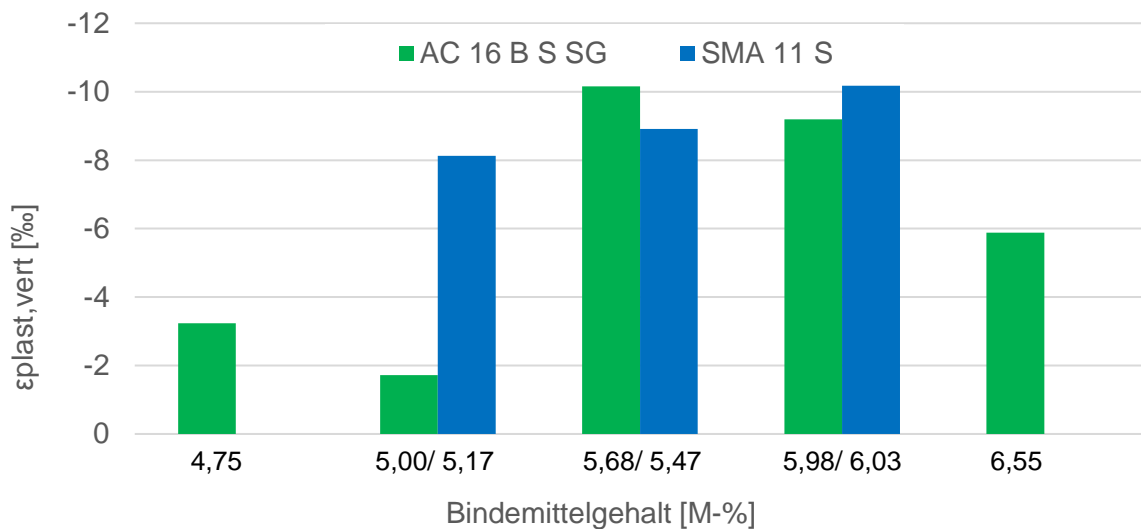


Abbildung 4-27: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei  $T=50^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,20\text{ N/mm}^2$

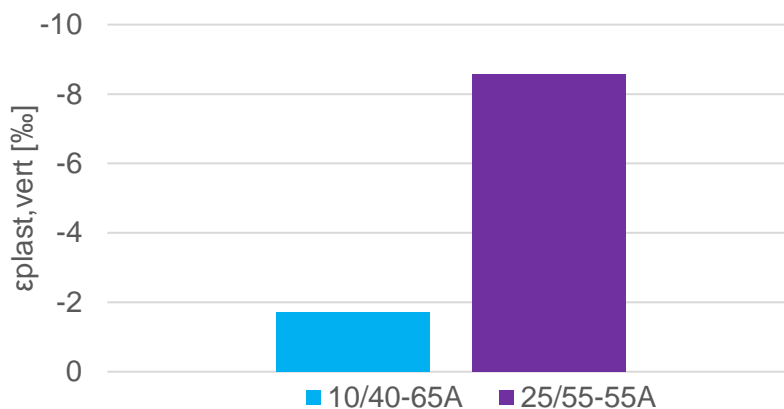


Abb. 4-28: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim AC 16 B S SG

Aus Abbildung 4-27 wird allerdings auch ersichtlich, dass die Variante des AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% die größte plastische Dehnung am Versuchsende aufweist. Bei der weiteren Zunahme des Bindemittelgehaltes verbessert sich das Verformungsverhalten dieser Korngrößenverteilung wieder. Dieser Umstand ist mit dem aktuellen Forschungsstand nicht erklärbar. Daher wurde an Reserveprobekörpern der Variante AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% und 6,55 M-% das Bindemittel zurückgewonnen und Versuche am extrahierten Bitumen durchgeführt. Die Ergebnisse der konventionellen Prüfverfahren sind in Tabelle 4-3 aufgeführt. Des Weiteren wurden ebenfalls DSR-Versuche (siehe Kapitel 3.1.) durchgeführt um die rheologischen Eigenschaften der extrahierten Bitumen zu bestimmen. Die Hauptkurven der beiden Bindemittel sind in Abbildung 4-29 dargestellt.

| Variante                             | AC 16 B S SG<br>5,68 M-% | AC 16 B S SG<br>6,55 M-% |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Nadelpenetration bei 25°C [1/10 mm]  | 18                       | 14                       |
| Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C] | 73,0                     | 84,2                     |

Tab. 4-3: Bindemittelkennwerte der extrahierten Bitumen

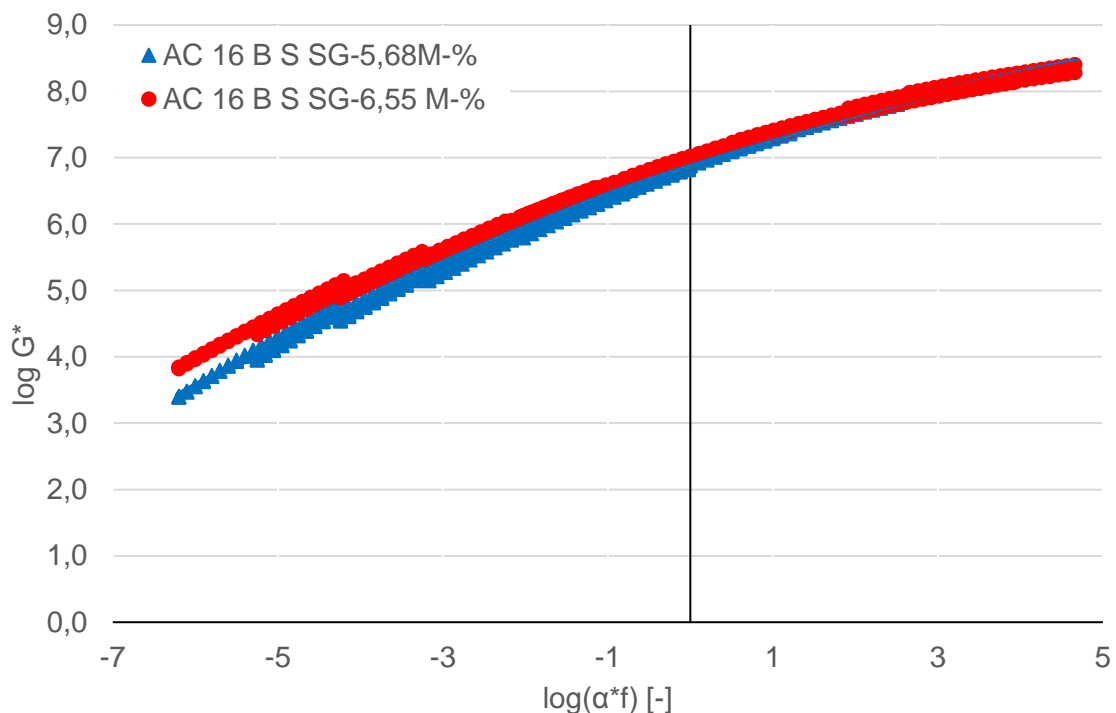


Abb. 4-29: Hauptkurve der extrahierten Bitumen

Die konventionellen Prüfverfahren und die DSR-Versuche belegen, dass das Bitumen der Varianten mit den höheren Bindemittelgehalten Eigenschaften eines härteren Bitumens aufweist als die anderen Varianten. Aufgrund dieser Verhärtung des Bitumens verringern sich die plastischen Dehnungen mit Zunahme des Bindemittelgehaltes. Dies bedeutet ebenfalls, dass durch die Verwendung eines härteren Bitumens mit einem höheren Bindemittelgehalt, im Vergleich zu einem Gemisch mit einem weicherem Bindemittel, die Verformungsbeständigkeit wieder verbessert werden kann.

Die Asphaltgemische mit derselben Bitumensorte wurden, wie in Abschnitt 3.2. beschrieben, an demselben Tag hergestellt um sicher zu stellen, dass das Bindemittel aus derselben Charge stammt. Die Probekörperherstellung verlief für alle Varianten des AC 16 B S SG identisch und somit die notwendige Wiedererwärmung des Mischgutes zur Plattenherstellung. Die Lagerung der Probekörper erfolgte in demselben Raum und die Temperierung auf Prüftemperatur war für alle Varianten ebenfalls identisch. Somit kann die Verhärtung der beiden Gemische des AC 16 B S SG nicht erklärt werden. Die Verhärtung des Bitumens konnte aber nur bei den Untersuchungen zum Verformungsverhalten festgestellt werden (Abbildung 4-30)

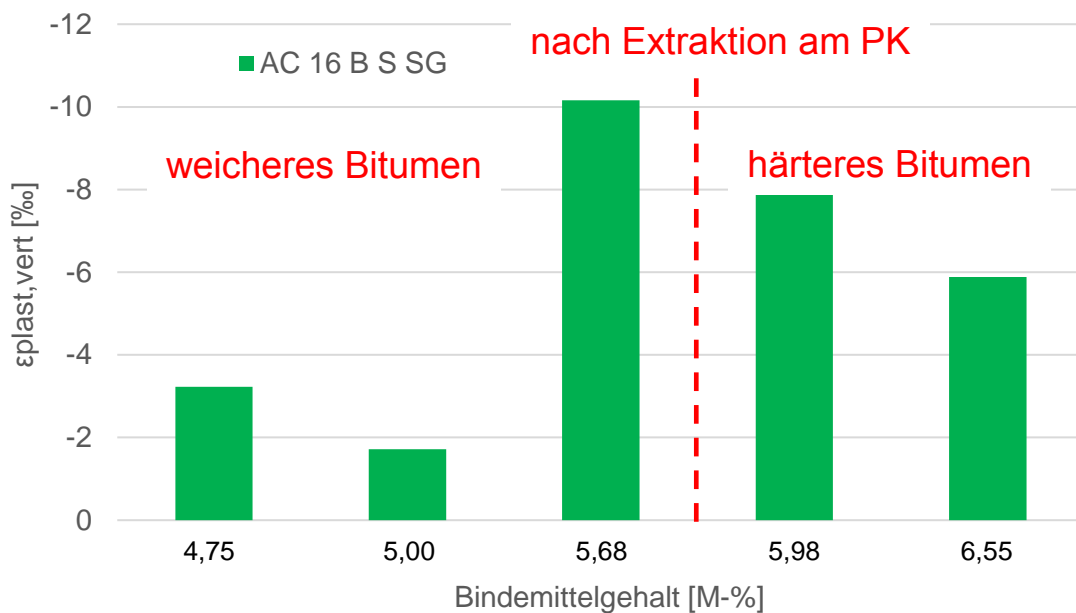


Abb. 4-30: Verhärtung des Bitumens bei der Variante AC 16 B S SG

#### 4.4.3 Einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper

Die Ergebnisse des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper werden in diesem Abschnitt beschrieben. Zur Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzung der Asphaltgemische auf das Verformungsverhalten werden die plastischen Dehnungen am Ende eines Versuches getrennt für die Deck- und Binderschichtgemische dargestellt.

In Abbildung 4-31 sind die plastischen Dehnungen der Deckschichtvarianten in Bezug auf den Soll-Bindemittelgehalt dargestellt. Für beide Korngrößenverteilungen ist zu erkennen, dass sich die plastischen Dehnungen mit zunehmendem Bindemittelgehalt zunächst reduzieren. Bei dem Bindemittelgehalt von 6,50 M-% bewirkt eine weitere Zugabe an Bitumen eine Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Des Weiteren weisen die Varianten mit der feinen Korngrößenverteilung gegenüber denen mit der größeren eine schlechtere Verformungsbeständigkeit über alle Bindemittelgehalte und

eine deutlichere Zunahme der plastischen Dehnungen ab einem Bindemittelgehalt von 7,0 M-% auf.

Die Abbildung 4-32 zeigt den Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten der Asphaltdeckschicht. Das steifere Bitumen PmB 10/40-65A besitzt keinen Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit. Dieser Umstand kann ebenfalls durch die Verwendung des steiferen Bitumen in Kombination mit dem höheren Bindemittelgehalt (0,22 M-%) erklärt werden.

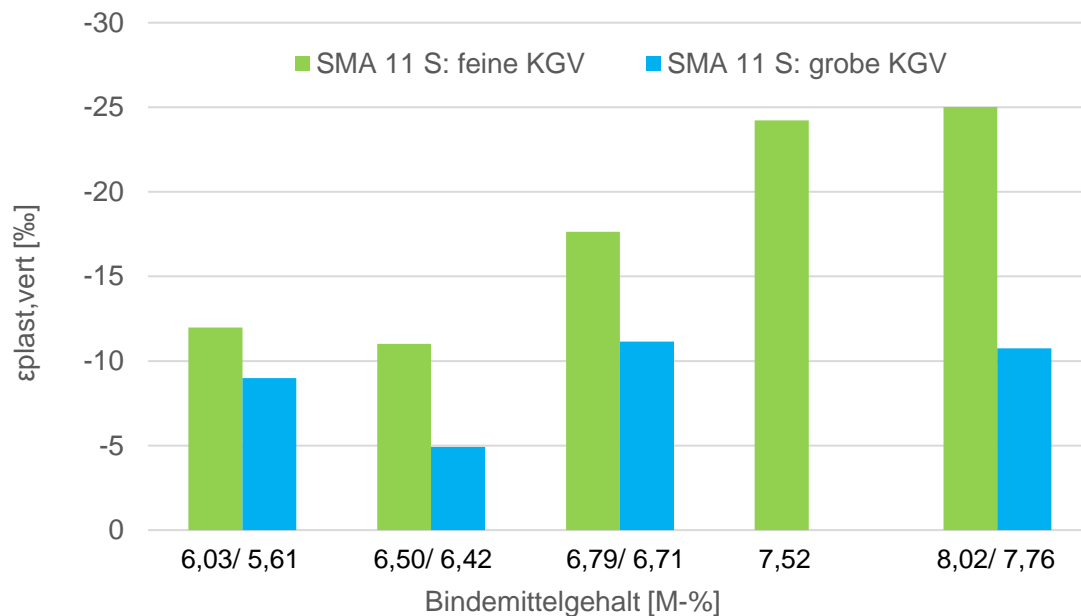


Abb. 4-31: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei  $T=30^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,20 \text{ N/mm}^2$

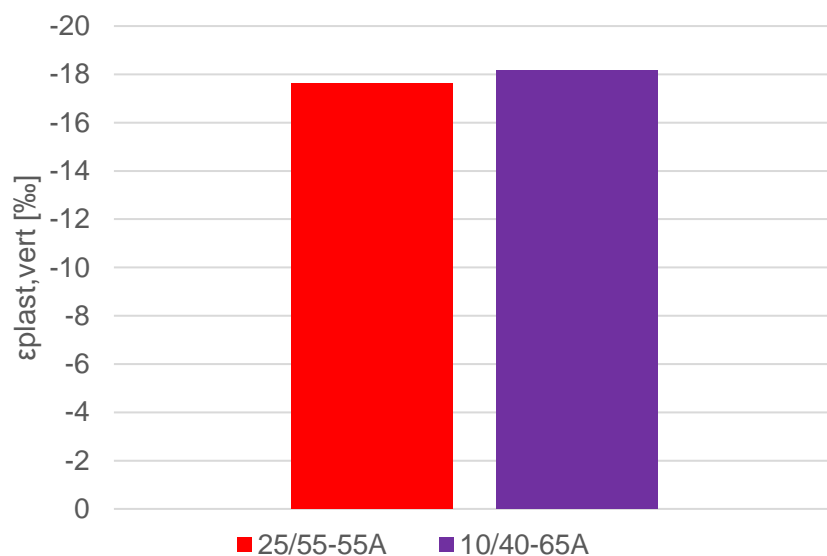


Abb. 4-32: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim SMA 11 S

In Abbildung 4-33 sind die plastischen Dehnungen der Binderschichtvarianten in Bezug auf den Soll-Bindemittelgehalt dargestellt. Für beide Korngrößenverteilungen ist zu erkennen, dass sich die plastischen Dehnungen mit Zunahme des Bindemittelgehaltes erhöhen. Der stetig gestufte Asphaltbeton besitzt die größten plastischen Dehnungen bei einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-%. Bei einer weiteren Zunahme des Bindemittelgehaltes reduzieren sich die plastischen Dehnungen. Dies ist wieder auf die Verhärtung des Bitumens zurück zu führen. Die Korngrößenverteilung des SMA 16 B S besitzt zunächst ein besseres Verformungsverhalten als der AC 16 B S SG. Erst die Variante mit dem verhärteten Bitumen des stetig gestuften Asphaltbeton weist ein besseres Verformungsverhalten auf als der SMA 16 B S. Die Abbildung 4-34 zeigt den Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten der Asphaltbinderschicht. Das weichere Bitumen PmB 25/55-55A bewirkt ein Anstieg der plastischen Dehnungen bei gleichen Versuchsbedingungen. Bei diesen beiden Varianten beträgt der Unterschied des Bindemittelgehaltes 0,28 M-%.

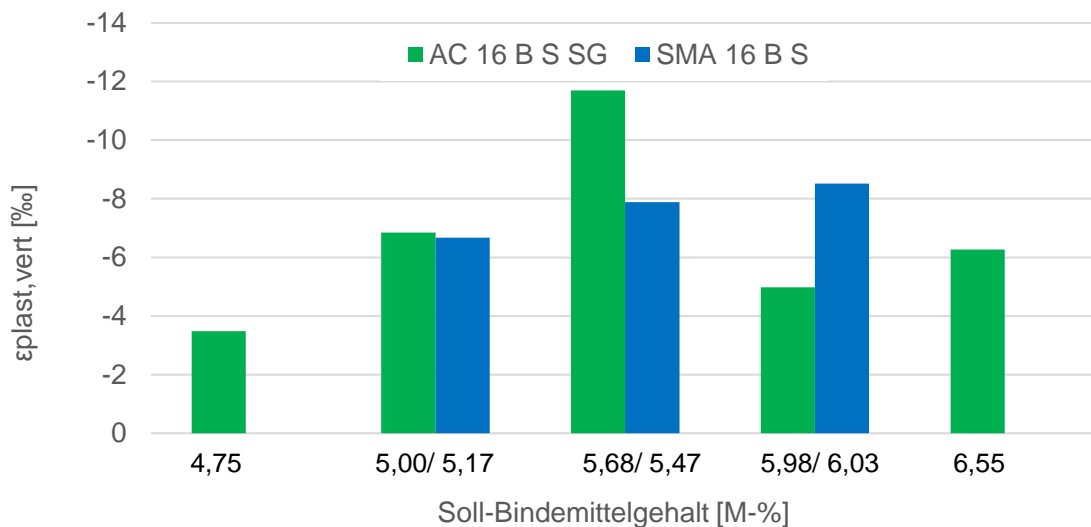


Abbildung 4-33: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei  $T=50^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_0=0,20 \text{ N/mm}^2$

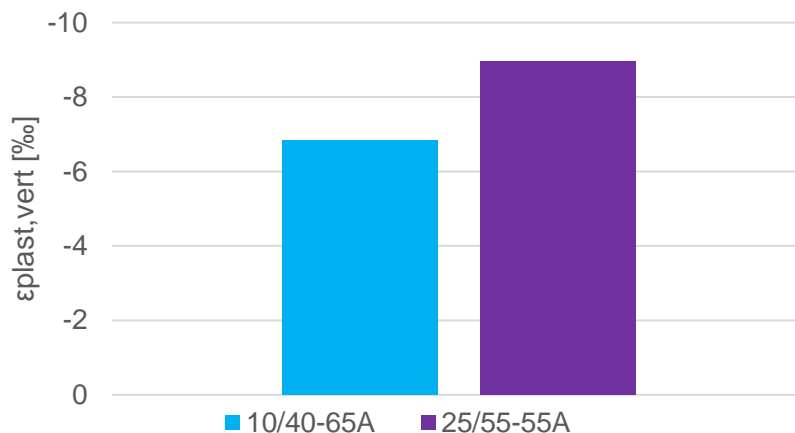


Abb. 4-34: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim AC 16 B S SG

#### 4.4.4 Triaxialversuche mit Druckbeanspruchung

Die Triaxialversuche mit Druckbeanspruchungen wurden an jeweils einem optimierten Deck- und Binderschichtgemisch sowie an einem Tragschichtgemisch durchgeführt. Die Versuchsergebnisse dienen hauptsächlich als Grundlage für die Prognoserechnungen der Spurrinnenbildung und somit zu Vergleichszwecken der Ergebnisse der Prognoserechnungen zwischen dem Triaxialversuch und dem einaxialen Druck-Schwellversuch am schlanken bzw. am gedrunenen Probekörper. Daher werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Versuche des Triaxialversuches mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch gegenüber gestellt.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse am Versuchsende des Deckschichtgemisches (Abbildung 4-35) bzw. des Binderschichtgemisches (Abbildung 4-36) dargestellt. Bei beiden Asphaltgemischen ist zu beobachten, dass die geringsten plastischen Dehnungen mit dem Triaxialversuch gemessen wurden, gefolgt von dem Druckschwellversuch am schlanken Probekörper. Die größten plastischen Dehnungen wurden mit dem Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper gemessen. Insbesondere bei dem Bindergemisch fällt der Unterschied der ermittelten Dehnungen zu den anderen Versuchsarten deutlich aus.

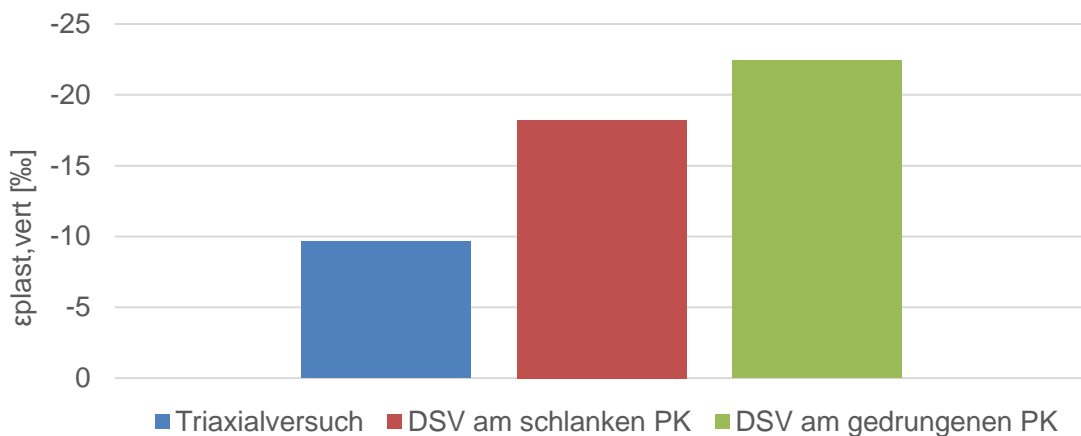


Abb. 4-35: Versuchsergebnisse des SMA 11 S mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten

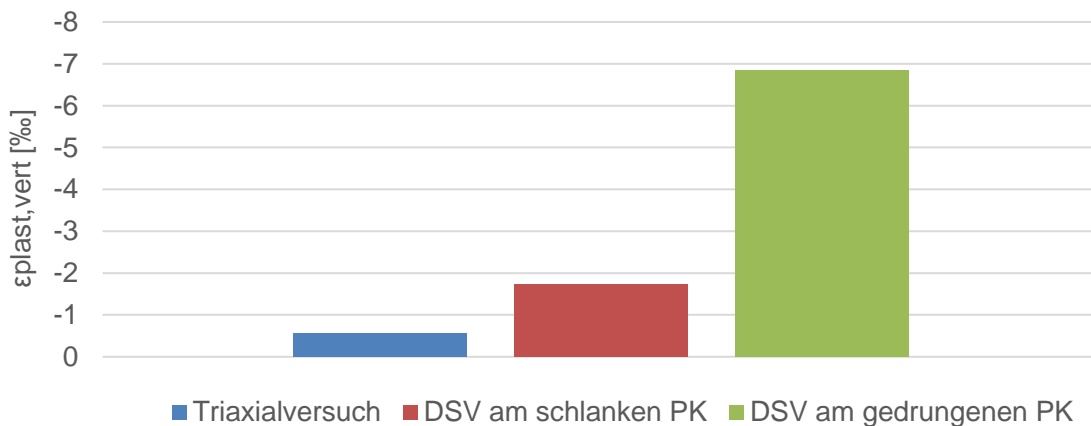


Abb. 4-36: Versuchsergebnisse des AC 16 B S SG mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten

#### 4.5 Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf das Griffigkeitsverhalten

Der Einfluss der Zusammensetzungen der Asphaltdeckschichtvarianten auf das Griffigkeitsverhalten wurde mit dem Darmstädter Polierverfahren [Bald 2004] getestet. Dazu werden die Probekörper in die Schnellpoliermaschine eingespannt und bei Raumtemperatur mit Grob- und anschließend mit Feinkorund jeweils für drei Stunden poliert. Dabei werden Probekörper mit unterschiedlichen Bindemittelgehalte und einer Korngrößenverteilung in einem Prüfgang getestet. Anschließend wird die Griffigkeitsprüfung mit Hilfe des SRT-Pendelgerätes durchgeführt. Die Voruntersuchungen zeigten jedoch, dass bei einem Prüfgang mit jeweils drei Stunden Poliervorgang keine signifikanten Änderungen des Reibungswertes der Asphaltprobekörper feststellbar waren. Daher wurde beschlossen die Poliervorgänge mit Grob- und Feinkorund auf jeweils sechs Stunden zu verlängern um somit den Einfluss der Asphaltzusammensetzung der Deckschichten auf das Griffigkeitsverhalten genauer beurteilen zu können.

In Abbildung 4-37 und 4-38 sind die Versuchsergebnisse für die beiden Korngrößenverteilungen dargestellt. Aus den Versuchsergebnissen ist kein Einfluss der Korngrößenverteilung oder der Variation des Bindemittelgehaltes der Asphaltdeckschichten auf das Griffigkeitsverhalten zu erkennen. Des Weiteren werden die Reibungswerte der Varianten nach der Polierbeanspruchung größer. Dies würde bedeuten, dass die Griffigkeit sich ebenfalls verbessert, was aber die Realität nicht wieder spiegelt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einen Probekörper vor und nach der Polierbeanspruchung. Schon visuell ist zu erkennen, dass die Struktur der Deckschicht durch die Polierbeanspruchung fein geschliffen wurde und die Griffigkeit somit abnehmen müsste. Ebenfalls nach einer haptischen Begutachtung der Probekörper konnte festgestellt werden, dass die Griffigkeit der Probekörper deutlich reduziert wurde. Dies müsste sich in den Versuchsergebnissen durch eine Reduzierung des PSV-Wertes wieder spiegeln. Aus diesen Gründen und da ein Einfluss der Asphaltzusammensetzung nicht erkennbar ist, ist das Verfahren zur Beurteilung des Griffigkeitsverhaltens von Asphaltdeckschichten ungeeignet.

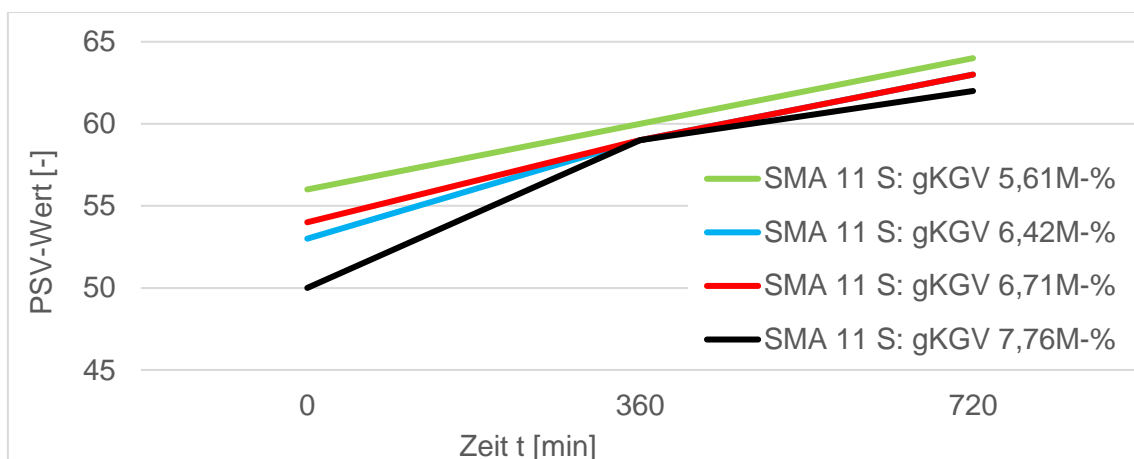


Abb. 4-37: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: grobe KGV



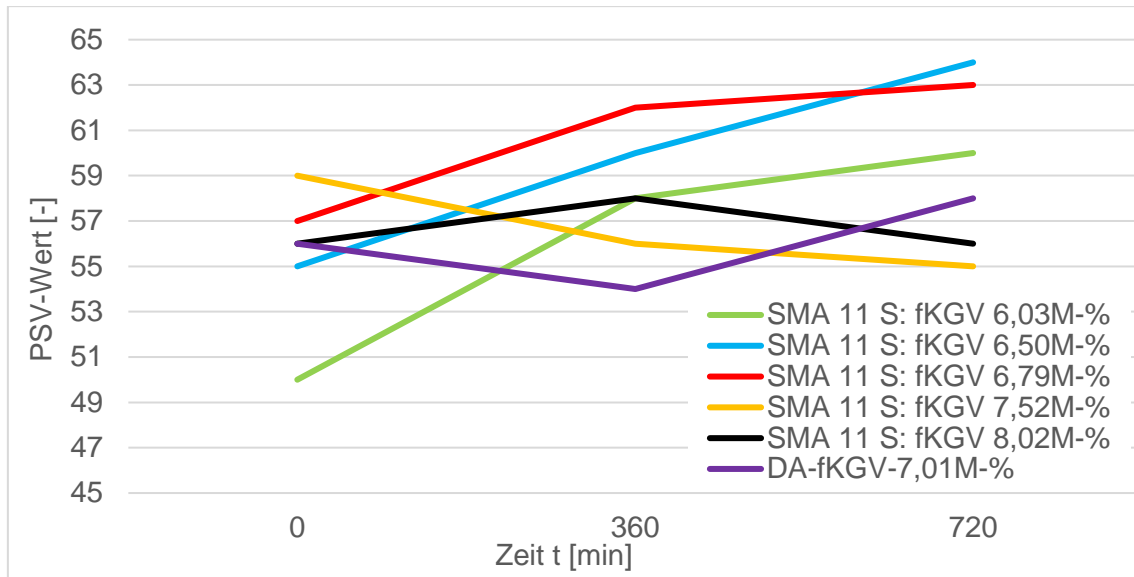


Abb. 4-38: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: feine KGV



Abb. 4-39: Probekörper vor der Polierbeanspruchung



Abb. 4-40: Probekörper nach der Polierbeanspruchung

## 5 Statistische Auswertung

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen der Asphaltgemische wurden anhand von statistischen Analyseverfahren ausgewertet. Dabei galt die Annahme, dass die Ergebnisse jeder Variante der Asphaltgemische einer Grundgesamtheit angehören. Die Grundgesamtheit bezeichnet die Menge aller potentiellen Untersuchungsobjekte mit gleichen Voraussetzungen für eine bestimmte Fragestellung. Als Stichproben aus der Grundgesamtheit konnten die Messergebnisse angesehen werden. Anhand der Stichproben wurden Untersuchungen zur Gleichheit der Varianzen und regressionsanalytische Verfahren durchgeführt.

Die Nullhypothese  $H_0$  bei der statistischen Auswertung bezeichnet die Annahme, dass zwei Grundgesamtheiten hinsichtlich eines Parameters übereinstimmen [Sachs 1999]. Die statistischen Signifikanztests können keine Übereinstimmungen zwischen Parametern feststellen, sondern lediglich Unterschiede mit einer vorgesehenen statistischen Sicherheit aufdecken. Die Irrtumswahrscheinlichkeit begrenzt dabei bei Ablehnung der Nullhypothese eine Fehleinschätzung [Dragon 2015]. Somit wird bei den statistischen Analyseverfahren die Alternativhypothese  $H_1$  überprüft, die einen Unterschied zwischen zwei Grundgesamtheiten annimmt [Dragon 2015]. Das Ziel der Verfahren ist, Unterschiede der Grundgesamtheiten zu identifizieren, die nicht auf Zufälligkeit, sondern auf einen tatsächlichen Unterschied zurückzuführen ist. Die verwendete Irrtumswahrscheinlichkeit wird, nach der im Bauwesen gängigen Irrtumswahrscheinlichkeit, auf  $\alpha = 5 \%$ , festgelegt [Dragon 2015]. Die Nullhypothese wird verworfen und die Alternativhypothese angenommen, wenn aufgrund des Signifikanztests mit dem  $\alpha$ -Niveau ein Unterschied zwischen den Grundgesamtheiten zu vermuten ist. Dabei bedeutet die Irrtumswahrscheinlichkeit mit einem 5 %-Niveau, dass in 5 % aller Stichproben die Nullhypothese fälschlicherweise abgelehnt wurde [Sachs 1999].

### 5.1 Prüfung der Gleichheit der Varianzen

Zunächst wurde überprüft, ob zwei oder mehrere unabhängige Stichproben einer gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Dazu erfolgten die Untersuchungen der Varianzen auf Homogenität mit Hilfe des Tests nach der Methode von Bartlett [Sachs 1999]. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug bei diesem Test ebenfalls 5 %. Die Teststatistik wurde wie folgt berechnet:

$$\hat{\chi}^2 = \frac{1}{c} * [2,3026 * (v * \lg \hat{s}_R^2 - \sum v_j * \lg \hat{s}_{Rj}^2)] \quad \text{Gleichung 25}$$

mit:

$$c = \frac{\left(\frac{\sum 1}{v_i}\right) - \frac{1}{v}}{3 * (q - 1)} + 1 \quad \text{Gleichung 26}$$

$$\hat{s}_R^2 = \frac{\sum v_j * \hat{s}_{Rj}^2}{v} \quad \text{Gleichung 27}$$

$$v = \sum n_j - q = \sum v_j \quad \text{Gleichung 28}$$

- j Anzahl der  $j = 1 \dots q$  Gruppen
- $n_j$  Stichprobenumfang in der Gruppe  $j$
- $\widehat{s_R^2}$  Schätzung der gewogenen Varianz
- $v$  Gesamtzahl der Freiheitsgrade
- $\hat{s}_{Rj}^2$  Schätzung der Varianz in der Gruppe  $j$
- $v_j$  Anzahl der Freiheitsgrade in der Gruppe  $j$   $v_j = n_j - 1$
- $\bar{v}$  Freiheitsgrade  $\bar{v} = q - 1$

Die Nullhypothese  $H_0$  wurde abgelehnt, wenn  $\chi^2 > \chi_{(\alpha, \bar{v})}$  ist.

## 5.2 Regressionsanalytische Verfahren

Zur Untersuchung von Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen wurde die Regressionsanalyse verwendet. Diese diente dazu, Zusammenhänge zu erklären und Werte der abhängigen Variablen zu schätzen [Reinhardt 2003]. Dazu erfolgte zunächst die Formulierung der Modellgleichung für die Regressionsanalyse. Anschließend konnten die Regressionsparameter der Gleichung geschätzt werden.

In dieser Arbeit war der Vergleich der geschätzten Regressionsparameter der Funktionen von Interesse. Dadurch konnte ermittelt werden, ob sich die Asphaltzusammensetzung auf das Materialverhalten statistisch signifikant auswirkt. Die analytischen Verfahren können allerdings nur für Betrachtungen von linearen Funktionen angewendet werden, daher war es notwendig Funktionen, die dieser Form nicht entsprachen zu transformieren. Die notwendige Transformation der Funktion wird in dem jeweiligen Abschnitt genauer erklärt. Die Voraussetzung für die Verwendung der Regressionsanalyse stellte dabei die Homogenität der Varianzen der Residuen dar. Falls eine Varianzheterogenität festgestellt wurde, mussten die unabhängigen und abhängigen Variablen der Stichprobe mit Hilfe des Aitken-Schätzers nach Gleichung 29 transformiert werden [Toutenburg 2003].

$$c_j = \frac{\hat{s}_{Rj \max}}{\hat{s}_{Rj}} \quad \text{Gleichung 29}$$

mit:

- $c_j$  Aitken-Schätzer
- $\hat{s}_{Rj \max}$  Maximale Standardabweichung der zu vergleichenden  $j$  Gruppen
- $\hat{s}_{Rj}$  Standardabweichung der Gruppen  $j$

Zunächst war die Frage zu klären, ob die Steigungen der linearen Funktionen sich signifikant unterscheiden [Toutenburg 2003; Milliken 2002]. Die Überprüfung erfolgte anhand der Teststatistik aus Gleichung 30. Die genaue Herleitung ist in [Dragon 2015] beschrieben.

$$\hat{F}_{\beta 1} = \frac{\frac{SSR_{\beta 1} - SSR}{v_1}}{\frac{SSR}{v_2}} \quad \text{Gleichung 30}$$

mit:

$\hat{F}_{\beta 1}$  Zufallsvariable

SSR Residuenquadratsumme im transformierten vollen Modell mit q Steigungen und q Achsenabschnitten

$SSR_{\beta 1}$  Residuenquadratsumme im transformierten reduzierten Modell mit einer Steigung und q Achsenabschnitten

$v_1, v_2$  Freiheitsgrade

Die Nullhypothese  $H_0$  wurde abgelehnt, falls  $\hat{F}_{\beta 1} > F_{(\alpha, v_1, v_2)}$  ist.

Als nächstes wurde überprüft, ob die Achsenabschnitte der linearen Funktionen sich signifikant unterscheiden [Toutenburg 2003; Milliken 2002]. Die Überprüfung erfolgte anhand der Teststatistik aus Gleichung 31. Die genaue Herleitung ist in [Dragon 2015] beschrieben.

$$\hat{F}_{\beta 0} = \frac{\frac{SSR_{\beta 0} - SSR_{\beta 1}}{v_1}}{\frac{SSR_{\beta 1}}{v_2}} \quad \text{Gleichung 31}$$

mit:

$\hat{F}_{\beta 0}$  Zufallsvariable

$SSR_{\beta 1}$  Residuenquadratsumme im transformierten reduzierten Modell mit einer Steigungen und q Achsenabschnitten

$SSR_{\beta 0}$  Residuenquadratsumme im transformierten reduzierten Modell mit einer Steigung und einem Achsenabschnitten

$v_1, v_2$  Freiheitsgrade

Die Nullhypothese  $H_0$  wurde abgelehnt, falls  $\hat{F}_{\beta 0} > F_{(\alpha, v_1, v_2)}$  ist.

### 5.2.1 Statistische Auswertung der Untersuchungen zum Steifigkeitsverhalten

Die Linearisierung der Hauptkurve der Asphaltgemische ist in der TP Asphalt-StB Teil 26, Entwurf 2018, beschrieben. Die lineare Modellgleichung lautet:

$$|E^*| = \dot{z}_1 * x^* + \dot{z}_0 \quad \text{Gleichung 32}$$

mit:

$|E^*|$  linearisierter Steifigkeitsmodul [-]

$x^*$  beliebiger Wert auf der Abszissenachse der Hauptkurve [Hz]

$z_0, z_1$  Materialparameter der linearisierten Hauptkurve durch einfache Regression aus den Versuchsergebnissen zu ermitteln [-]

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-1 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Änderung der Sieblinie bei ähnlichen Bindemittelgehalten die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung abgelehnt werden muss. Außerdem ist der Unterschied der Achsenabschnitte in dem Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,42 M-% bis 6,79 M-% bei Verwendung der anderen Sieblinie statistisch signifikant.

Bei der groben Korngrößenverteilung bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes eine statistisch signifikante Änderung der Steigung und der Achsenabschnitte in der Modellgleichung. Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann nur im Vergleich der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% und den Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 6,42 M-% bzw. 6,71 M-% beibehalten werden.

Bei der feinen Korngrößenverteilung besitzt lediglich die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,79 M-% eine unterschiedliche Steigung gegenüber den anderen Varianten. Der Anstieg des Bindemittelgehaltes bewirkt einen signifikanten Unterschied des Achsenabschnittes der linearisierten Gleichungen bis zu einem Bindemittelgehalt von 6,79 M-%. Die Verwendung des steiferen Bitumens 10/40-65A bewirkt einen signifikanten Unterschied der Steigung und des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-1: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-2: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten

Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-3 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-4 dargestellt. Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung bzw. auf die Achsenabschnitte zu erkennen.

Bei dem Asphaltbindergemisch nach dem Splittmastixprinzip besitzt der Bindemittelgehalt keinen signifikanten Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung. Im Vergleich zu den anderen Varianten muss bei dem Asphaltgemisch mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-% die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung abgelehnt werden.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden mit der Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-%. Die Erhöhung des Bindemittelgehaltes bewirkt allerdings eine Änderung des Achsenabschnittes und die Nullhypothese muss somit verworfen werden. Die Ausnahme stellt wieder die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% dar. Die Verwendung des Bitumens 25/55-55A bewirkt einen signifikanten Unterschied des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | -                      | X                            |                             |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      | X                            |                             |

Tab. 5-3: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | -                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-4: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten

### 5.2.2 Statistische Auswertung der Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten

Die Ermüdungsfunktion entspricht einer Potenzfunktion und muss somit in eine lineare Funktion transformiert werden. Dazu werden die elastischen Anfangsdehnungen  $\varepsilon_{el,anf}$  und die dazugehörigen ermittelten Lastwechselzahlen  $N_{Makro}$  nach Gleichung 33 und 34 logarithmiert.

$$N_{Makro}^* = \ln(N_{Makro}) \quad \text{Gleichung 33}$$

$$\varepsilon_{el,anf}^* = \ln(\varepsilon_{el,anf}) \quad \text{Gleichung 34}$$



mit:

$N_{\text{Makro}}$  Lastwechselzahl [-]

$\epsilon_{\text{el,anf}}$  elastische Anfangsdehnung [‰]

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-5 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-6 dargestellt.

Die Variation der Sieblinie bewirkt eine signifikante Änderung der Steigung der Modellgleichung und die Alternativhypothese muss angenommen werden. Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei der Variation der Korngrößenverteilung erst bei sehr hohen Bindemittelgehalten (7,76 M-% und 8,02 M-%) beibehalten werden. Die Variation der Sieblinie besitzt keinen statistisch signifikanten Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann mit Zunahme des Bindemittelgehaltes bei der groben Korngrößenverteilung beibehalten werden. Dagegen muss die Alternativhypothese, die einen Unterschied des Achsenabschnittes beinhaltet, mit Zunahme des Bindemittelgehaltes angenommen werden, mit der Ausnahme bei dem Vergleich der Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-% und 7,76 M-%.

Bei der feinen Korngrößenverteilung kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden. Die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 8,02 M-% besitzt, im Vergleich zu den anderen Varianten (mit Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-%), eine unterschiedliche Steigung. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss bei der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-% stets ablehnt werden. Ansonsten ist kein genauer Trend zum Einfluss des Bindemittelgehaltes zum Achsenabschnitt der Modellgleichung fest zu stellen. Die Verwendung des Bitumens 10/40-65A bewirkt nur die Ablehnung der Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | X                      | X                            |                             |

Tab. 5-5: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 7,76 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 7,52 M-% - fKGV 8,02 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | X                      |                              | X                           |

Tab. 5-6: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten

Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-7 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-8 dargestellt.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      | X                            |                             |

Tab. 5-7: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      | X                            |                             |

Tab. 5-8: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten

Bei der Variation der Sieblinie kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung beibehalten werden. Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Achsenabschnitte zu erkennen.

Die Zunahme des Bindemittelgehaltes besitzt bei den Bindergemischen nach dem Splittmastixprinzip keinen statistischen signifikanten Einfluss auf die Steigung und den Achsenabschnitten in der Modellgleichung.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden. Lediglich die

Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% besitzt einen signifikanten Unterschied der Steigung zu den anderen Varianten. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte kann mit Zunahme des Bindemittels bis zu einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% beibehalten werden. Bei der weiteren Erhöhung des Bindemittels muss die Alternativhypothese angenommen werden. Die Verwendung des Bitumens 25/55-55A besitzt keinen signifikanten Einfluss auf die Steigung und des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

### 5.2.3 Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse zum Verformungsverhalten

In diesem Abschnitt wird mit Hilfe der regressionsanalytischen Verfahren der Einfluss der Asphaltzusammensetzung auf den Materialparameter A der Impulskriechkurve untersucht (Gleichung 44, siehe Abschnitt 6.2.1). Da diese Funktion keine lineare Form aufweist, ist diese in eine lineare Form zu transformieren. Durch die Substitution nach Gleichung 35 wird der Anstieg über den Wert k beschrieben. Außerdem werden die elastischen Anfangsdehnungen  $\varepsilon_{el,anf}$  und der dazugehörige Materialparameter A nach Gleichung 36 und 37 logarithmiert.

$$k = a_1 * (T - T_0) \quad \text{Gleichung 35}$$

$$A^* = \ln(A) \quad \text{Gleichung 36}$$

$$\varepsilon_{el,anf}^* = \ln(\varepsilon_{el}) \quad \text{Gleichung 37}$$

mit:

$\varepsilon_{el}$  elastische Dehnung [‰]

T Prüftemperatur [°C]

T<sub>0</sub> Referenztemperatur, bestimmt durch Regression [°C]

A Materialparameter [-]

a<sub>1</sub> Regressionsparameter [-]

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-9 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-10 dargestellt.

Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen. Unter Variation der Sieblinie muss die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt werden.

Bei der groben Korngrößenverteilung besitzt die Zunahme des Bindemittelgehaltes keinen Einfluss auf die Steigung der Modellgleichung. Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes wird bei der groben Korngrößenverteilung die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt.

Bei der feinen Korngrößenverteilung, unter Zunahme des Bindemittelgehaltes, kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung beibehalten werden, mit Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-%. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss mit Zunahme des Bindemittels bei der feinen Korngrößenverteilung verworfen werden. Die Verwendung des Bitumen 10/40-65A besitzt nur einen signifikanten Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      | X                            |                             |

Tab. 5-9: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-10: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-11 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-12 dargestellt.

Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen. Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss unter Variation der Sieblinie abgelehnt werden.

Bei den Bindergemischen nach dem Splittmastixprinzip kann die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung mit Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden. Dagegen muss die Alternativhypothese, die einen Unterschied der Achsabschnitte beinhaltet, angenommen werden.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton unter Zunahme des Bindemittelgehaltes beibehalten werden (mit der Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-%). Die Zunahme des Bindemittelgehaltes besitzt einen Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung. Allerdings kann die Nullhypothese der Gleichheit der Achsabschnitte bei dem Vergleich der Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 4,75 M-% und 5,00 M-% und den Varianten mit einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% und 5,98 M-% beibehalten werden. Die Verwendung des Bitumen 25/55-55A beeinflusst sowohl die Steigung, als auch den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      | X                            |                             |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      |                              | X                           |

Tab. 5-11: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | X                      |                              | X                           |

Tab. 5-12: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper)

Die Ergebnisse der Asphaltdeckschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-13 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-14 dargestellt.

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      | X                            |                             |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      | X                            |                             |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      | X                            |                             |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      | X                            |                             |

Tab. 5-13: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)

| SMA 11 S ...                   | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,42 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 6,71 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - gKGV 7,76 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 6,71 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - gKGV 7,76 M-%  | X                      |                              | X                           |
| gKGV 5,61 M-% - fKGV 6,03 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,42 M-% - fKGV 6,50 M-%  | -                      |                              | X                           |
| gKGV 6,71 M-% - fKGV 6,79 M-%  | X                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,50 M-%  | X                      | X                            |                             |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,03 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 6,79 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,50 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 7,52 M-%  | -                      |                              | X                           |
| fKGV 6,79 M-% - fKGV 10/40-65A | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-14: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Deckschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)

Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen. Unter Variation der Sieblinie muss die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt werden.

Die Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkt eine Veränderung der Steigung in der Modellgleichung (Ausnahmen: siehe Tabelle 5-13). Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes wird bei der groben Korngrößenverteilung die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte abgelehnt.

Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes wird die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung beibehalten und der Gleichheit der Achsenabschnitte verworfen. Die Ausnahme stellt in beiden Fällen die Variante mit einem Bindemittelgehalt von 6,03 M-% dar. Die Verwendung des Bitumens 10/40-65A bewirkt nur eine signifikante Änderung des Achsenabschnittes der Modellgleichung.

Die Ergebnisse der Asphaltbinderschichtvarianten, die mit Hilfe des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper ermittelt wurden, sind zur Untersuchung der Gleichheit der Steigung in Tabelle 5-15 bzw. zur Untersuchung der Gleichheit der Achsenabschnitte in Tabelle 5-16 dargestellt.

Die Nullhypothese der Gleichheit der Achsenabschnitte muss unter Variation der Sieblinie abgelehnt werden. Aus den Ergebnissen ist kein eindeutiger Trend zum Einfluss der Sieblinie auf die Steigung zu erkennen.

Bei den Bindergemischen nach dem Splittmastixprinzip muss die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung mit Zunahme des Bindemittelgehaltes (mit einer Ausnahme) abgelehnt werden. Dagegen muss die Alternativhypothese, die einen Unterschied der Achsenabschnitte beinhaltet, angenommen werden.



Die Nullhypothese der Gleichheit der Steigung kann bei dem stetig gestuften Asphaltbeton unter Zunahme des Bindemittelgehaltes zunächst beibehalten werden. Ab einem Bindemittelgehalt von 5,68 M-% muss die Alternativhypothese angenommen werden. Der Bindemittelgehalt besitzt einen Einfluss auf den Achsenabschnitt der Modellgleichung, mit der Ausnahme der Variante mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-%. Die Verwendung des Bitumen 25/55-55A beeinflusst den Achsenabschnitt der Modellgleichung.

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      | X                            |                             |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      | X                            |                             |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      | X                            |                             |

Tab. 5-15: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit der Steigung der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)

|                             | Homogenität<br>Varianz | H <sub>0</sub><br>angenommen | H <sub>0</sub><br>abgelehnt |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SMA 5,17 M-% - SMA 5,47 M-% | X                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - SMA 6,03 M-% | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,17 M-% - AC 5,00 M-%  | -                      |                              | X                           |
| SMA 5,47 M-% - AC 5,68 M-%  | X                      |                              | X                           |
| SMA 6,03 M-% - AC 5,98 M-%  | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,00 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 4,75 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 5,68 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 5,98 M-%   | -                      | X                            |                             |
| AC 5,00 M-% - AC 6,55 M-%   | -                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 5,98 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,68 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,98 M-% - AC 6,55 M-%   | X                      |                              | X                           |
| AC 5,00 M-% - AC 25/55-55A  | -                      |                              | X                           |

Tab. 5-16: Untersuchungsergebnisse zur Gleichheit des Achsenabschnittes der Binderschichtvarianten (Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper)

## 6 Prognoserechnungen

Mit den Versuchsergebnissen wurden Prognoserechnungen durchgeführt, welche die Auswirkungen der Asphaltzusammensetzung auf Erhaltungs-/Erneuerungsintervalle verdeutlichen können. Die Prognoserechnungen sollen zur Optimierung auf die Kriterien Spurrinnenbildung und Ermüdungsrissbildung innerhalb der Asphaltdeckschicht sowie der Asphaltbinderschicht dienen. Anhand der Versuchsergebnisse und dieser Prognoserechnungen sollen sowohl eine verbesserte Methode zur Bestimmung der Asphaltzusammensetzung als auch Konzeptionen für Asphaltgemische entwickelt werden, welche hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anforderungen optimiert sind.

### 6.1 Prognoserechnungen der Ermüdungsrissbildung

Die Prognoserechnungen der Ermüdungsrissbildung beschränkten sich auf die Betrachtung der Rissbildung in der Asphaltdeckschicht bzw. in der Asphaltbinderschicht. Die Nachweisführung für die Deckschicht erfolgte in Analogie zu dem Verfahren der RDO Asphalt 2009 für die Tragschicht.

Nach RDO Asphalt 2009 sind die Beanspruchungen des Asphalttes soweit zu begrenzen, dass Risse in den Asphaltsschichten während des Nutzungszeitraumes auszuschließen sind. Dabei wird angenommen, dass bis zu einer bestimmten Anzahl an ertragenen Lastwechselzahlen bei einer bestimmten Biegezugdehnung die Rissbildung verhindert werden kann. Erst bei einer Überschreitung der sogenannten Grenzlastwechselzahl entstehen Risse in der jeweiligen Asphaltsschicht. Die Grenzlastwechselzahl ist dabei von dem jeweiligen vorherrschenden Beanspruchungszustand abhängig. Die verschiedenen Beanspruchungszustände setzen sich aus den verschiedenen Achslasten und den unterschiedlichen Temperaturzustände zusammen. Für die Berechnungen wird vorausgesetzt, dass die Teilschädigungen infolge der ertragenen Lastwechsel anhand der Hypothese von Miner (Gleichung 38) zur Gesamtschädigung akkumuliert werden können.

$$\Sigma_{Miner} = \Sigma_{i=1}^n \frac{vorh N_i}{zul N_i} \leq 1 \quad \text{Gleichung 38}$$

mit:

vorh  $N_i$       im jeweiligen Beanspruchungszustand zu erwartende Anzahl an Lastwechsel in dem geplanten Nutzungszeitraum

zul  $N_i$       im jeweiligen Beanspruchungszustand ertragbare Anzahl an Lastwechsel in dem geplanten Nutzungszeitraum

n              Anzahl an zu berücksichtigenden Beanspruchungszustände

Die ertragbaren Lastwechselzahlen sind für die jeweiligen Beanspruchungszustände nach Gleichung 39 zu bestimmen. Die zu erwartenden Lastwechsel für die unterschiedlichen Beanspruchungszustände sind durch die Überlagerung der Häufigkeiten des Auftretens der verschiedenen Achslastklassen mit den Häufigkeiten

des Auftretens der verschiedenen Temperaturzustände zu bestimmen. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die Miner-Summe kleiner oder gleich 1 ist.

$$\text{zul } N = AF * a * \epsilon^k \quad \text{Gleichung 39}$$

mit:

|            |  |
|------------|--|
| zul $N_i$  | im jeweiligen Beanspruchungszustand ertragbare Anzahl an Lastwechsel in dem geplanten Nutzungszeitraum |
| a          | Materialkennwert, bestimmt aus dem Ermüdungsversuch  |
| $\epsilon$ | elastische Anfangsdehnung im Versuch   |
| k          | Materialkennwert, bestimmt aus dem Ermüdungsversuch  |
| AF         | Anpassungsfaktor nach RSO Asphalt, Entwurf 16  |

Als Eingangsgrößen für die Prognoserechnungen werden die Achslastkollektive und die Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen benötigt. Abweichend zur RDO Asphalt 2009 wurden nicht, die darin beschriebenen Temperaturverläufe verwendet, sondern normierte charakteristische Temperaturprofile, die sogenannten ncT's. Die Temperaturprofile sind in Abbildung 6-1 dargestellt. Entsprechend der Temperaturzonenkarte der RSO Asphalt, Entwurf 2018, wurde die Temperaturzone 5 ausgewählt. Die Häufigkeitsverteilung ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Als Achslastkollektiv wurde der BAB-Fernverkehr nach RDO Asphalt 18 (Abbildung 6-3) verwendet. Dadurch konnten die Sicherheitsbeiwerte der RDO Asphalt 09 nicht angewendet werden, da diese auf die Kalibrierung mit denen im Regelwerk beschriebenen Häufigkeitsverteilungen des Achslastkollektives und der Temperaturverläufe zurück zu führen sind. Somit wurden die Anpassungsfaktoren nach RSO Asphalt, Entwurf 18, berücksichtigt. In Tabelle 6-1 sind die Parameter zur Bestimmung der Verkehrsbelastung nach RStO 12 aufgeführt.

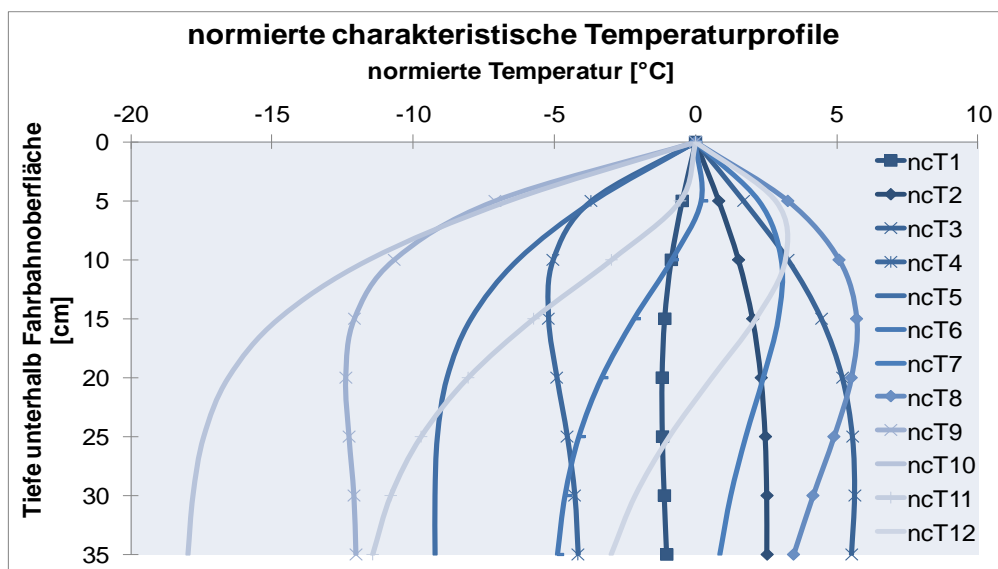


Abb. 6-1: normierte charakteristische Temperaturprofile [AP Klima und Verkehr]

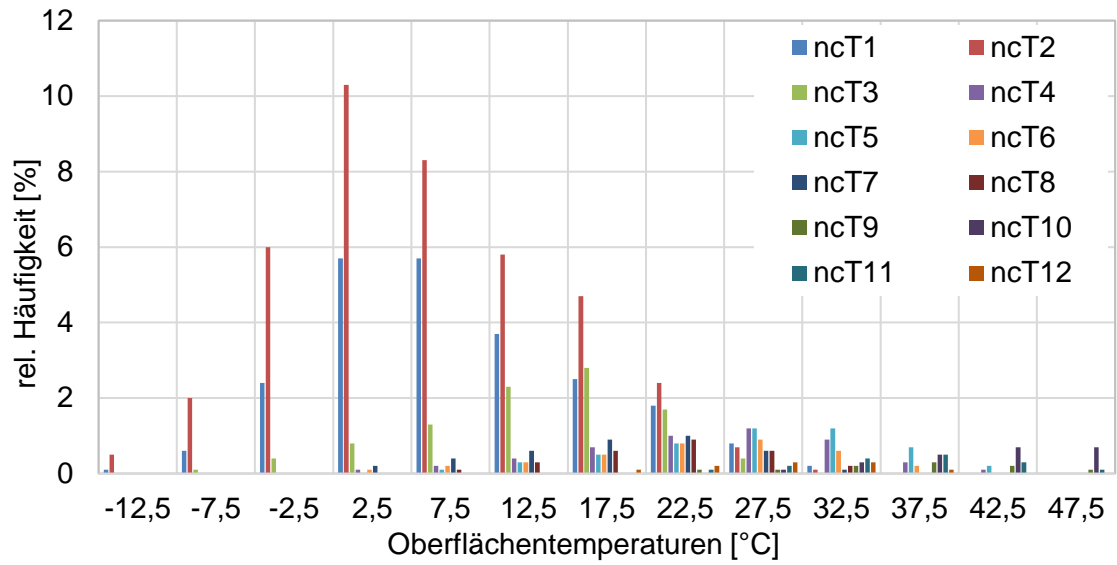


Abb. 6-2: Häufigkeitsverteilung der TOF für Zone 5 [AP Klima und Verkehr]

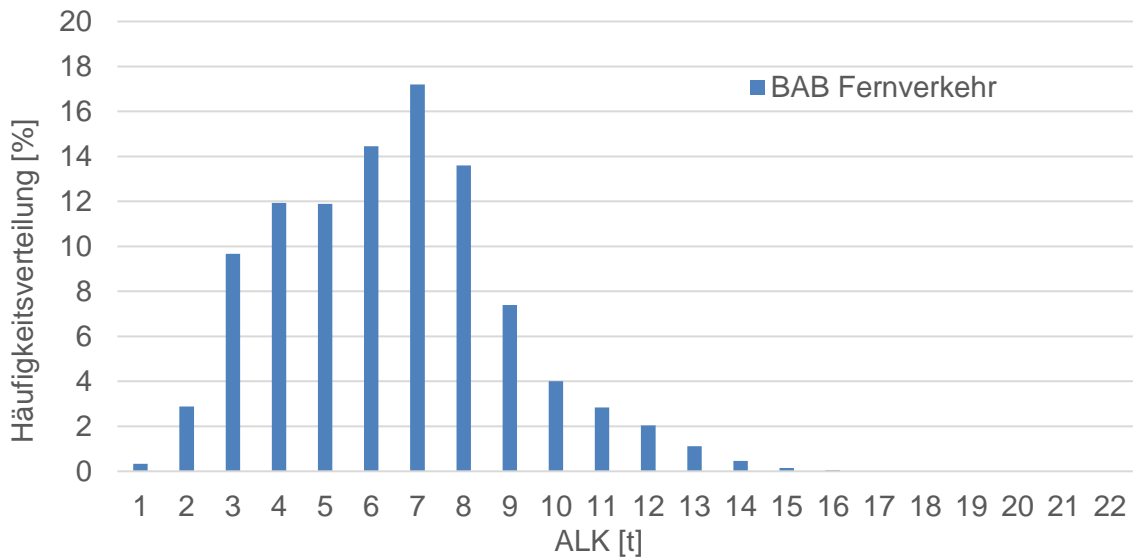


Abb. 6-3: Häufigkeitsverteilung des BAB Fernverkehrs [AP Klima und Verkehr]

|                     |        |
|---------------------|--------|
| DTV <sup>(SV)</sup> | 10.000 |
| f <sub>A</sub>      | 4,5    |
| f <sub>1</sub>      | 1,0    |
| f <sub>2</sub>      | 1,0    |
| f <sub>3</sub>      | 1,0    |
| p <sub>z</sub>      | 3 %    |

Tab. 6-1: Parameter zur Bestimmung der Verkehrsbelastung nach RStO 12

Mit einer geplanten Nutzungsdauer von 30 Jahren entspricht die Belastungsklasse unter diesen Annahmen einer BK 100 mit einer B-Zahl von 257,9 Mio. nach RStO 12. Der frostsichere Oberbau wurde auf 70 cm festgelegt und der nachfolgende Konstruktionsaufbau gewählt. Gemäß der deterministischen Verfahrensweise bei der Prognoseberechnung der Ermüdungsrisssbildung wurden die charakteristischen Materialgrößen der Asphalt-schichten anhand der jeweiligen Mittelwertfunktion in Ansatz gebracht. Zusätzlich wurden die Hauptkurve und die Ermüdungsfunktion für die Asphalttragschicht, die in Verbindung des Verformungsverhaltens untersucht wurde, ermittelt. Diese Versuchsdaten werden in den Prognoserechnungen berücksichtigt.

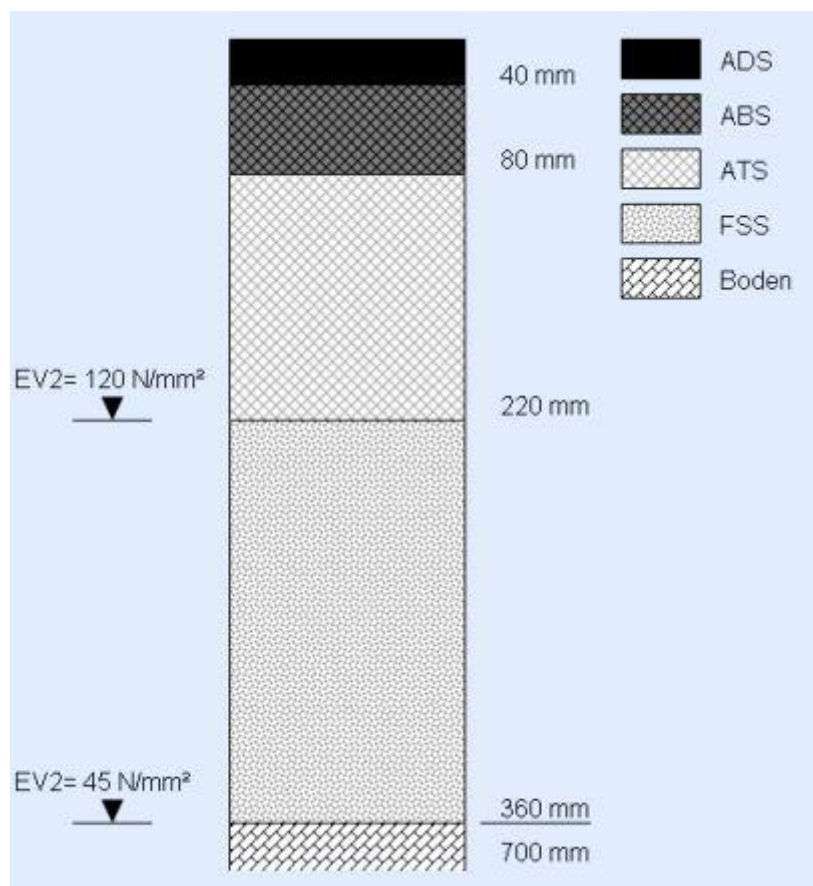


Abb. 6-4: gewählter Befestigungsaufbau nach RStO 12 (BK 100)

### 6.1.1 Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen in der Asphaltdeckschicht

Bisher wurde bei den Prognoserechnungen ein vollständiger (starrer) Verbund zwischen allen Asphalt-schichten, also auch zwischen der Asphaltdeck- und der Asphaltbinderschicht angenommen. Mit dieser Annahme entstehen im Bereich der Lastachse keine und nur weit außerhalb der Lasteintragungsfläche (1...2 m Abstand) nur unmaßgebende horizontal gerichtete Zugdehnungen (Biegezug) in der Asphaltdeckschicht. Jedoch zeigten Versuche zum Schichtenverbund, dass starrer Verbund in der Praxis nie erreicht wird [Wellner 2016]. Daher wurde für die weiteren

Prognoserechnungen zur Ermüdungsrisssbildung in der Asphaltdeckschicht zwischen dieser und der Asphaltbinderschicht und ebenfalls zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht abgeminderter Schichtenverbund nach den Empfehlungen bei der Abwicklung von Bauverträgen bei Anwendung der RDO Asphalt [EAB RDO] angenommen. Dadurch entstehen horizontale Zugdehnungen an der Unterseite der Asphaltdeckschicht (Abbildung 6-5). Das Maximum dieser Dehnungen tritt 115 mm neben der Lastachse auf. Die kryogenen Dehnungen werden bei dieser Betrachtung in Analogie zu den RDO Asphalt [RDO 09] bei jedem 2. Lastwechsel im Oberflächentemperaturbereich  $T \leq 5^\circ\text{C}$  auf die zur Nachweisführung angesetzten Dehnungen aus der Belastung addiert.

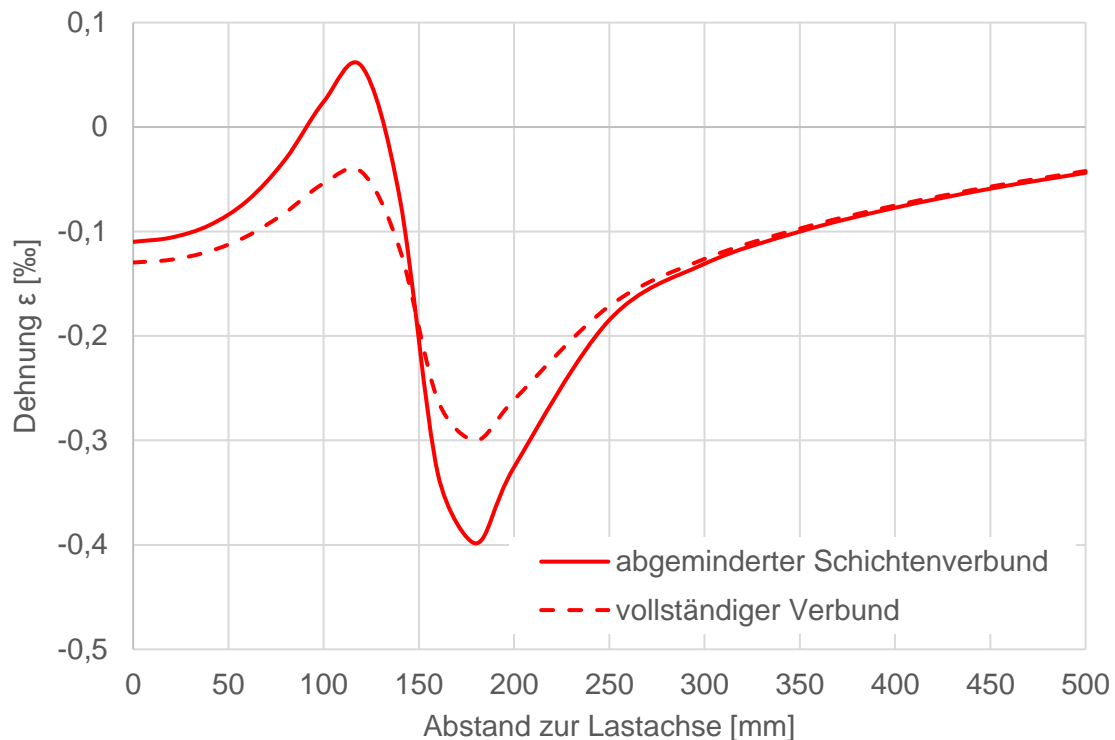


Abb. 6-5: Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltdeckschicht bei starren Verbund und abgeminderten Verbund

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen wurden wegen noch nicht erfolgter Kalibrierung des Verfahrens als Relativwerte angegeben. Es erfolgte die Festlegung des Ergebnisses des nachfolgenden Befestigungsaufbaus als Referenzwert (Ermüdungsstatus 100 %):

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 6,79 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,00 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, 4,39 M-% Bindemittelgehalt (50/70).

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltdeckschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen sind in Tabelle 6-2 und Abbildung 6-6 zusammengefasst.

| Variante              | Ermüdungsstatus |
|-----------------------|-----------------|
| SMA 11 S-fKGV-6,03M-% | 150,96 %        |
| SMA 11 S-fKGV-6,50M-% | 133,33 %        |
| SMA 11 S-fKGV-6,79M-% | 100 %           |
| SMA 11 S-fKGV-7,52M-% | 51,53 %         |
| SMA 11 S-fKGV-8,02M-% | 153,15 %        |
| SMA 11 S-gKGV-5,61M-% | 429,15 %        |
| SMA 11 S-gKGV-6,42M-% | 188,74 %        |
| SMA 11 S-gKGV-6,71M-% | 150,92 %        |
| SMA 11 S-gKGV-7,76M-% | 94,29 %         |
| DA-fKGV-7,01M-%       | 23,27 %         |

Tab. 6-2: Ergebnisse der Prognoserechnung der Asphaltdeckschichtgemische

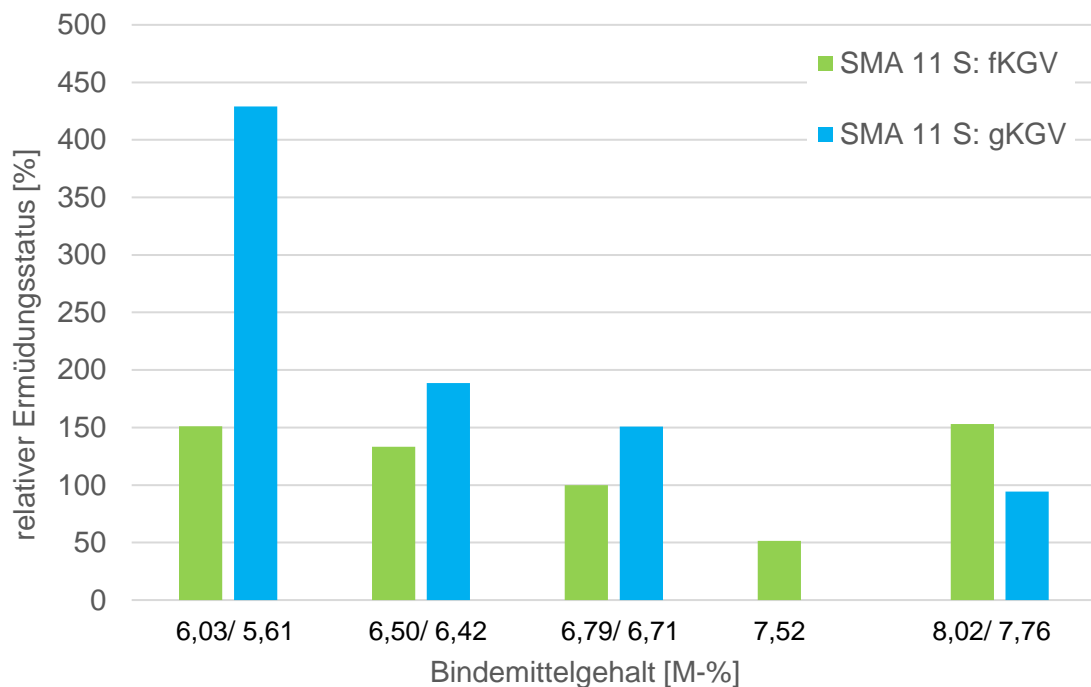


Abb. 6-6: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen zeigen, dass die Variante mit der feinen Korngrößenverteilung bei gleichem Bindemittelgehalt (mit Ausnahme von 8,0 M-%) des SMA 11 S einen geringeren Ermüdungsstatus aufweist als die Variante mit der groben Sieblinie. Die feine Korngrößenverteilung erzeugt den geringsten Ermüdungsstatus bei einem Bindemittelgehalt von 7,52 M-%. Bei der weiteren Zugabe an Bitumen verschlechtert sich das Ermüdungsverhalten wieder. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes generell eine Verbesserung des Ermüdungsstatus bei den Deckschichtvarianten mit der groben Korngrößenverteilung. Im untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes ergibt sich erwartungsgemäß das bessere Ermüdungsverhalten bei den Varianten der feinen Korngrößenverteilung. Die Verwendung des steiferen Bitumen PmB 10/40-65A bei der feinen Korngrößenverteilung bewirkt ein deutlich besseres Ermüdungsverhalten.

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen den Einfluss der Eigenschaften der Asphaltbinderschichten auf den Ermüdungsstatus des Nachweispunktes an der Unterseite der Asphaltdeckschicht. Dazu wurden als Deckschichtgemisch die Variante SMA 11 S-fKGV-6,79M-% für die Berechnungen festgelegt und lediglich die Eigenschaften (Hauptkurve, Ermüdungsfunktion und der Verlauf der kryogenen Zugspannungen) der Asphaltbinderschicht variiert.

| Variante             | Ermüdungsstatus |
|----------------------|-----------------|
| AC 16 B S SG-4,75M-% | 100,46 %        |
| AC 16 B S SG-5,00M-% | 100,00 %        |
| AC 16 B S SG-5,68M-% | 99,90 %         |
| AC 16 B S SG-5,98M-% | 101,24 %        |
| AC 16 B S SG-6,55M-% | 101,47 %        |
| SMA 16 B S- 5,17M-%  | 100,36 %        |
| SMA 16 B S- 5,47M-%  | 101,03 %        |
| SMA 16 B S- 6,03M-%  | 101,46 %        |
| BA-5,28M-%           | 100,37 %        |

Tab. 6-3: Einfluss der Eigenschaften der Asphaltbinderschicht auf den Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht

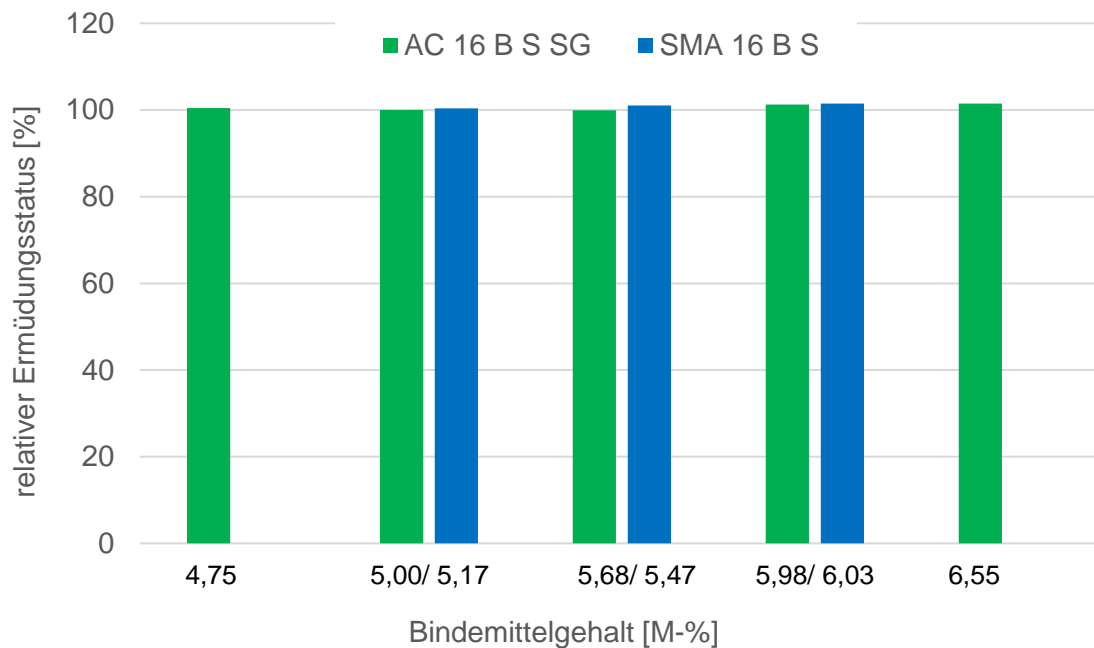


Abb. 6-7: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht unter Variation der Binderschichtgemische

Der relative Ermüdungsstatus für den Nachweispunkt an der Unterseite der Asphaltdeckschicht bleibt unter Variation der Binderschichtgemische nahezu konstant. Damit ist das Ermüdungsverhalten der Asphaltdeckschicht unter der Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen unabhängig von den Eigenschaften des darunter liegenden Binderschichtgemisches.



### 6.1.2 Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen in der Asphaltbinderschicht

Aufgrund der Überlegungen, die in Kapitel 6.1.1 beschrieben wurden, wurde für die Prognoserechnungen zur Ermüdungsrissbildung in der Asphaltbinderschicht zwischen der Asphaltdeck- und der Asphaltbinderschicht und ebenfalls zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht abgeminderter Schichtenverbund nach den Empfehlungen bei der Abwicklung von Bauverträgen bei Anwendung der RDO Asphalt [EAB RDO] angenommen. Dadurch entstehen horizontale Zugdehnungen an der Unterseite der Asphaltbinderschicht (Abbildung 6-8). Das Maximum dieser Dehnungen tritt in der Lastachse auf. Die kryogenen Dehnungen werden bei dieser Betrachtung in Analogie zu den RDO Asphalt [RDO 09] bei jedem 2. Lastwechsel im Oberflächentemperaturbereich  $T \leq 5^\circ\text{C}$  auf die zur Nachweisführung angesetzten Dehnungen aus der Belastung addiert.

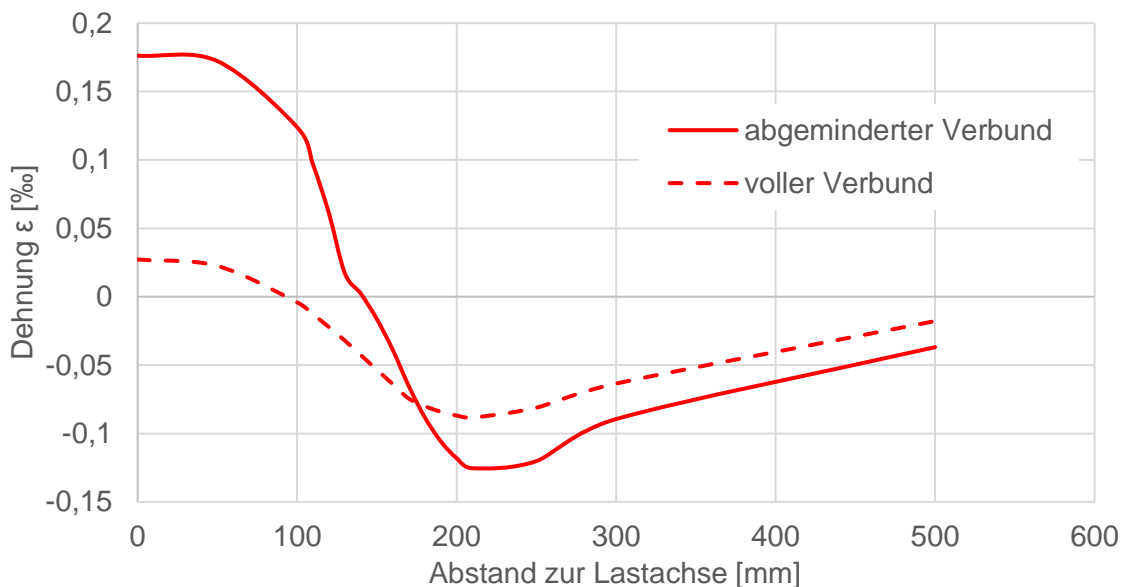


Abb. 6.8: Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltbinderschicht bei starren Verbund und abgeminderten Verbund

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen wurden wegen noch nicht erfolgter Kalibrierung des Verfahrens als Relativwerte angegeben. Es erfolgte die Festlegung des Ergebnisses des nachfolgenden Befestigungsaufbaus als Referenzwert (Ermüdungsstatus 100 %):

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 6,79 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,00 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, 4,39 M-% Bindemittelgehalt (50/70).

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltbinderschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen sind in Tabelle 6-4 und Abbildung 6-9 zusammengefasst.

| Variante             | Ermüdungsstatus |
|----------------------|-----------------|
| AC 16 B S SG-4,75M-% | 255,80 %        |
| AC 16 B S SG-5,00M-% | 100,00 %        |
| AC 16 B S SG-5,68M-% | 69,19 %         |
| AC 16 B S SG-5,98M-% | 30,98 %         |
| AC 16 B S SG-6,55M-% | 34,10 %         |
| SMA 16 B S- 5,17M-%  | 32,78 %         |
| SMA 16 B S- 5,47M-%  | 33,71 %         |
| SMA 16 B S- 6,03M-%  | 28,84 %         |
| BA-5,28M-%           | 83,36 %         |

Tab. 6-4: Ergebnisse der Prognoserechnungen der Asphaltbinderschichtgemische

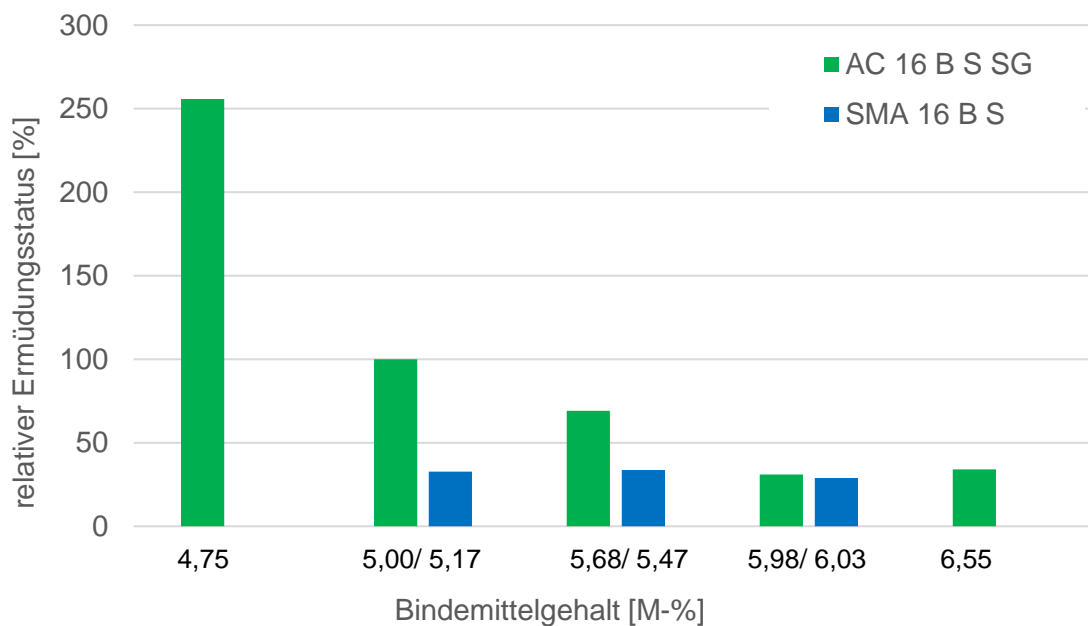


Abb. 6-9: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschichtgemische nach 30 Jahren

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen zeigen, dass die Variante SMA 16 B S bei gleichem Bindemittelgehalt einen geringeren Ermüdungsstatus aufweist als die Variante AC 16 B S SG. Die feine Korngrößenverteilung erzeugt den geringsten Ermüdungsstatus bei einem Bindemittelgehalt von 5,98 M-%. Bei der weiteren Zugabe an Bitumen verschlechtert sich geringfügig das Ermüdungsverhalten wieder. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes keine Veränderung des Ermüdungsstatus bei den Varianten des SMA 16 B S. Im untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes ergibt sich das bessere Ermüdungsverhalten bei den Varianten der gröberen Korngrößenverteilung (SMA 16 B S). Die Verwendung des weicheren Bitumen PmB 25/55-55A bei der feinen Korngrößenverteilung des stetig gestuften Asphaltbetons bewirkt ein verbessertes Ermüdungsverhalten.

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen den Einfluss der Eigenschaften der Asphaltdeckschichten auf den Ermüdungsstatus des Nachweispunktes an der Unterseite der Asphaltbinderschicht. Dazu wurde als Binderschichtgemisch die Variante AC 16 B S SG-5,00M-% für die Berechnungen festgelegt und lediglich die Eigenschaften (Hauptkurve, Ermüdungsfunktion und der Verlauf der kryogenen Zugspannungen) der Asphaltdeckschicht variiert.

| Variante              | Ermüdungsstatus |
|-----------------------|-----------------|
| SMA 11 S-fKGV-6,03M-% | 101,66 %        |
| SMA 11 S-fKGV-6,50M-% | 99,41 %         |
| SMA 11 S-fKGV-6,79M-% | 100 %           |
| SMA 11 S-fKGV-7,52M-% | 98,95 %         |
| SMA 11 S-fKGV-8,02M-% | 97,54 %         |
| SMA 11 S-gKGV-5,61M-% | 97,06 %         |
| SMA 11 S-gKGV-6,42M-% | 95,54 %         |
| SMA 11 S-gKGV-6,71M-% | 95,47 %         |
| SMA 11 S-gKGV-7,76M-% | 95,84 %         |
| DA-fKGV-7,01M-%       | 100,44 %        |

Tab. 6-5: Einfluss der Eigenschaften der Asphaltdeckschicht auf den Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht

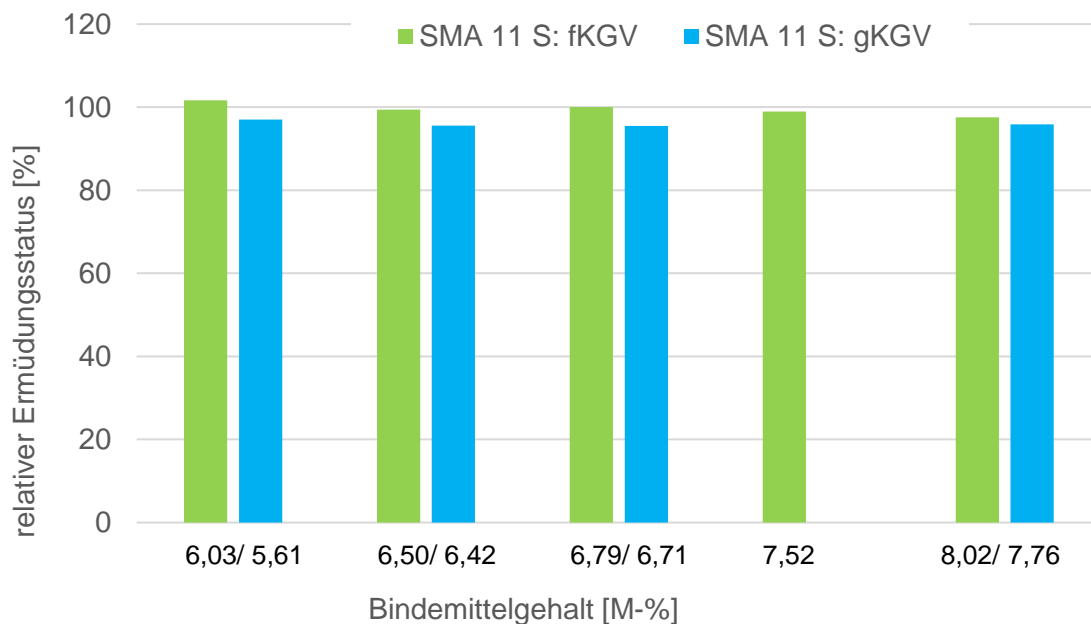


Abb. 6-10: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht unter Variation der Deckschichtgemische

Der relative Ermüdungsstatus für den Nachweispunkt an der Unterseite der Asphaltbinderschicht bleibt unter Variation der Deckschichtgemische nahezu konstant. Damit ist das Ermüdungsverhalten der Asphaltbinderschicht unter der Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen unabhängig von den Eigenschaften des darüber liegenden Deckschichtgemisches.

### 6.1.3 Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen in der Asphaltdeckschicht

In der Asphaltdeckschicht entstehen neben der Radaufstandsfläche vertikale Zugdehnungen, die Risse verursachen können. Die größten Zugdehnungen treten dabei 165 mm neben der Lastachse an der Oberseite der Asphaltdeckschicht auf. In Abbildung 6-11 ist der Verlauf der vertikalen Dehnungen im Straßenquerschnitt dargestellt. Die kryogenen Zugspannungen werden bei diesem Nachweis nicht mit betrachtet, da diese in horizontaler Richtung entstehen und der Einfluss auf die vertikalen Zugdehnungen nicht ausreichend bekannt ist.

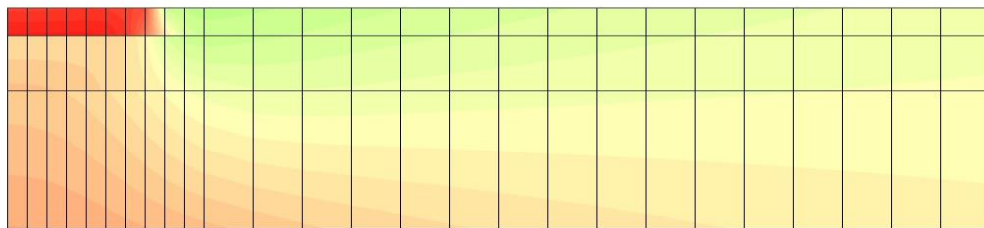


Abb. 6-11: Verlauf der vertikalen Dehnungen im Straßenquerschnitt

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen wurden wegen noch nicht erfolgter Kalibrierung des Verfahrens als Relativwerte angegeben. Es erfolgte die Festlegung des Ergebnisses des nachfolgenden Befestigungsaufbaus als Referenzwert (Ermüdungsstatus 100 %):

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 6,79 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,00 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, 4,39 M-% Bindemittelgehalt (50/70).

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltdeckschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen sind in Tabelle 6-6 und Abbildung 6-12 zusammengefasst.

| Variante              | Ermüdungsstatus |
|-----------------------|-----------------|
| SMA 11 S-fKGV-6,03M-% | 274,30 %        |
| SMA 11 S-fKGV-6,50M-% | 72,42 %         |
| SMA 11 S-fKGV-6,79M-% | 100,00 %        |
| SMA 11 S-fKGV-7,52M-% | 104,55 %        |
| SMA 11 S-fKGV-8,02M-% | 219,27 %        |
| SMA 11 S-gKGV-5,61M-% | 833,41 %        |
| SMA 11 S-gKGV-6,42M-% | 286,90 %        |
| SMA 11 S-gKGV-6,71M-% | 160,82 %        |
| SMA 11 S-gKGV-7,76M-% | 130,42 %        |
| DA-fKGV-7,01M-%       | 61,06 %         |

Tab. 6-6: Ergebnisse der Prognoserechnung der Asphaltdeckschichtgemische

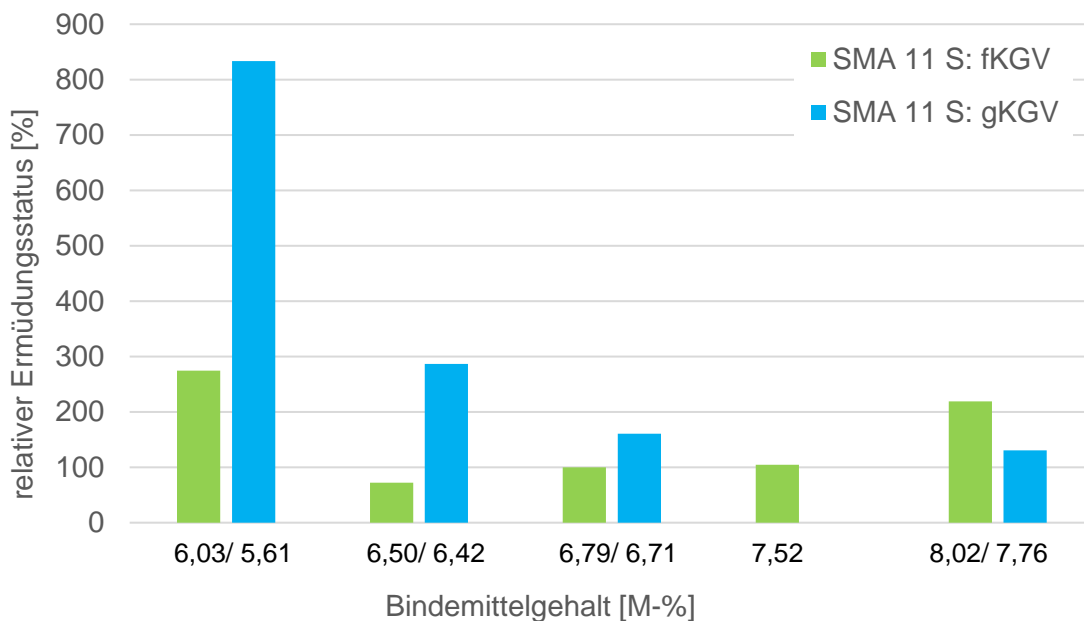


Abb. 6-12: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren

Aus den Ergebnissen der Prognoserechnungen ist ersichtlich, dass die feine Korngrößenverteilung bei gleichem Bindemittelgehalt (mit Ausnahme von 8,0 M-%) des SMA 11 S einen deutlich geringeren Ermüdungsstatus aufweist als die grobe Sieblinie. Die feine Korngrößenverteilung besitzt den geringsten Ermüdungsstatus bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Bei weiterer Erhöhung des Bindemittelgehaltes verschlechtert sich das Ermüdungsverhalten der Deckschicht allmählich. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes über den gesamten untersuchten Bereich eine Verringerung (also Verbesserung) des Ermüdungsstatus bei den Deckschichtvarianten mit der groben Korngrößenverteilung. Die Verwendung des steiferen Bitumen PmB 10/40-65A bei der feinen Korngrößenverteilung bewirkt ein besseres Ermüdungsverhalten.

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen den Einfluss der Eigenschaften der Asphaltbinderschichten auf den Ermüdungsstatus des Nachweispunktes an der Oberseite der Asphaltdeckschicht. Dazu wurde als Deckschichtgemisch die Variante SMA 11 S-fKGV-6,79M-% für die Berechnungen festgelegt und lediglich die Eigenschaften (Hauptkurve, Ermüdungsfunktion und der Verlauf der kryogenen Zugspannungen) der Asphaltbinderschicht variiert.

| Variante             | Ermüdungsstatus |
|----------------------|-----------------|
| AC 16 B S SG-4,75M-% | 98,56 %         |
| AC 16 B S SG-5,00M-% | 100,00%         |
| AC 16 B S SG-5,68M-% | 102,74 %        |
| AC 16 B S SG-5,98M-% | 113,3 %         |
| AC 16 B S SG-6,55M-% | 114,19 %        |
| SMA 16 B S- 5,17M-%  | 107,39 %        |
| SMA 16 B S- 5,47M-%  | 111,58 %        |
| SMA 16 B S- 6,03M-%  | 113,47 %        |
| BA-5,28M-%           | 108,92 %        |

Tab. 6-7: Einfluss der Eigenschaften der Asphaltbinderschicht auf den Ermüdungsstatus

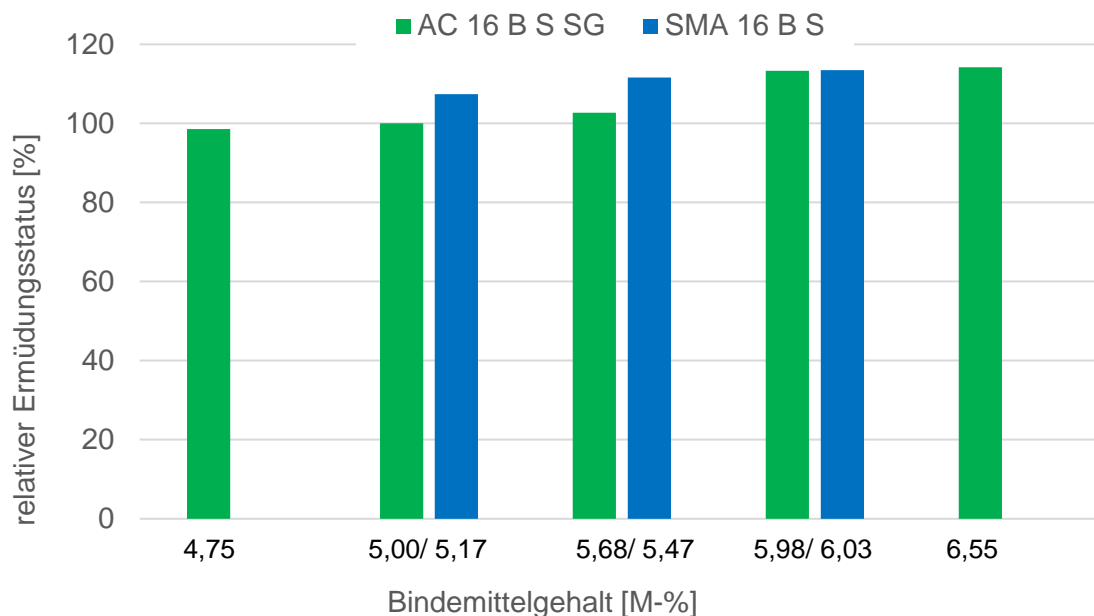


Abb. 6-13: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht unter Variation der Binderschichtgemische

Der relative Ermüdungsstatus für den Nachweispunkt an der Oberseite der Asphaltdeckschicht steigt mit zunehmenden Bindemittelgehalt der Binderschichtgemische an. Dies betrifft beide Korngrößenverteilungen der Binderschichtvarianten. Die Verwendung der feineren Sieblinie des stetig gestuften Asphaltbetons bewirkt ein besseres Ermüdungsverhalten der Deckschicht als die gröbere Sieblinie des SMA 16 B S. Der Einfluss auf die Änderung des Ermüdungsstatus unter Variation der Binderschichtgemische ist dagegen deutlich geringer als bei der Variation der Eigenschaften der Deckschichtgemische.

#### 6.1.4 Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen in der Asphaltbinderschicht

Aus Abbildung 6-11 ist ersichtlich, dass ebenfalls in der Asphaltbinderschicht neben der Radaufstandsfläche vertikale Zugdehnungen entstehen, die Risse verursachen können. Die größten Zugdehnungen treten dabei 205 mm neben der Lastachse an der Oberseite der Asphaltbinderschicht auf. Die kryogenen Zugspannungen werden bei diesem Nachweis nicht mit betrachtet, da diese in horizontaler Richtung entstehen und der Einfluss auf die vertikalen Zugdehnungen nicht ausreichend bekannt ist.

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen wurden wegen noch nicht erfolgter Kalibrierung des Verfahrens als Relativwerte angegeben. Es erfolgte die Festlegung des Ergebnisses des nachfolgenden Befestigungsaufbaus als Referenzwert (Ermüdungsstatus 100 %):

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 6,79 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,00 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, 4,39 M-% Bindemittelgehalt (50/70).

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltbinderschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen sind in Tabelle 6-8 und Abbildung 6-14 zusammengefasst.

| Variante             | Ermüdungsstatus |
|----------------------|-----------------|
| AC 16 B S SG-4,75M-% | 273,18 %        |
| AC 16 B S SG-5,00M-% | 100,00 %        |
| AC 16 B S SG-5,68M-% | 435,98 %        |
| AC 16 B S SG-5,98M-% | 210,69 %        |
| AC 16 B S SG-6,55M-% | 141,51 %        |
| SMA 16 B S- 5,17M-%  | 181,94 %        |
| SMA 16 B S- 5,47M-%  | 228,04 %        |
| SMA 16 B S- 6,03M-%  | 297,96 %        |
| BA-5,28M-%           | 181,52 %        |

Tab. 6-8: Ergebnisse der Prognoserechnungen der Asphaltbinderschichtgemische

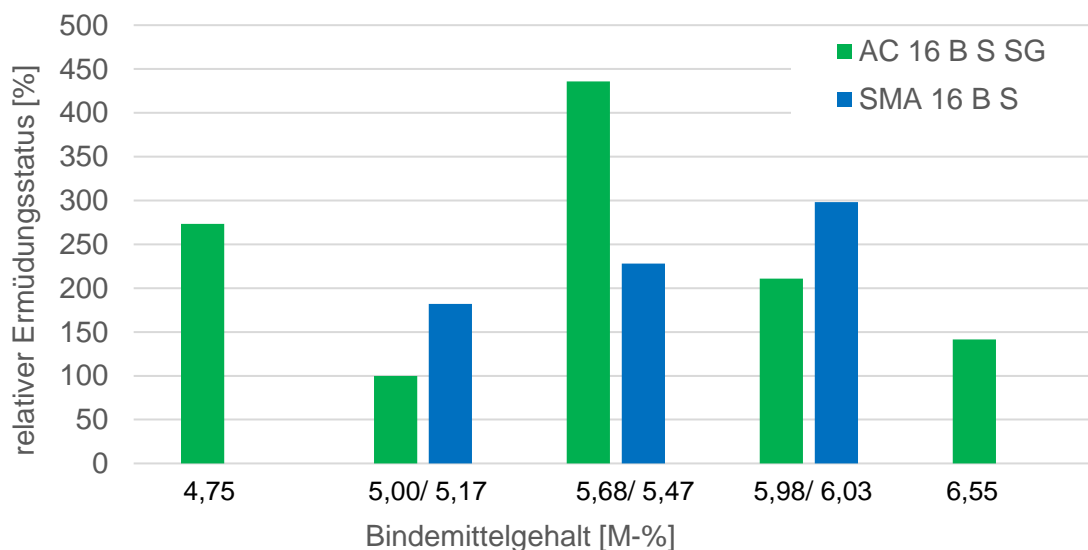


Abb. 6-14: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschichtgemische nach 30 Jahren

Aus den Ergebnissen der Prognoserechnungen ist ersichtlich, dass die feine Korngrößenverteilung den geringsten Ermüdungsstaus bei einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% besitzt. Bei weiterer Erhöhung des Bindemittelgehaltes verschlechtert sich das Ermüdungsverhalten der Binderschicht allmählich. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes über den gesamten untersuchten Bereich eine Verschlechterung des Ermüdungsstatus bei den Binderschichtvarianten des SMA 16 B S. Die Verwendung des weicheren Bitumen PmB 25/55-55A des stetig gestuften Asphaltbetons bewirkt ein schlechteres Ermüdungsverhalten. Der Ermüdungsstatus nach 30 Jahren Nutzungsdauer ist bei diesem Nachweispunkt sehr gering, sodass schon kleine Änderung des Ermüdungsstatus im Vergleich der Varianten große Änderungen des relativen Ermüdungsstatus bewirken!

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen den Einfluss der Eigenschaften der Asphaltdeckschichten auf den Ermüdungsstaus des Nachweispunktes an der Oberseite der Asphaltbinderschicht. Dazu wurde als Binderschichtgemisch die Variante AC 16 B S SG-5,00M-% für die Berechnungen festgelegt und lediglich die Eigenschaften (Hauptkurve, Ermüdungsfunktion und Verlauf der kryogenen Zug-spannungen) der Asphaltdeckschicht variiert.

| Variante              | Ermüdungsstatus |
|-----------------------|-----------------|
| SMA 11 S-fKGV-6,03M-% | 82,23 %         |
| SMA 11 S-fKGV-6,50M-% | 80,32 %         |
| SMA 11 S-fKGV-6,79M-% | 100,00 %        |
| SMA 11 S-fKGV-7,52M-% | 121,70 %        |
| SMA 11 S-fKGV-8,02M-% | 132,52 %        |
| SMA 11 S-gKGV-5,61M-% | 105,72 %        |
| SMA 11 S-gKGV-6,42M-% | 114,80 %        |
| SMA 11 S-gKGV-6,71M-% | 118,32 %        |
| SMA 11 S-gKGV-7,76M-% | 122,66 %        |
| DA-fKGV-7,01M-%       | 96,39 %         |

Tab. 6-9: Einfluss der Eigenschaften der Asphaltdeckschicht auf den Ermüdungsstatus

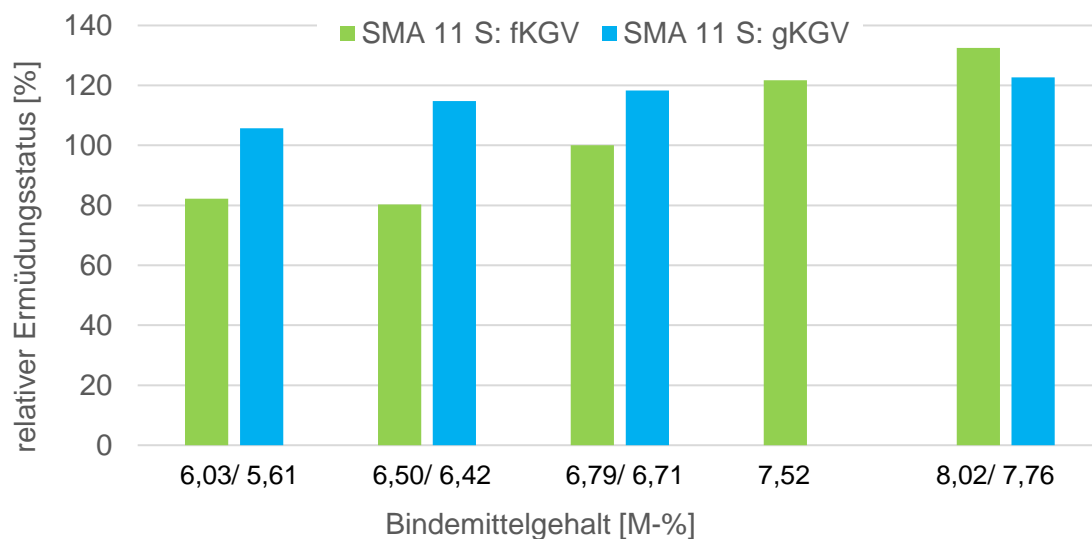


Abb. 6-15: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht unter Variation der Deckschichtgemische



Der relative Ermüdungsstatus für den Nachweispunkt an der Oberseite der Asphaltbinderschicht wird durch die Eigenschaft des darüber liegenden Deckschichtgemischs beeinflusst. Die Kombination der Binderschicht AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 5,00 M-% und das Deckschichtgemisch SMA 11 S mit einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-% (feine Korngrößenverteilung) besitzt den geringsten relativen Ermüdungsstatus. Bei weiterer Erhöhung des Bindemittelgehaltes verschlechtert sich das Ermüdungsverhalten der Binderschicht. Die feine Korngrößenverteilung bei gleichem Bindemittelgehalt (mit Ausnahme von 8,0 M-%) des SMA 11 S bewirkt einen geringeren Ermüdungsstatus an der Oberseite der Binderschicht als die grobe Sieblinie. Nochmals erwähnt werden soll, dass der Ermüdungsstatus nach 30 Jahren Nutzungsdauer bei diesem Nachweispunkt sehr gering ist, sodass schon kleine Änderung des Ermüdungsstatus im Vergleich der Varianten große Änderungen des relativen Ermüdungsstatus bewirken!

#### 6.1.5 Maßgebende Nachweispunkte

Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltdeckschicht ist die Oberseite der Deckschicht unter Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen. Die größten Zugdehnungen treten dabei 165 mm neben der Lastachse auf. Die Prognose-rechnungen zeigten, dass das Ermüdungsverhalten der Asphaltdeckschicht unter der Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen mit Zunahme des Bindemittelgehaltes der darunter liegenden Binderschicht sich verschlechtert. Die Verwendung der feineren Sieblinie des AC 16 B S SG wirkt sich auf den Ermüdungsstatus positiv aus.

Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltbinderschicht ist die Unterseite der Binderschicht unter Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen und unter der Annahme des abgeminderten Schichtenverbundes zwischen den Asphalt-schichten. Die größten Zugdehnungen treten dabei in der Lastachse auf. Die Prognose-rechnungen zeigten, dass das Ermüdungsverhalten der Asphaltbinderschicht unter der Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen unabhängig von den Eigenschaften des darüber liegenden Deckschichtgemisches ist.

## 6.2 Prognoserechnungen der Spurrinnenbildung

### 6.2.1 Ermittlung der Impulskriechkurven

Für die Einschätzung des plastischen Verformungsverhaltens der Asphaltgemische wurden zunächst die Impulskriechkurven nach den Gleichungen 40 bis 42 ermittelt [Dragon 2015b]. Dazu wurden die Ergebnisse aus den Druck-Schwellversuchen am schlanken und am gedrunenen Probekörper ausgewertet.

$$\varepsilon_{plast} = A * \log(N + 1)^B \quad \text{Gleichung 40}$$

$$A = a_1 * |\varepsilon_{elast}|^{a_2} \quad \text{Gleichung 41}$$

$$B = b_1 * \ln|\varepsilon_{elast}| + b_2 \quad \text{Gleichung 42}$$

mit:

$\varepsilon_{plast}$  bleibende axiale Dehnungen [‰]

$\varepsilon_{elast}$  elastische axiale Anfangsdehnungen beim 100. Lastwechsel [‰]

A; B Materialparameter [-]

$a_1, a_2$  Regressionsparameter [-]

$b_1, b_2$  Regressionsparameter [-]

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse des plastischen Verformungsverhaltens wurde allerdings festgestellt, dass dieser Ansatz nur unzureichende Ergebnisse bei der Approximation der Materialparameter lieferte. Die Abbildung 6-16 stellt beispielhaft die Messwerte und die nach Gleichung 28 erhaltene Regression des Materialparameters A in Abhängigkeit der elastischen Anfangsdehnung für eine Variante des stetig gestuften Asphaltbetons dar. Die hohe Streuung der Messwerte und die sich daraus ergebenden größeren Abweichungen gegenüber der Regressionsfunktion sind eindeutig erkennbar.

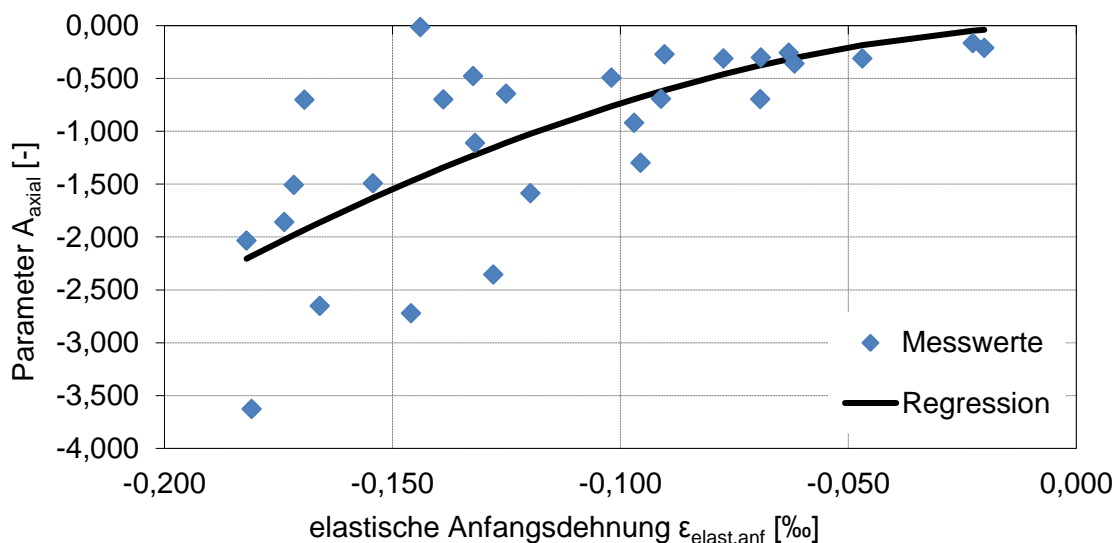


Abb. 6-16: Abhängigkeit des Materialparameters A von den elastischen Anfangsdehnungen AC 16 B S SG (DSV am schlanken Probekörper)

Aufgrund dieser hohen Streuung der Messwerte wurden als ersten Schritt die Ergebnisse der einzelnen Probekörper der Varianten genauer betrachtet. Dadurch konnte festgestellt werden, dass die Materialparameter nicht nur abhängig von den elastischen Anfangsdehnungen sind, sondern ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit aufweisen (Abbildung 6-17). Insbesondere der Materialparameter A weist diese Temperaturabhängigkeit auf. Ein funktionaler Zusammenhang des Parameter B zur elastischen Anfangsdehnung und zur Temperatur konnte nicht bestätigt werden. Die berechneten Werte des Parameters B liegen sehr dicht beieinander und bleiben relativ konstant mit Zunahme der elastischen Anfangsdehnung. Dies ist in Abbildung 6-18 dargestellt.

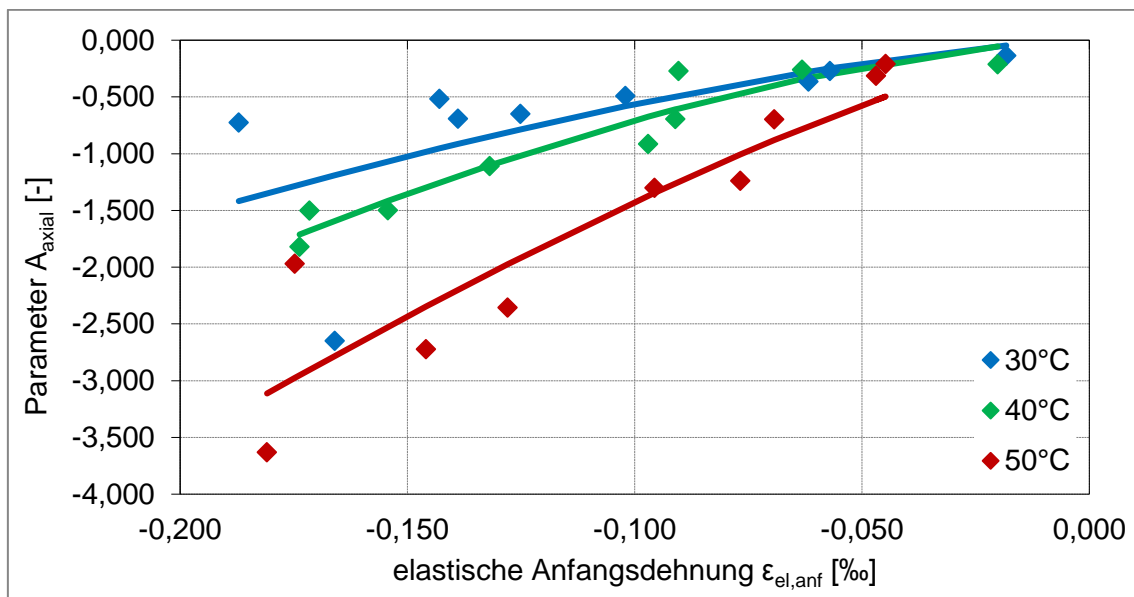


Abb. 6-17: Darstellung des Materialparameters A in Abhängigkeit zur elastischen Dehnung getrennt für die verschiedenen Prüftemperaturen

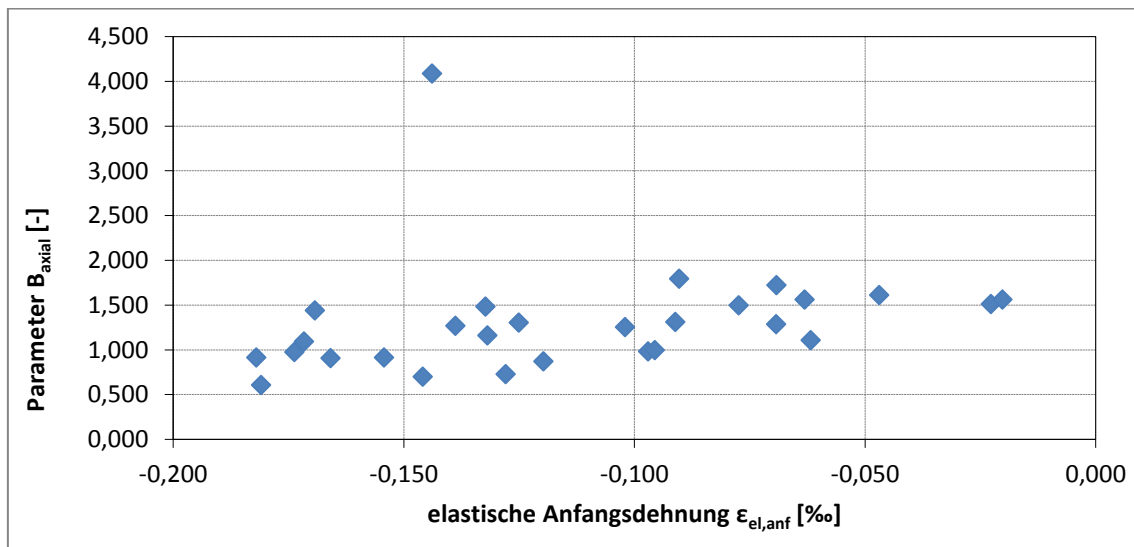


Abb. 6-18: Darstellung des Materialparameters B in Abhängigkeit zur elastischen Dehnung

Anschließend wurde überprüft, ob die Größe der plastischen Dehnungen von der elastischen Anfangsdehnung dargestellt werden kann. Eine Verbindung zu den benötigten Lastwechselzahlen konnte nicht gefunden werden, sodass entschieden wurde den Ansatz nach [Dargon 2015b] mit der Temperaturabhängigkeit zu erweitern. Die Untersuchungen zeigten dann, dass eine Abhängigkeit zwischen den plastischen und elastischen Dehnungen existiert. Es konnte festgestellt werden, dass zum einen die Korrelation der elastischen und plastischen Dehnungen am Versuchsende (29.970. Lastwechsel) am größten war und nicht wie zuvor am Versuchsanfang (100. Lastwechsel). Des Weiteren konnte auch zwischen den elastischen und plastischen Dehnungen eine Temperaturabhängigkeit festgestellt werden. Die Abhängigkeit der plastischen Dehnung von der elastischen Dehnung ist in Abbildung 6-19 dargestellt und kann über den funktionalen Zusammenhang nach Gleichung 43 beschrieben werden.

$$\varepsilon_{plast} = a * T * \ln(b * \varepsilon_{elast} + 1) + c * \varepsilon_{elast} \quad \text{Gleichung 43}$$

mit:

$\varepsilon_{plast}$  bleibende axiale Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel [‰]

$\varepsilon_{elast}$  elastische axiale Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel [‰]

T Prüftemperatur [°C]

a, b, c Regressionsparameter [-]

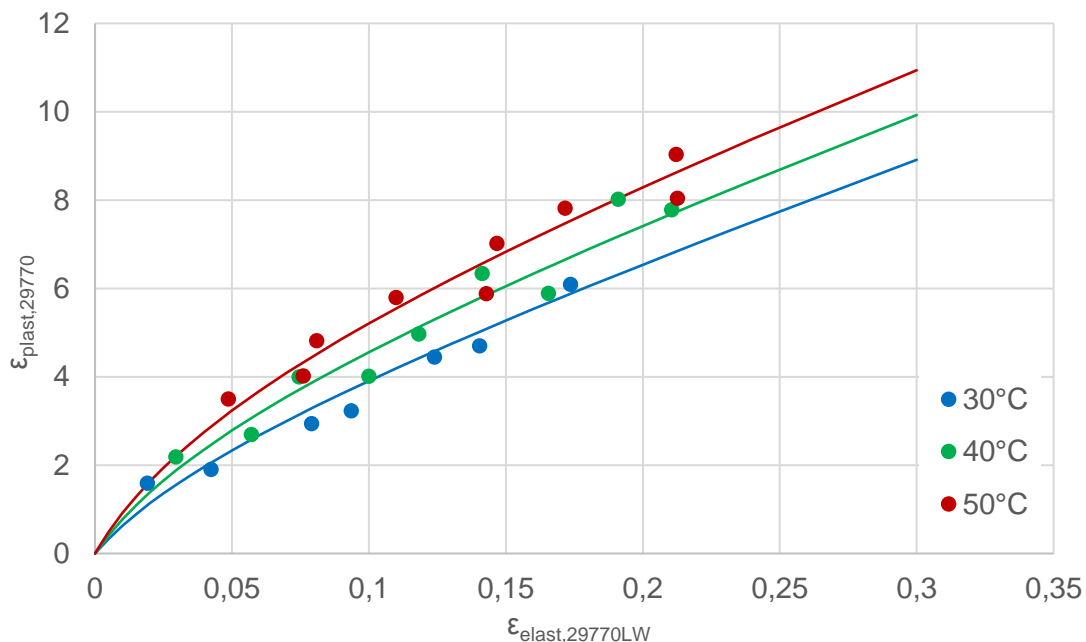


Abb. 6-19: Abhängigkeit der axialen plastischen Dehnungen von den axialen elastischen Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel (DSV am schlanken Probekörper)

Auf dieser Grundlage wurde der Ansatz von [Dragon 2015b] mit der Temperaturabhängigkeit der Materialparameter erweitert. Die Impulskriechkurve wird weiterhin durch die Gleichung 40 bestimmt. Die Materialparameter werden dagegen über die

Gleichung 44 bzw. 45 ermittelt. Die Bestimmung der Materialparameter und die Berechnung der Impulskriechkurven für die einzelnen Versuche je Variante der Asphaltgemische werden innerhalb eines Berechnungsprozess iterativ bestimmt.

$$A = a_1 * (T - T_0) * |\varepsilon_{elast}|^{a_2} \quad \text{Gleichung 44}$$

$$B = b \quad \text{Gleichung 45}$$

mit:

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\varepsilon_{elast}$ | elastische axialen Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel [%] |
| T                     | Prüftemperatur [°C]                                       |
| $T_0$                 | Referenztemperatur, bestimmt durch Regression [°C]        |
| A, B                  | Materialparameter [-]                                     |
| $a_1, a_2, b$         | Regressionsparameter [-]                                  |

### 6.2.2 Verfahrensweise der Spurrinnenprognose

Die detaillierte Beschreibung zur Verfahrensweise ist in [Dragon 2015b; Kayser 2011] beschrieben. Bei diesem Verfahren wird für die Spurrinnenprognose die Akkumulation der bleibenden Dehnungen durch zufallsbedingte Beanspruchungszustände vorgenommen. Dabei wird der Beanspruchungszustand anhand der berechneten elastischen Dehnung definiert. Somit kann durch die Impulskriechkurve, die mit Hilfe der elastischen Dehnung aufgestellt wird, der Zusammenhang zwischen dem Beanspruchungszustand und den plastischen Dehnungen geschaffen werden. Jeder Beanspruchungszustand ist weiterhin durch eine bestimmte Kombination aus den Belastungsgrößen Temperatur und Verkehrslast bestimmt. Anhand der Eintrittswahrscheinlichkeit der Belastungsgrößen kann somit jedem Belastungszustand eine beliebige Lastwechselzahl zugeordnet werden. Dabei werden die Kombination der Belastungsgrößen (Temperatur, Verkehrslast), sowie die Reihenfolge in der die Belastungszustände auftreten, zufällig generiert. Dieses Prinzip ist in Abbildung 6-20 anschaulich dargestellt. Damit saisonale Veränderungen der Temperaturverläufe berücksichtigt werden können, werden Ordnungskriterien bei der zufälligen Kombination der Belastungsgrößen und der Reihenfolge der Belastungszustände eingeführt.

Infolge der Beanspruchungszustände können in jedem Punkt des Fahrbahnoberbaus Zug- bzw. Druckdehnungen entstehen, die in den Berechnungen ebenfalls mit berücksichtigt werden. Das Verfahren bietet die Möglichkeit die Zug- und Druckdehnungen unabhängig voneinander zu betrachten und somit auch unabhängige Materialparameter für beide Zustände zu ermitteln. Nach der Berechnung aller Beanspruchungszustände ermitteln sich die gesamten bleibenden Verformungen der Straßenkonstruktion durch Multiplikation der berechneten Verformung je Schicht mit der jeweiligen Schichtdicken und summiert diese über alle Schichten auf.

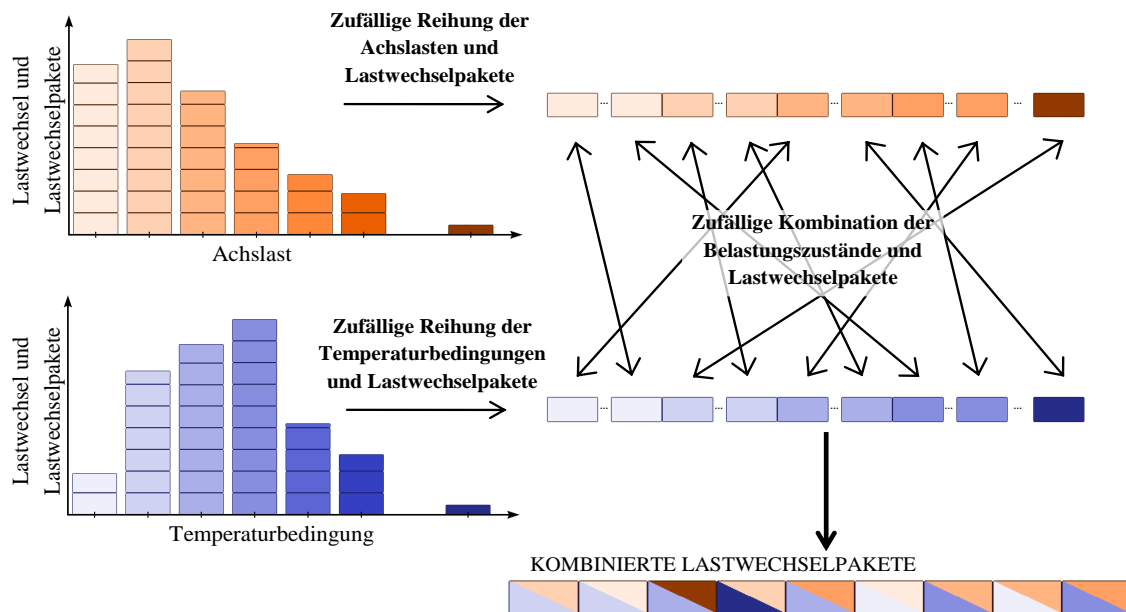


Abb. 6-20: Schematische Darstellung der zufälligen Reihung der Belastungszustände sowie der Zufallskombination der Belastungsgrößen [Kayser 2011]

Das Verfahren der Spurrinnenprognose wurde bisher weder validiert noch kalibriert, sodass nur vergleichende Untersuchungen an fiktiven Asphaltbefestigungen möglich sind. Des Weiteren wurde in diesem Forschungsprojekt das Zugverhalten der Asphaltgemische nicht versuchstechnisch ermittelt. Damit werden die Materialparameter, die mit Hilfe der Druck-Schwellversuche bestimmt wurden, für die Zug- und Druckphasen gleichermaßen verwendet.

### 6.2.3 Parameter der Spurrinnenprognose

Die Parameter der Spurrinnenprognose wurden analog zu den Parameter der Prognoserechnungen der Ermüdungsrissbildung gewählt und lauten:

- geplante Nutzungsdauer zur Festlegung der Verkehrsbelastung 30 Jahre,
- Achslastkollektiv BAB Fernverkehr [AP Klima und Verkehr],
- normierte charakteristische Temperaturprofile, Temperaturkartenzone 5 [AP Klima und Verkehr],
- B-Zahl: 257,9 Mio., Belastungsklasse BK 100,
- Minstdicke des frostsicheren Oberbaus (BK 100) 70 cm.

Der Befestigungsaufbau wurde analog zur Prognoserechnung der Ermüdungsrissbildung nach den RStO 12 Tabelle/Zeile 1 ausgewählt:

- 4 cm Asphaltdeckschicht
- 8 cm Asphaltbinderschicht
- 22 cm Asphalttragschicht
- 36 cm Frostschuttschicht.

#### 6.2.4 Ergebnisse der Prognoserechnungen unter Variation der Deckschichtgemische

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen wurden wegen noch nicht erfolgter Validierung des Verfahrens als Relativwerte angegeben. Es erfolgte die Festlegung des Ergebnisses des nachfolgenden Befestigungsaufbaus als Referenzwert (Ermüdungsstatus 100 %):

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 6,79 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,00 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, 4,39 M-% Bindemittelgehalt (50/70).

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltdeckschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen, die anhand der Versuchsergebnisse mit dem Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper durchgeführt wurden, sind in Tabelle 6-10 und Abbildung 6-21 zusammengefasst.

| Variante              | Relative Spurrinnentiefe |
|-----------------------|--------------------------|
| SMA 11 S-fKGV-6,03M-% | 73,63 %                  |
| SMA 11 S-fKGV-6,50M-% | 74,13 %                  |
| SMA 11 S-fKGV-6,79M-% | 100,00 %                 |
| SMA 11 S-fKGV-7,52M-% | 428,61 %                 |
| SMA 11 S-gKGV-5,61M-% | 101,99 %                 |
| SMA 11 S-gKGV-6,42M-% | 71,64 %                  |
| SMA 11 S-gKGV-6,71M-% | 55,22 %                  |
| SMA 11 S-gKGV-7,76M-% | 53,23 %                  |
| DA-fKGV-7,01M-%       | 263,43 %                 |

Tab. 6-10: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

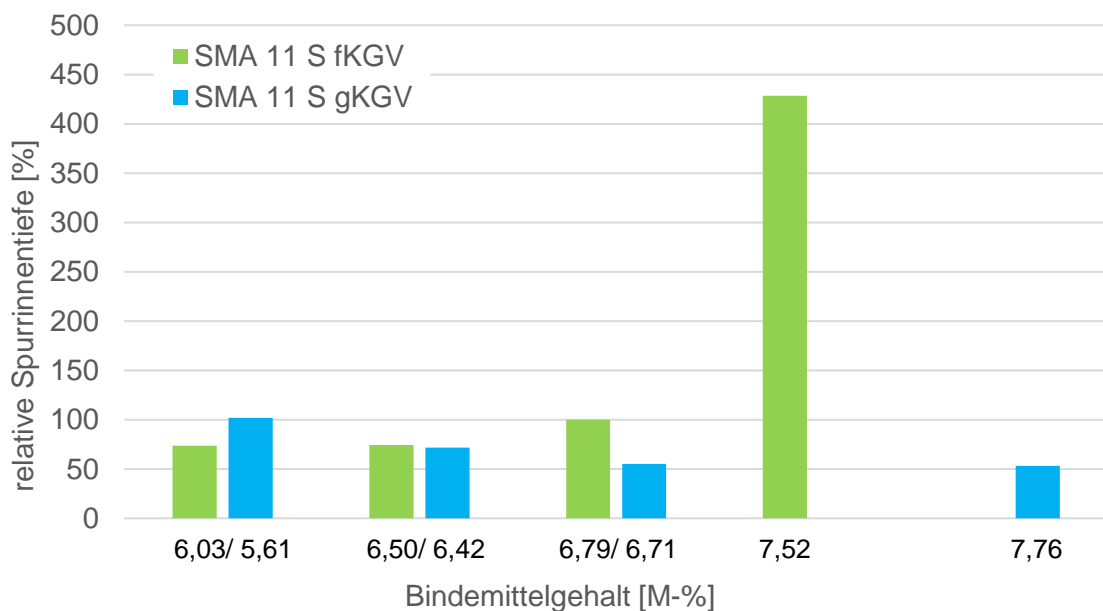


Abb. 6-21: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

Die Ergebnisse der Spurrinnenprognose belegen, dass die grobe Korngrößenverteilung im untersuchten Bindemittelbereich ein besseres Verformungsverhalten (Ausnahme bei einem Bindemittelgehalt von 5,61 M-%) aufweisen als die feine Korngrößenverteilung. Mit zunehmenden Bindemittelgehalt verbessert sich die Verformungsbeständigkeit der groben Korngrößenverteilung. Dagegen bewirkt die Zunahme des Bindemittelgehaltes bei der feinen Korngrößenverteilung eine Verschlechterung des Verformungsverhaltens. Zunächst steigt die Spurrinnentiefe zwischen den Varianten des SMA 11 S nur allmählich an. Ab dem Bindemittelgehalt von 7,52 M-% kommt es zu einer deutlichen Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Aufgrund der geringen Anzahl an auszuwertenden Versuchsergebnissen und der damit verbundenen hohen Unsicherheit bei der Bestimmung der Materialparameter für die Variante des SMA 11 S, der feinen Korngrößenverteilung, mit einem Bindemittelgehalt von 8,02 M-% wird auf eine Darstellung des Ergebnis der Prognoserechnung verzichtet. Die Verwendung des steiferen Bitumens PmB 10/40-65A hat zur Folge, dass sich das Verformungsverhalten scheinbar verschlechtert. Dieser Umstand kann eher durch den höheren Bindemittelgehalt von 0,22 M-% erklärt werden.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Prognoserechnungen, die anhand der Versuchsergebnisse mit dem Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper durchgeführt wurden, dargestellt.

| Variante              | Relative Spurrinnentiefe |
|-----------------------|--------------------------|
| SMA 11 S-fKGV-6,03M-% | 103,28 %                 |
| SMA 11 S-fKGV-6,50M-% | 71,11 %                  |
| SMA 11 S-fKGV-6,79M-% | 100,00 %                 |
| SMA 11 S-fKGV-7,52M-% | 585,86 %                 |
| SMA 11 S-gKGV-5,61M-% | 58,81 %                  |
| SMA 11 S-gKGV-6,42M-% | 42,62 %                  |
| SMA 11 S-gKGV-6,71M-% | 27,46 %                  |
| SMA 11 S-gKGV-7,76M-% | 31,97 %                  |
| DA-fKGV-7,01M-%       | 172,13 %                 |

Tab. 6-11: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper



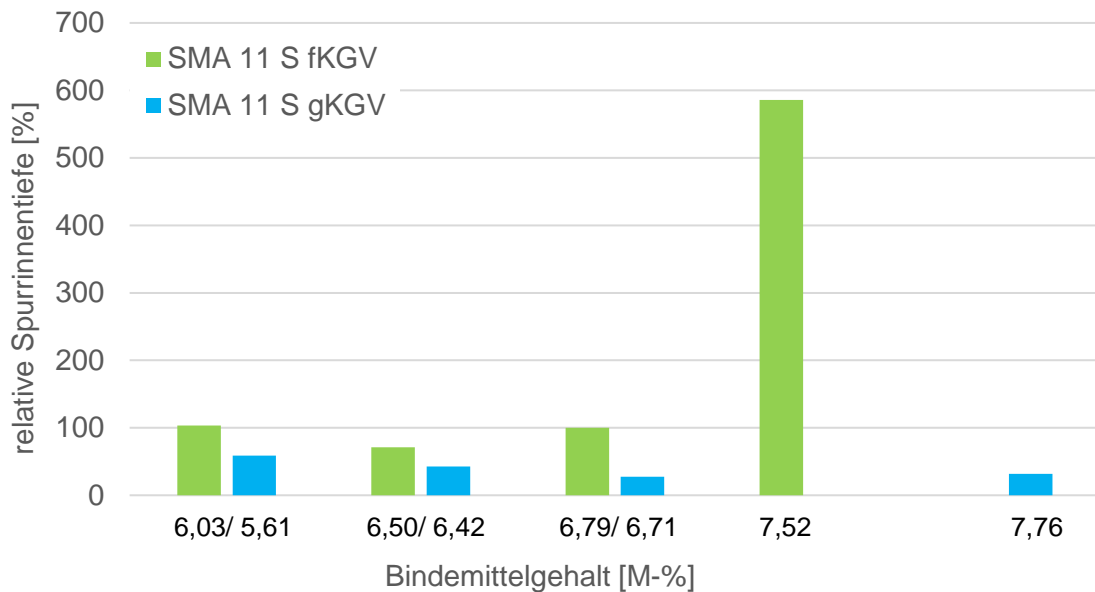


Abb. 6-22: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper

Die Ergebnisse der Spurrinnenprognose belegen, dass die grobe Korngrößenverteilung im untersuchten Bindemittelbereich ein besseres Verformungsverhalten aufweist als die feine Korngrößenverteilung. Mit zunehmenden Bindemittelgehalt verbessert sich die Verformungsbeständigkeit der groben Korngrößenverteilung bis zu einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-%. Die feine Korngrößenverteilung besitzt die geringste relative Spurrinne bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Bei einer weiteren Zugabe an Bindemittel steigt die Spurrinnentiefe zunächst nur allmählich an. Ab dem Bindemittelgehalt von 7,52 M-% kommt es zu einer deutlichen Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit. Aufgrund der geringen Anzahl an auszuwertenden Versuchsergebnissen und der damit verbundenen hohen Unsicherheit bei der Bestimmung der Materialparameter für die Variante des SMA 11 S, der feinen Korngrößenverteilung, mit einem Bindemittelgehalt von 8,02 M-% wird auf eine Darstellung des Ergebnis der Prognoserechnung verzichtet. Die Verwendung des steiferen Bitumens PmB 10/40-65A hat zur Folge, dass sich das Verformungsverhalten scheinbar verschlechtert. Dieser Umstand kann eher durch den höheren Bindemittelgehalt von 0,22 M-% erklärt werden. Damit liefern die Prognoserechnungen, die anhand der DSV am schlanken und gedrunenen Probekörper durchgeführt wurden, ähnliche Tendenzen.

#### 6.2.5 Ergebnisse der Spurrinnenprognose unter Variation der Binderschichtgemische

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen wurden wegen noch nicht erfolgter Validierung des Verfahrens als Relativwerte angegeben. Es erfolgte die Festlegung des Ergebnisses des nachfolgenden Befestigungsaufbaus als Referenzwert (Ermüdungsstatus 100 %):

- SMA 11 S, feine Korngrößenverteilung, 6,79 M-% Bindemittelgehalt
- AC 16 B S SG, 5,00 M-% Bindemittelgehalt
- AC 22 T S, 4,39 M-% Bindemittelgehalt (50/70).

Bei den Berechnungen wurden nur die Eigenschaften der Asphaltbinderschicht variiert. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen, die anhand der Versuchsergebnisse mit dem Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper durchgeführt wurden, sind in Tabelle 6-12 und Abbildung 6-23 zusammengefasst.

| Variante             | Ermüdungsstatus |
|----------------------|-----------------|
| AC 16 B S SG-4,75M-% | 98,76 %         |
| AC 16 B S SG-5,00M-% | 100,00 %        |
| AC 16 B S SG-5,68M-% | 102,24 %        |
| AC 16 B S SG-5,98M-% | 108,21 %        |
| AC 16 B S SG-6,55M-% | 106,97 %        |
| SMA 16 B S- 5,17M-%  | 107,96 %        |
| SMA 16 B S- 5,47M-%  | 112,19 %        |
| SMA 16 B S- 6,03M-%  | 119,40 %        |
| BA-5,28M-%           | 110,70 %        |

Tab. 6-12: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

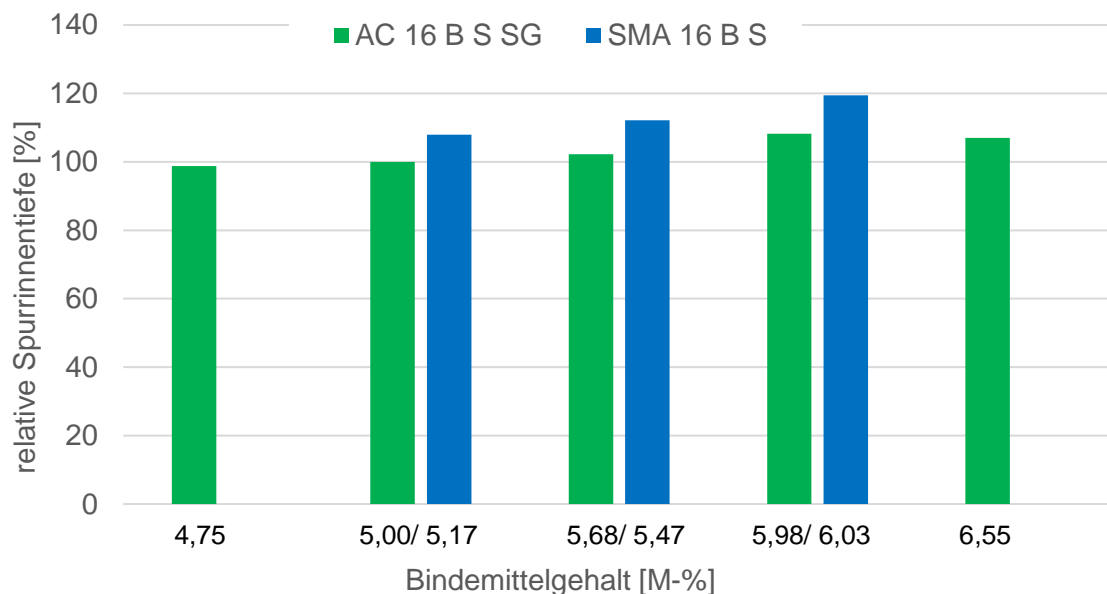


Abb. 6-23: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

Die Ergebnisse der Spurrinnenprognose, die anhand der Versuchsergebnisse des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper durchgeführt wurden, zeigen das der stetig gestufte Asphaltbeton über den gesamten untersuchten Bindemittelbereich ein besseres Verformungsverhalten aufweist als die Varianten des SMA 16 B S. Dabei vergrößert sich die relative Spurrinne der Fahrbahnkonstruktion mit zunehmenden Bindemittelgehalt bei beiden Korngrößenverteilungen. Die Verwendung des weicheren Bitumens PmB 25/55-55A hat zur Folge, dass sich die Verformungsbeständigkeit geringfügig verschlechtert. Die Unterschiede der relativen Spurrinne zwischen den einzelnen Varianten sind aber deutlich geringer ausgeprägt als die der

Deckschichtgemische. Damit besitzt die Binderschicht einen geringeren Einfluss auf die Spurrinnenanfälligkeit der Fahrbahnkonstruktion.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Prognoserechnungen, die anhand der Versuchsergebnisse mit dem Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper durchgeführt wurden, dargestellt.

| Variante             | Ermüdungsstatus |
|----------------------|-----------------|
| AC 16 B S SG-4,75M-% | 96,93 %         |
| AC 16 B S SG-5,00M-% | 100,00 %        |
| AC 16 B S SG-5,68M-% | 100,00 %        |
| AC 16 B S SG-5,98M-% | 111,07 %        |
| AC 16 B S SG-6,55M-% | 98,98 %         |
| SMA 16 B S- 5,17M-%  | 103,28 %        |
| SMA 16 B S- 5,47M-%  | 107,79 %        |
| SMA 16 B S- 6,03M-%  | 129,51 %        |
| BA-5,28M-%           | 102,46 %        |

Tab. 6-13: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper

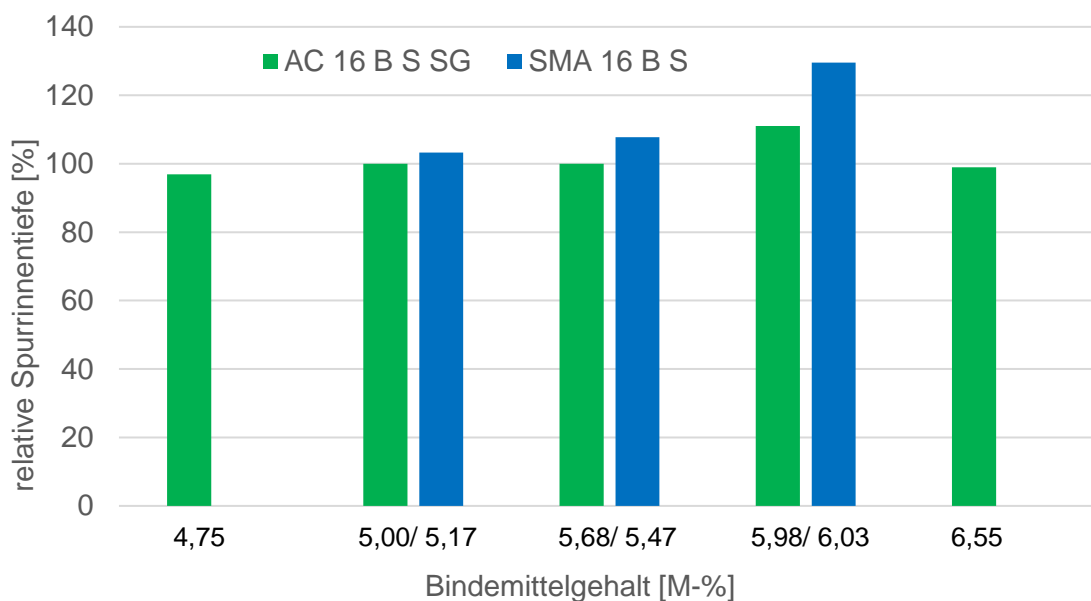


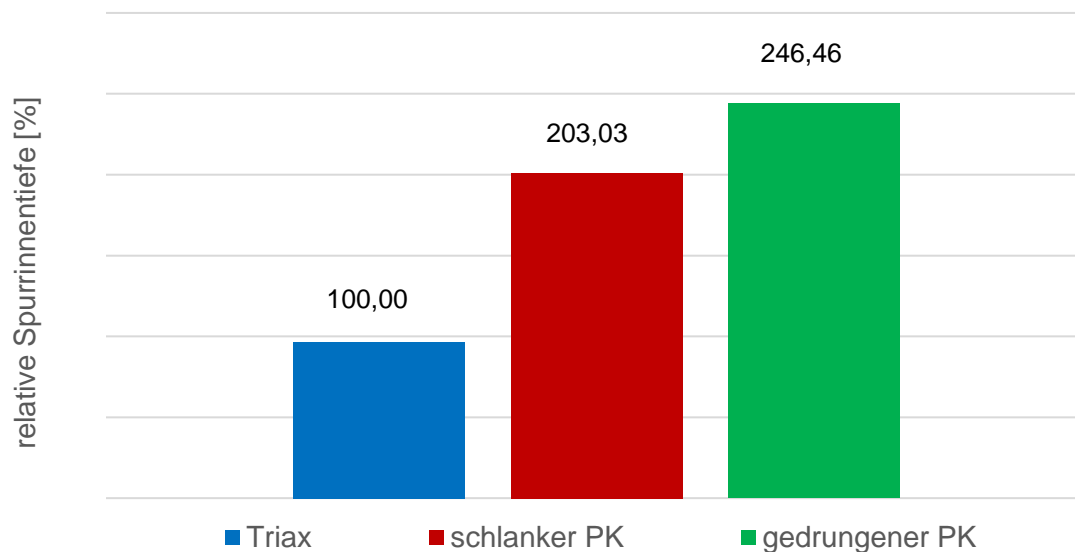
Abb. 6-24: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper

Die Ergebnisse der Spurrinnenprognose, die anhand der Versuchsergebnisse des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper durchgeführt wurden, zeigen das der stetig gestufte Asphaltbeton über den gesamten untersuchten Bindemittelbereich ein besseres Verformungsverhalten aufweist als die Varianten des SMA 16 B S. Dabei vergrößert sich die relative Spurrinne der Fahrbahnkonstruktion mit zunehmenden Bindemittelgehalt bei beiden Korngrößenverteilungen (Ausnahme AC 16 B S SG mit einem Bindemittelgehalt von 6,55 M-%). Die Verwendung des weicheren Bitumens PmB 25/55-55A hat zur Folge, dass sich die Verformungsbeständigkeit geringfügig

verschlechtert. Die Unterschiede der relativen Spurrinne zwischen den einzelnen Varianten sind aber deutlich geringer ausgeprägt als die der Deckschichtgemische. Damit besitzt die Binderschicht einen geringeren Einfluss auf die Spurrinnenanfälligkeit der Fahrbahnkonstruktion. Damit liefern die Prognoserechnungen, die anhand der DSV am schlanken und gedrunenen Probekörper durchgeführt wurden, ähnliche Tendenzen.

#### 6.2.6 Vergleich der einaxialen Druck-Schwellversuche mit dem Triaxialversuch

Der Triaxialversuch stellt das bestmögliche Prüfverfahren zur Ansprache des Verformungsverhaltens von Asphaltgemischen dar. Die axialen und radialen Belastungen können in einer realitätsnahen Form zur Simulation des Spannungszustandes, der beim Überrollen des Rades entsteht, aufgebracht werden. Somit liefert die Spurrinnenprognose, die anhand der Triaxialversuche durchgeführt wurde, das Ergebnis, welches die Realität am ehesten wieder spiegelt. Die Asphaltgemische der Referenzvarianten für die Prognoserechnungen wurden zusätzlich im Triaxialversuch geprüft. Auf Grundlage der Berechnungen der Spurrinnentiefe soll bewertet werden, ob es möglich ist die Spurrinnenprognose ausschließlich anhand der Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuches am schlanken bzw. am gedrunenen Probekörper durchführen und somit auf die Verwendung des Triaxialversuches für die Prognoserechnung verzichten zu können.



Ab.6-25: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion nach 30 Jahre Nutzungsdauer

Die Abbildung 6-25 stellt die Ergebnisse der Spurrinnenprognose dar, die anhand der Versuchsergebnisse der Druck-Schwellversuche bzw. des Triaxialversuches ermittelt wurden. Die geringste Spurrinnentiefe wird mittels des Triaxialversuches prognostiziert. Der Unterschied zu den Ergebnissen der Druck-Schwellversuche fällt dabei sehr deutlich aus. Die Spurrinnentiefe die mittels des Druck-Schwellversuchs am schlanken Probekörper prognostiziert wird, erfährt das Doppelte an plastischen Verformungen.

Eine weitere Vergrößerung der Spurrinne wird anhand der Ergebnisse des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper ermittelt.

Die vorgestellten Ergebnisse der Spurrinnenprognose, in dem vorangegangenen Abschnitt, prognostizierten bei der Variation der Eigenschaften der Deckschichtgemische und der Binderschichtgemische ähnliche Ergebnisse der relativen Spurrinnentiefe. So konnte mit den Druck-Schwellversuchen am schlanken und gedrunenen Probekörper dieselben Aussagen zu den Auswirkungen der Variation der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes getroffen werden. Allerdings wurde bei der Versuchsdurchführung festgestellt, dass die Ergebnisse der Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper hohe Streuungen aufweisen. In Abbildung 6-26 sind die Ergebnisse eines Asphaltgemisches bei derselben Prüftemperatur und derselben Oberspannung dargestellt. Die plastischen Gesamtdehnungen am Versuchsende schwanken dabei von circa 9 ‰ bis circa 18 ‰. Die Abweichung der Prognoseergebnisse zu dem Ergebnis des Triaxialversuches ist bei beiden Prüfverfahren sehr hoch.

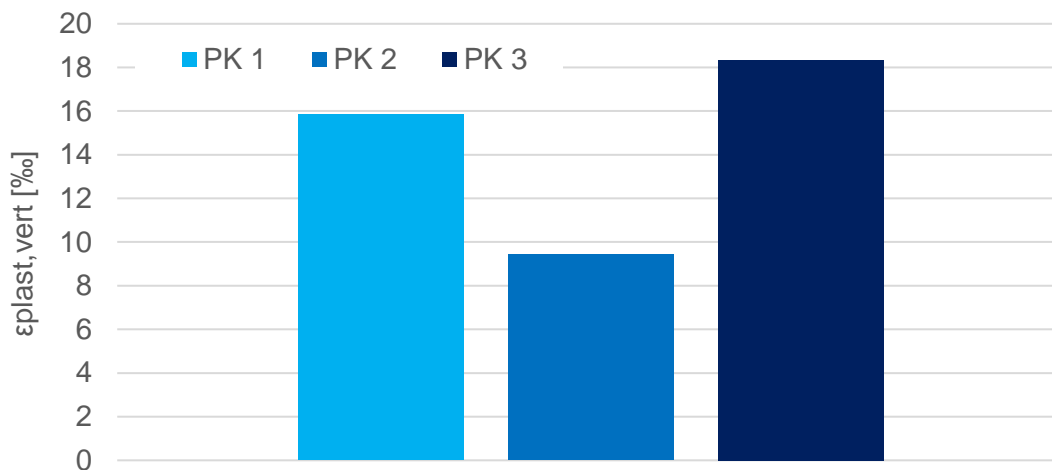


Abb. 6-26: Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung

Aus diesen Überlegungen kann der Druck-Schwellversuch am schlanken bzw. ebenfalls am gedrunenen Probekörper die Versuchsergebnisse für die Spurrinnenprognose liefern. Jedoch besitzt die Durchführung des Versuches mit dem schlanken Probekörper eine bessere Wiederholbarkeit der Versuche durch eine deutlich geringere Streuung der Versuchsergebnisse. Außerdem werden die Dehnungen bei diesem Versuch in der Mitte des Probekörpers gemessen. Damit werden keine Randeinspannungseffekte in der Messung mit erfasst. Daher sollten die Versuchsergebnisse für die Spurrinnenprognose anhand der Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper bestimmt werden.

Die Prognose der Spurrinnenbildung kann anhand der Versuchsergebnisse des Triaxialversuchen nach derzeitigem Erkenntnisstand genauer und realitätsnäher ermittelt werden. Insbesondere bei der Validierung des Prognoseverfahrens ist der

Triaxialversuch unverzichtbar. Eine Optimierung von Asphaltgemischen ist allerdings aufgrund des sehr hohen Prüfaufwandes nicht empfehlenswert. So könnte die Optimierung der Verformungsbeständigkeit der Asphaltgemische anhand der Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper durchgeführt werden. An den optimierten Varianten könnten triaxiale Untersuchungen stattfinden um eine genauere Prognose der Spurrinnenbildung zu erhalten.

## **7 Optimierung der Asphaltgemische**

Anhand der Ergebnisse der Laboruntersuchungen und der Prognoserechnungen soll ein Verfahren entwickelt werden, mit welchem es möglich ist Asphaltgemische zu entwerfen, welche hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anforderungen optimiert sind und somit in der Lage sein können den zukünftigen schwersten Verkehrsbelastungen standzuhalten. Um den Erhaltungsaufwand während der Nutzungsdauer so gering wie möglich zu halten, müssen die Asphaltgemische eine Verformungsbeständigkeit aufweisen, die die Bildung von Spurrinnen sowie eine Rissbeständigkeit, die die Bildung von Rissen infolge von tiefen Temperaturen und der wiederholten Belastung verhindert. Geeignete Werkzeuge für die Prognose der strukturellen Substanz auf der Grundlage materialtechnischer und stochastisch abgesicherter Kennwerte stellen die Verfahren der Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten [RDO 09] und die Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise [RSO 18], letztere jedoch nur für Asphalttragschichten, dar. In einer Weiterentwicklung an der Professur für Straßenbau der TU Dresden konnten diese Verfahren sowohl für die Anwendung in den Schichten der Asphaltdecke angepasst als auch ein Verfahren zur Prognose der Spurrinnenentwicklung in allen Asphaltsschichten entwickelt werden [Dragon 2015].

Die Optimierung der Asphaltgemische sollte anhand der Ergebnisse der Prognoserechnungen durchgeführt werden. Die Rissbeständigkeit von Asphaltgemischen ist von mehreren Eigenschaften des Asphalttes abhängig. So beeinflusst das Steifigkeitsverhalten, das Ermüdungsverhalten und das Tieftemperaturverhalten die Rissbeständigkeit eines Asphaltgemisches. Für die Spurrinnenprognose werden als Materialkenngrößen die Hauptkurve und die Impulskriechkurven, die das Verformungsverhalten des Gemisches beschreiben, benötigt. Diese Eigenschaften können allerdings nur über gebrauchungsverhaltens-orientierte (GVO) Prüfverfahren angesprochen werden.

In diesem Kapitel werden zunächst Empfehlungen zur Auswahl der zu untersuchenden Asphaltgemische und der Auswahl der GVO-Prüfverfahren gegeben. Anschließend wird die Auswahl des optimierten Asphaltgemisches anhand der Prognoserechnungen beschrieben.

### **7.1 Auswahl der zu untersuchenden Asphaltgemische**

Um eine Optimierung der Sieblinie zu erreichen, sollten die gewählten Korngrößenverteilungen möglichst weit auseinander liegen um somit den Einfluss auf das Materialverhalten zu bestimmen. Somit müsste die Sieblinie mindestens 2-fach variiert werden. Es ist empfehlenswert ebenfalls eine dritte Sieblinie zu untersuchen, damit eine Optimierung für die Kriterien der Ermüdungsrissbildung und der Verformungsbeständigkeit möglich ist. So zeigten die Ergebnisse der Prognoserechnung, dass die feine Korngrößenverteilung des SMA 11 S ein besseres Ermüdungsverhalten, dafür aber

eine schlechtere Verformungsbeständigkeit aufweist als die grobe Korngrößenverteilung. Damit kann die Entscheidung der Auswahl der Sieblinie nur nach den streckenabhängigen Kriterien (Rissbeständigkeit, Verformungsbeständigkeit) erfolgen. Durch die Untersuchung einer 3. Sieblinie könnte eine Optimierung über beide Kriterien ermöglicht werden. Insbesondere die Variation der Korngrößenverteilung, bedingt durch die notwendige Variation des Bindemittelgehaltes, erhöht den Versuchsaufwand deutlich. Um den Aufwand der Materialbeschaffung und die Prüfzeiten zu reduzieren, sollte geprüft werden, ob die Sieblinie vorab schon festgelegt werden kann. Die Festlegung sollte sich dabei an den Erkenntnisstand der heutigen Forschung richten, sowie positive Erfahrungen bestimmter Sieblinien im hochbelasteten Bereich.

Der Bindemittelgehalt sollte je untersuchte Sieblinie 5-fach variiert werden. Bei dieser Anzahl an Gemischen je Sieblinie konnte anhand der Bewertung der Prognoserechnungen ein optimaler Bindemittelgehalt ermittelt werden. Die Differenz zwischen dem geringsten und höchsten Bindemittelgehalt sollte mindestens 2 M-% betragen und je Variante um mindestens 0,5 M-% gesteigert werden. Mit dem Verfahren nach Radenberg und Bedekovic [Radenberg 1996; Bedekovic 1957] wurde ein Bindemittelbedarf in Abhängigkeit der Sieblinie berechnet (Tabelle 7.1). Die Ergebnisse für die feine Korngrößenverteilungen des SMA 11 S und für den SMA 16 B S stimmen mit den ermittelten optimierten Bindemittelgehalt überein. Der Bindemittelgehalt für die anderen Korngrößenverteilungen war zu niedrig bzw. zu hoch. Das Verfahren kann somit für einige Asphaltgemische einen sinnvollen mittleren Bindemittelgehalt für die Variation bestimmen. Es sollten aber zur Festlegung des mittleren Bindemittelgehalts auch die Ergebnisse der Erstprüfung und somit volumetrische Kennwerte und Vorgaben des Mindestbindemittelgehalts der TL Asphalt 07/13 in die Entscheidung mit einfließen.

## **7.2 Auswahl der gebrauchsverhaltensorientierten Prüfverfahren**

Für die Prognoserechnungen werden bestimmte Eigenschaften der Asphaltgemische benötigt. Für die Prognose der Ermüdungsrissbildung sind diese Eigenschaften:

- Steifigkeitsverhalten,
- Ermüdungsverhalten,
- Tieftemperaturverhalten.

Für die Prognoserechnungen der Spurrinnenbildung sind diese Eigenschaften:

- Steifigkeitsverhalten,
- Verformungsverhalten.

Das Ermüdungsverhalten sollte mittels des Spaltzug-Schwellversuchs bei einer Prüffrequenz von 10 Hz und einer Prüftemperatur von 20°C ermittelt werden. Dabei stellt heutzutage die AL Sp-Asphalt 09 die Grundlage der Durchführung und der Auswertung des Versuches dar. Eine Technische Prüfvorschrift für diesen Versuch und der Bestimmung der Ermüdungsfunktion ist zurzeit in Bearbeitung. In Deutschland ist die Prüfeinrichtung verbreitet und es konnte mit dem Versuch ausreichend Erfahrung gesammelt werden.



Das Tieftemperaturverhalten sollte mit Hilfe des Abkühlversuchs gemäß TP Asphalt-StB 46 A ermittelt werden. Der Versuch liefert den Verlauf der kryogenen Spannungen in Abhängigkeit der Temperatur, der für die Prognose der Ermüdungsrissbildung benötigt wird. In Deutschland konnte ebenfalls für diesen Versuch ausreichend Erfahrung bei der Durchführung und Auswertung gesammelt werden.

In diesem Forschungsvorhaben wurde das Darmstädter Polierverfahren angewendet um das Griffigkeitsverhalten der Asphaltgemische und den Einfluss der Zusammensetzung auf die Griffigkeit und deren Entwicklung zu beurteilen. Die Untersuchungen konnten die Ergebnisse von [Bald 2004] allerdings nicht bestätigen. Der Einfluss der Zusammensetzung auf das Griffigkeitsverhalten konnte mit diesem Verfahren nicht beurteilt werden. Somit war eine Optimierung der Deckschichtgemische für diese Eigenschaft nicht möglich. Dabei spielt das Griffigkeitsverhalten eine wichtige Rolle. Zum einen gibt es Anforderungen der ZTV Asphalt-StB 07/13, die im Zeitraum der Abnahme und zum Ende der Verjährungsfrist eingehalten werden müssen, zum anderen steuert die Griffigkeit der Deckschicht zu einer sicheren Verkehrsteilnahme, insbesondere bei einer nassen Fahrbahn, bei. Somit sollte zur Beurteilung der Griffigkeit an Asphaltgemischen ein Verfahren entwickelt werden. Eine Möglichkeit könnte das Prüfverfahren nach Wehner und Schulze bieten, was für Asphaltgemische modifiziert werden müsste.

#### 7.2.1 Bestimmung des Steifigkeitsverhalten

Für die Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens gibt es zwei Möglichkeiten dies versuchstechnisch zu ermitteln. In Betracht kommen der Spaltzug-Schwellversuch und der Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper.

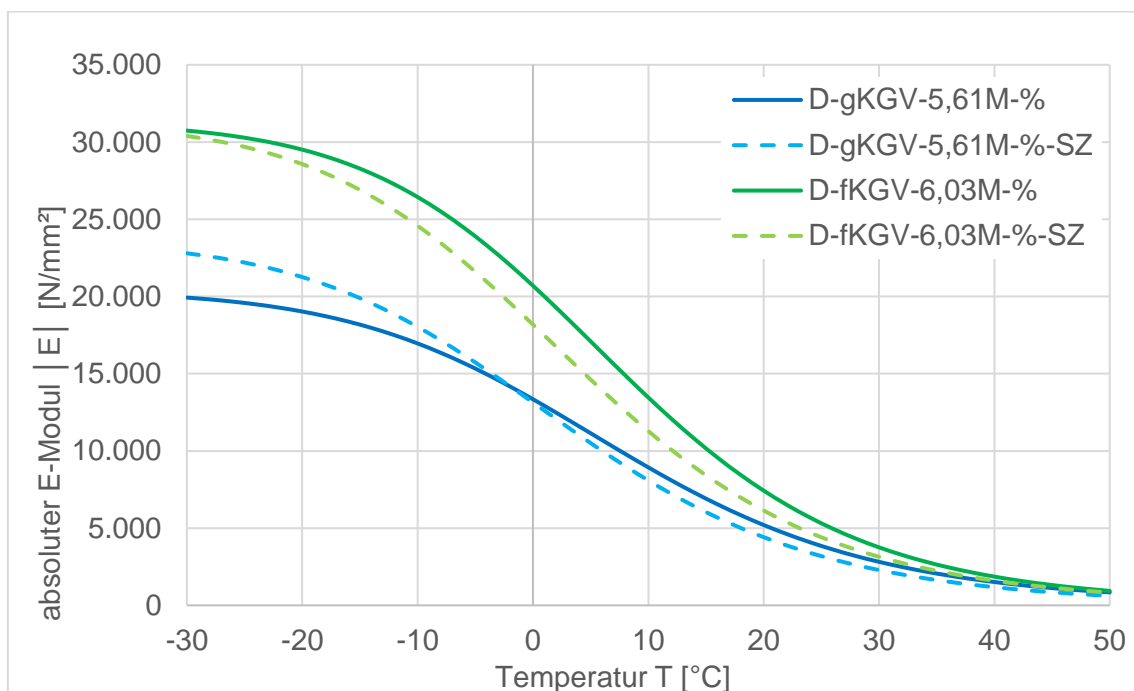


Abb. 7-1: Vergleich der Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion mittels der Ergebnisse des Druck-Schwellversuches und des Spaltzug-Schwellversuch

Zur Beurteilung welcher Versuch geeigneter ist, wurde an einigen Asphaltgemischen die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion ebenfalls mit dem Spaltzug-Schwellversuch bestimmt. Aus Abbildung 7-1 ist ersichtlich, dass kein eindeutiger Trend feststellbar war, ob die Steifigkeiten mit dem Druck-Schwellversuch zu groß oder zu gering bestimmt werden. Der Druck-Schwellversuch besitzt aber die Möglichkeit die Steifigkeiten auch bei Temperaturen über 20°C versuchstechnisch zu ermitteln. Die Verläufe sind aber besonders bei den hohen Temperaturen relativ identisch. Der Grenzwert des Steifigkeitsmoduls bei hohen Temperaturen und/oder niedrigen Frequenzen, der über ein Polynom 2. Grades ermittelt wird, besaß in vielen Fällen den Wert 0. Bei der Auswertung der Spaltzug-Schwellversuche wird der Grenzwert des Steifigkeitsmoduls bei hohen Temperaturen und/oder niedrigen Frequenzen annäherungsweise auf 0 gesetzt. Somit besitzen die Hauptkurven, zum größten Teils, den gleichen Grenzwert des Steifigkeitsmoduls unabhängig über welchem Versuch dieser bestimmt wird. Damit können zwar die Steifigkeiten mit dem Druck-Schwellversuch über 20°C bestimmt werden, der Einfluss auf die Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion ist dagegen gering. Des Weiteren besitzt der Druck-Schwellversuch einen deutlich höheren Aufwand bei der Materialbeschaffung und der Probekörperherstellung. Eine höhere Präzision ist bei der Vorbereitung des Probekörpers gefordert damit die Extensiometer, die an die Magnete angebracht werden, in ihrem linearen Messbereich die Verformungen des Probekörpers messen. Dagegen ist die Bestimmung der Hauptkurve mittels des Spaltzug-Schwellversuches in der AL Sp-Asphalt 09 geregelt. Eine Technische Prüfvorschrift für diesen Versuch und der Bestimmung der Hauptkurve ist zurzeit ebenfalls in Bearbeitung. In Deutschland konnte ebenfalls für diesen Versuch ausreichend Erfahrung bei der Durchführung und Auswertung gesammelt werden. Aus diesen Gründen sollte das Steifigkeitsverhalten mit Hilfe des Spaltzug-Schwellversuches ermittelt werden.

#### 7.2.2 Bestimmung des Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten kann nur ungenügend über den Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB 25 B 1 angesprochen werden. Die Asphaltgemische werden nur bei einer Temperatur und einer Oberspannung geprüft und nicht wie bei den anderen Versuchen unter Variation der beiden Prüfbedingungen. Die ist ebenfalls der Grund, dass eine Spurrinnenprognose anhand dieses Versuches nicht möglich ist. Der Triaxialversuch ist dagegen für eine Optimierung von mehreren Asphaltgemischen zu aufwendig, insbesondere in der Materialbeschaffung, der Probekörperherstellung und dessen Vorbereitung. Außerdem sind Triaxialanlagen in Deutschland relativ gering verbreitet. Somit bieten die Druck-Schwellversuche am schlanken bzw. am gedrunenen Probekörper die besten Voraussetzungen zur Beurteilung des Verformungsverhaltens. Der Druck-Schwellversuch am gedrunenen Probekörper benötigt zwar eine einfachere Versuchstechnik und besitzt ein deutlich geringeres Materialaufkommen, aber die Versuchsergebnisse weisen eine höhere Streuung auf. In Abbildung 7-2 sind die Ergebnisse des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper eines Asphaltgemisches bei derselben Temperatur und derselben Oberspannung dargestellt.

Die Differenz der erhaltenen plastischen Dehnung beträgt dabei circa  $\Delta\varepsilon = 9\text{‰}$ . Diese Schwankungen der Versuchsergebnisse verursachen dabei auch eine schlechtere Bestimmung der Materialparameter, die für die Approximation der Impulskriechkurven benötigt werden.

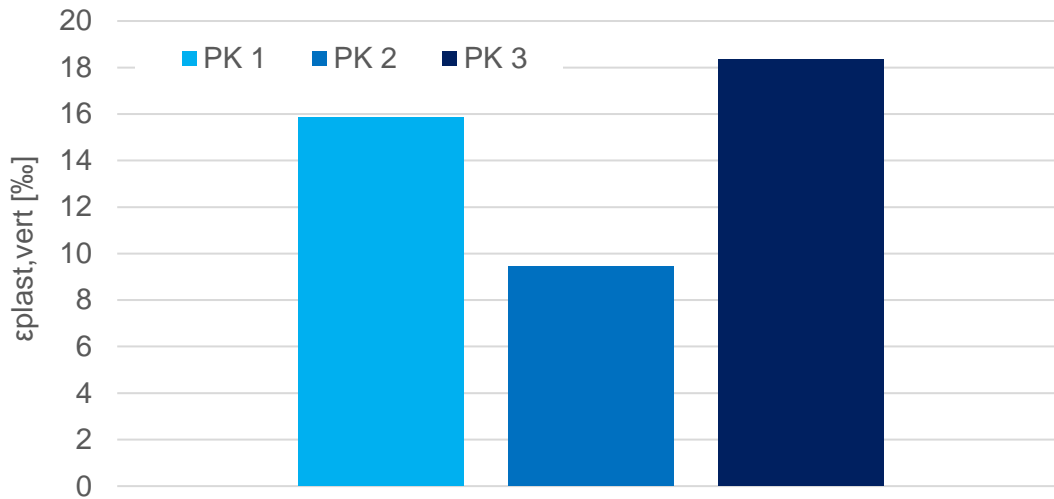
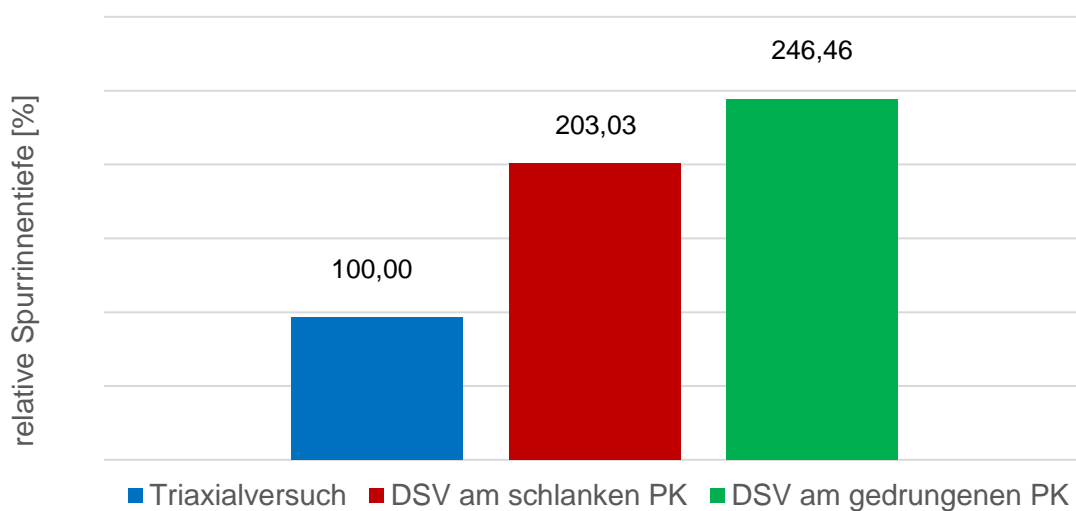


Abb. 7-2: Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schwellversuches am gedrunghenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung

Der Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper weist diese deutliche Streuung der Versuchsergebnisse nicht auf. Somit können die Materialparameter der Impulskriechkurve mit einer höheren Sicherheit bestimmt werden. Die Extensiomter ermöglichen die Messung der plastischen Verformungen direkt am Probekörper. Die Messung geschieht dabei in der Probekörpermitte in der ein homogenerer Spannungsverlauf herrscht als bei dem gedrunghenen Probekörper. Aus diesen Überlegungen sollte das Verformungsverhalten über den Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper ermittelt werden.



Ab.7-3: relative Spurrinntiefe der Fahrbahnkonstruktion nach 30 Jahre Nutzungsdauer

Eine deutlich genauere und realitätsnähere Spurrinnenprognose kann allerdings nur anhand der Versuchsergebnisse des Triaxialversuch erfolgen (Abbildung 7-3). Mit diesem Versuch ist es ebenfalls möglich, die Materialparameter für die Druck- und Zugphasen getrennt voneinander zu bestimmen.

### **7.3 Optimierung der Asphaltgemische**

Der maßgebende Nachweispunkt gegenüber der Rissbildung für die Asphaltdeckschicht ist die Oberseite der Deckschicht unter Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen. Die größten Zugdehnungen treten dabei 165 mm neben der Lastachse auf. Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltbinderschicht ist die Unterseite der Binderschicht unter Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen und unter der Annahme des abgeminderten Schichtenverbundes zwischen den Asphaltsschichten. Die größten Zugdehnungen treten dabei in der Lastachse auf. Somit werden die Prognoserechnungen der Ermüdungsrisssbildung nur für diese beiden Nachweispunkte betrachtet.

Die Ergebnisse der Prognoserechnung zeigten, dass bei den Deckschichtgemischen die feine Korngrößenverteilung das bessere Ermüdungsverhalten, dagegen aber das schlechtere Verformungsverhalten, aufweist. Somit hängt die Entscheidung der Optimierung der Sieblinie von den jeweiligen Anforderungen der Strecke ab. In den meisten Fällen ist aber das Kriterium der Ermüdungsrisssbildung maßgebend. Für den SMA 11 S (Verwendung Grauwacke und PmB 25/55-55A) stellt somit die feine Korngrößenverteilung die optimierte Sieblinie dar.

Bei der Optimierung des Bindemittelgehaltes sollten beide Kriterien bewertet werden. Dadurch können Bereiche des Bindemittelgehaltes ermittelt werden, in denen die Schwankung des Bindemittelgehaltes keine negativen Auswirkungen besitzen. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt so zu wählen, dass aufgrund der zugelassen Abweichung des Bindemittelgehaltes nach ZTV Asphalt-StB 07 weder zu Rissen oder Spurrinnen führen kann. Die feine Korngrößenverteilung besitzt im Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,5 M-% bis 7,5 M-% geringe Unterschiede des Ermüdungsstatus nach 30 Jahren. Außerhalb dieser Spanne erhöht sich das Risiko der Rissbildung während des Nutzungszeitraums deutlich. Der Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,0 M-% bis 7,0 M-% weist ein sehr ähnliches Verformungsverhalten auf. Dies bedeutet, dass in dem Bereich des Bindemittelgehaltes von 6,5 M-% bis 7,0 M-% der SMA 11 S mit der feinen Korngrößenverteilung nur geringe Unterschiede im Ermüdungs- und Verformungsverhalten aufweist. Der optimale Bindemittelgehalt sollte so gewählt werden, dass mit der zulässigen Differenz der ZTV Asphalt dieser Bereich eingehalten wird. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des untersuchten SMA 11 S (feine KGV)  $B_{opt} = 6,6 \text{ M-\%}$ .

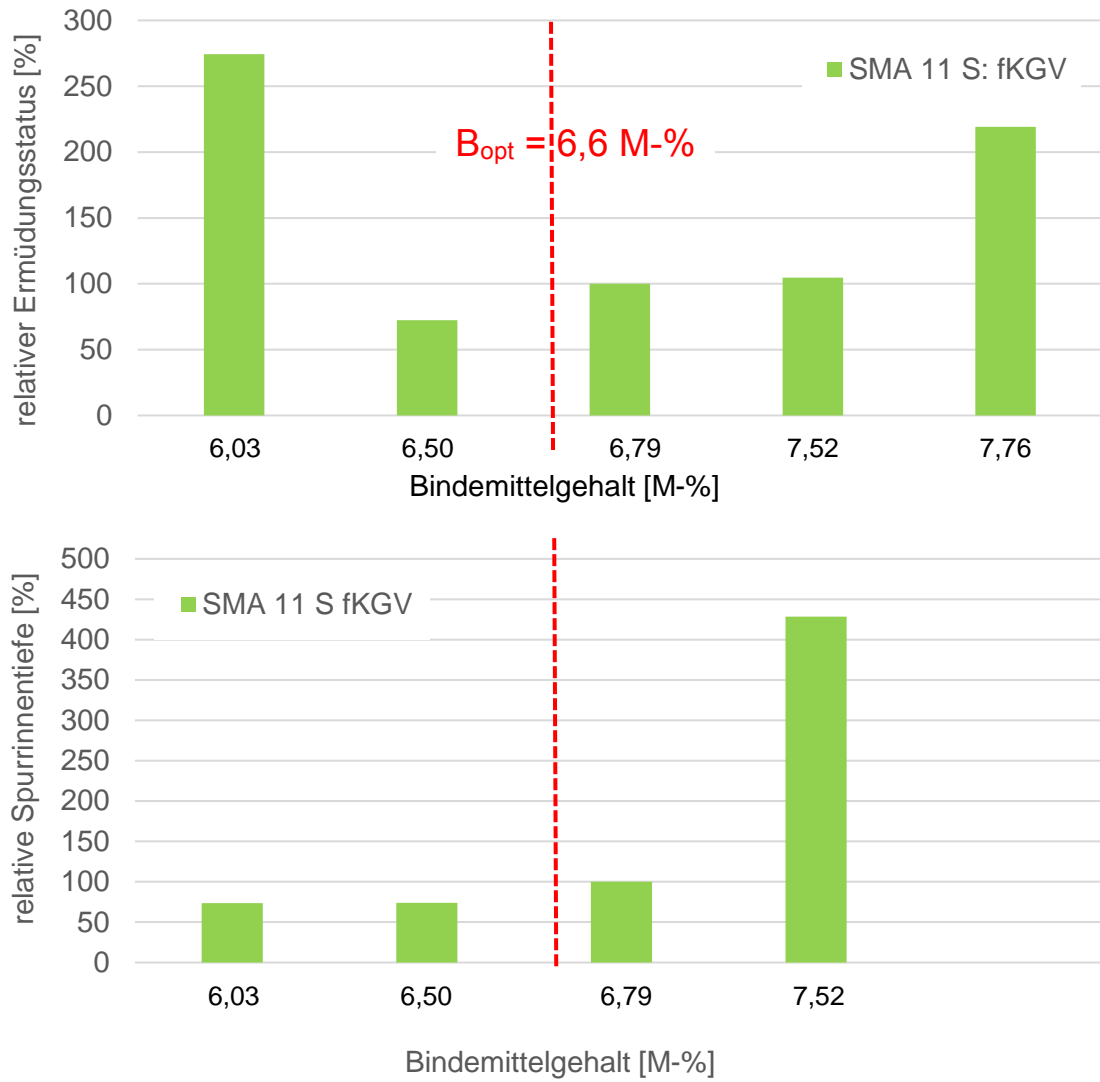


Abb. 7.4: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, feine KGV

In dem Bereich des Bindemittelgehaltes von 7,0 M-% bis 8,0 M-% weist der SMA 11 S mit der groben Korngrößenverteilung nur geringe Unterschiede im Ermüdungs- und Verformungsverhalten auf (Abbildung 7-5). Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des SMA 11 S (grobe KGV)  $B_{opt} = 7,4$  M-%.

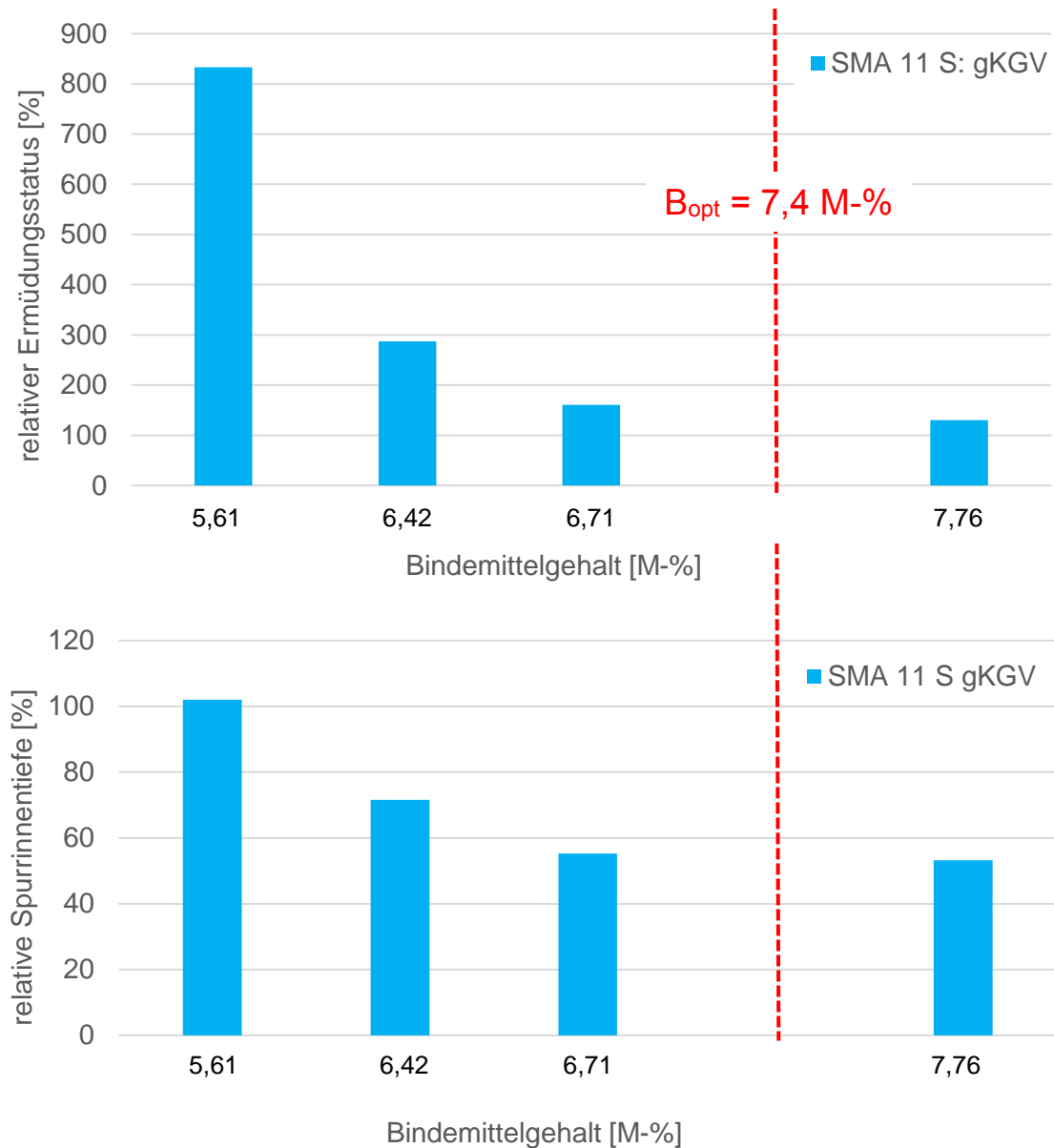


Abb. 7-5: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, grobe KGV

Die Ergebnisse der Prognoserechnung zeigten, dass bei den Binderschichtgemischen der SMA 16 B S ein deutlich besseres Ermüdungsverhalten im Vergleich zu dem AC 16 B S SG aufweist, dafür aber ein schlechteres Verformungsverhalten. Der Unterschied der Verformungsbeständigkeit zum stetig gestuften Asphaltbeton ist aber nur geringfügig schlechter, sodass die optimierte Sieblinie für die Binderschicht der SMA 16 B S darstellt.

Der SMA 16 B S besitzt im gesamten untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes geringe Unterschiede des Ermüdungsverhaltens und des Verformungsverhaltens. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des SMA 16 B S:  $B_{opt} = 5,5 \text{ M-}\%$  (Abbildung 7-6).

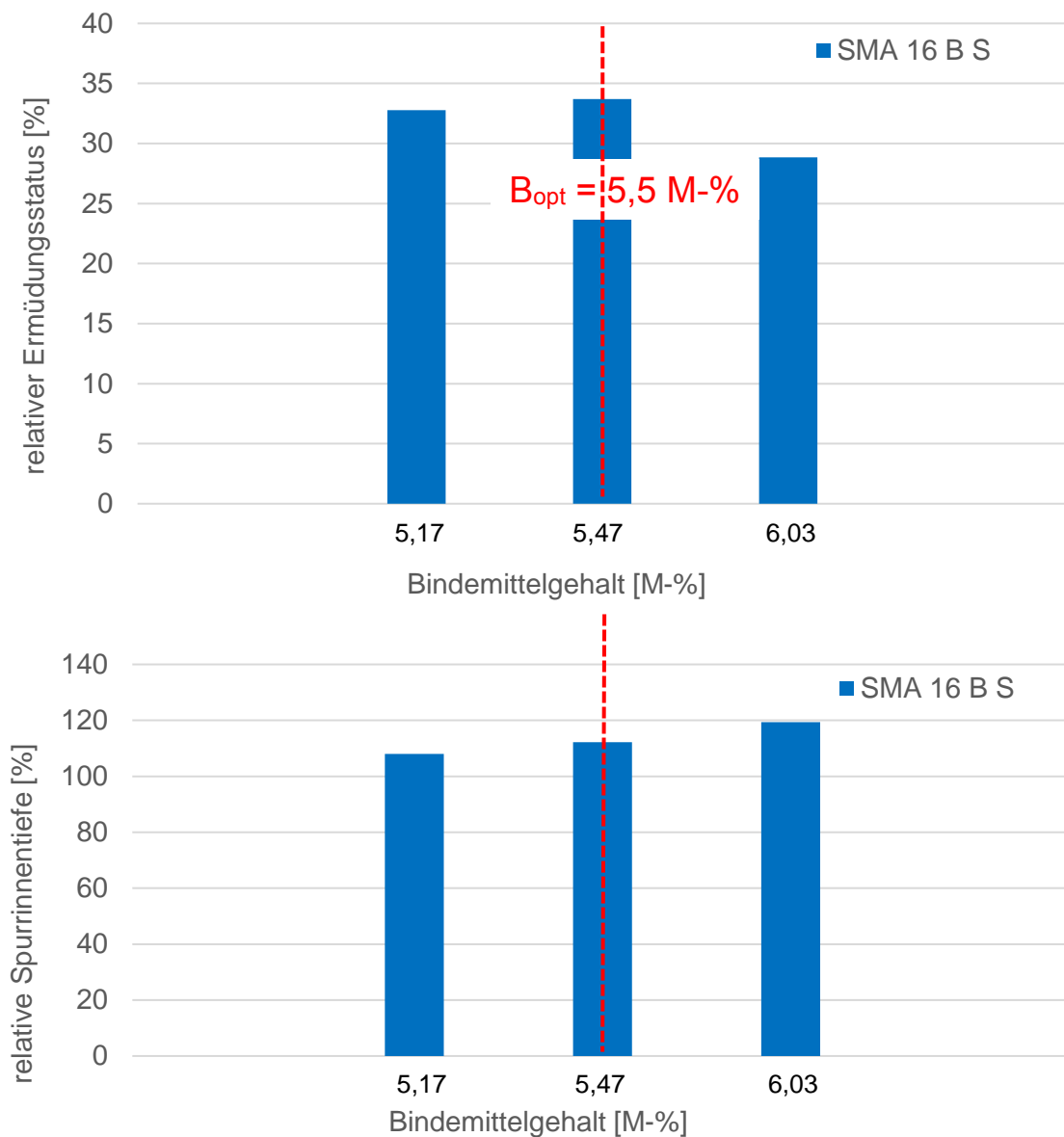


Abb. 7-6: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 16 B S

Der AC 16 B S SG besitzt im gesamten untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes geringe Unterschiede des Verformungsverhaltens (Abbildung 7-7). Mit Zunahme des Bindemittelgehaltes verbessert sich allerdings das Ermüdungsverhalten und ist in dem Bereich von 6,0 M-% bis 6,5 M-% ähnlich. Somit ist der optimale Bindemittelgehalt des AC 16 B S SG:  $B_{opt} = 6,2 \text{ M-\%}$ .

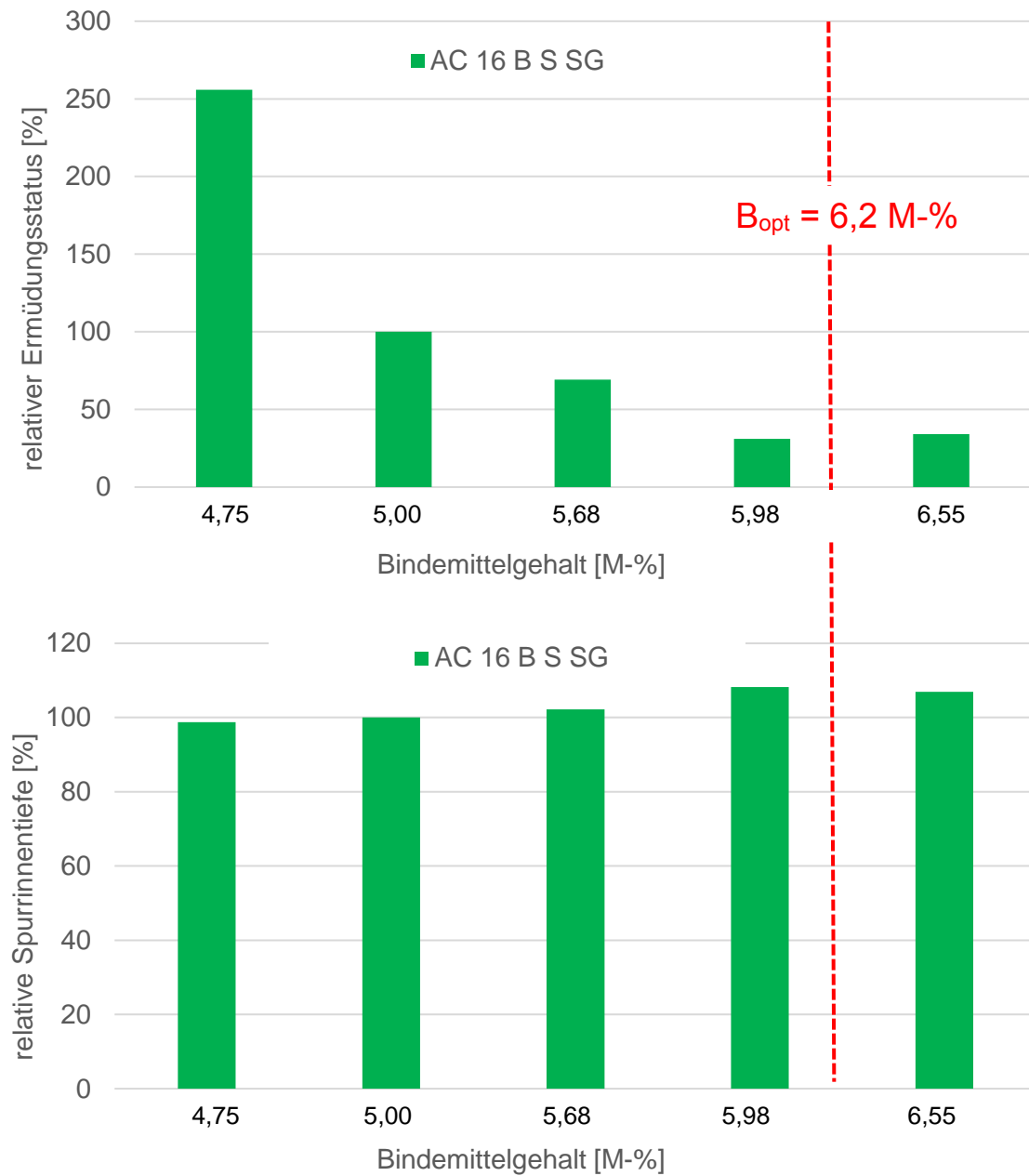


Abb. 7-7: Optimierung des Bindemittelgehaltes des AC 16 B S SG



#### 7.4 Herangehensweise zur Optimierung der Asphaltgemische

Die Herangehensweise zur Optimierung der Asphaltgemische sollte wie folgt durchgeführt werden:

- mindestens 2-fache Variation der Sieblinie (eine 3-fache Variation ist empfehlenswert) bzw. Festlegung der Sieblinie um den versuchsaufwand zu reduzieren
- 5- fache Variation des Bindemittelgehaltes
- Versuchsdurchführung

|                                   |                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Spaltzug-Schwellversuch           | Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten |
| Abkühlversuch TP Asphalt-StB 46 A | Tieftemperaturverhalten              |
| DSV am schlanken PK               | Verformungsverhalten                 |

Tab. 7-1: notwendige Versuche zur Optimierung von Asphaltgemischen

- Prognoserechnung der Ermüdungsrissbildung und der Spurrinnenbildung
- Optimierung des Asphaltgemisches anhand der Prognoserechnungen

Dabei sollte der optimale Bindemittelgehalt so festgelegt werden, dass die zugelassene Differenz der ZTV Asphalt 07/13 von 0,3 M-% das Ermüdungs- und das Verformungsverhalten nur geringfügig beeinflusst. Die Ergebnisse zeigten, dass bei allen vier untersuchten Asphaltgemischen diese Bereiche des Bindemittelgehaltes festgestellt werden konnten.

Die Ergebnisse zeigten, dass mit Hilfe von gebrauchungsverhaltensorientierten Prüfverfahren und den Prognoserechnungen eine Optimierung von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtgemischen möglich ist. An allen untersuchten Gemischen konnte ein Bereich des Bindemittelgehaltes gefunden werden, in den sich weder das Ermüdungsverhalten noch das Verformungsverhalten stark änderten. Aufgrund der Prognoserechnung und den dazu benötigten Materialkennwerten besitzen die Ergebnisse eine hohe Sicherheit. Diese Herangehensweise der Optimierung der Asphaltgemische bedingt aber einen sehr hohen Versuchsaufwand. Somit ist die Herangehensweise der Optimierung nur für schwerste belastete Verkehrsbereiche empfehlenswert.

In dem Forschungsvorhaben wurden bei der Ermüdungsrissbildung nur die Deck- und Binderschicht betrachtet. Die größten Biegezugdehnungen entstehen nach derzeitigem Erkenntnisstand an der Unterseite der Asphalttragschicht in der Lastachse. Somit stellt die Unterseite der Asphalttragschicht ebenfalls ein maßgebender Nachweispunkt dar. Die vorgestellte Optimierung der Asphaltgemische bietet auch die Möglichkeit Asphaltgemische, die nicht den Anforderungen der TL Asphalt-StB 07/13 genügen, ihre Eignung für ihren Verwendungszweck nachzuweisen. Somit könnten Asphaltgemische mit innovativen und alternativen Konzepten die Möglichkeit erhalten in der Praxis eingebaut zu werden und mit diesen Baustoffgemischen Erfahrungen zu sammeln. Mit

Hilfe dieser Vorgehensweise können ebenfalls Asphaltgemische mit viskositätsveränderten Bindemittel vergleichend untersucht und optimiert werden. Diese Asphaltkonzepte werden mittlerweile immer häufiger für Asphaltflächen mit sehr hohen Verkehrsbeanspruchungen, wie z. B. Containerterminals, Flughäfen, Hafen-, Logistik- und Industrieflächen verwendet. In dieser Arbeit wurde die Optimierung der Asphaltzusammensetzung in Bezug auf die Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes durchgeführt. Eine Ausweitung der Optimierung der Asphaltzusammensetzung auf modifizierte und viskositätsveränderte Bindemittel sollte in weiteren Forschungen mit berücksichtigt werden.

Die Prognoserechnung der Ermüdungsrissbildung für die Deck- und Binderschicht, sowie die Verfahrensweise der Spurrinnenbildung wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht kalibriert bzw. validiert, sodass nur Relativwerte angegeben werden konnten. Zur Ermittlung der Auswirkung der Asphaltgemische auf ihre Nutzungsdauer bzw. auf Erhaltungs-/Erneuerungsintervalle ist es wünschenswert, dass die Verfahren in Zukunft kalibriert bzw. validiert würden. Des Weiteren wurden die Prognoserechnungen der Rissbildung mit der deterministischen Verfahrensweise durchgeführt. An der TU Dresden wird zurzeit die probabilistische Verfahrensweise für die Nachweisführung der Rissbeständigkeit in der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht weiterentwickelt. Diese Verfahrensweise bietet die Möglichkeit, die Variabilität der Materialkenngrößen in dem Berechnungsprozess einzubinden. Basierend auf der jeweiligen Stichprobe werden die charakteristischen Materialkenngrößen statistisch modelliert und durch Klassen diskret abgebildet. Dadurch können Streuungen der Materialeigenschaften im Prognoseprozess der Nutzungsdauer einbezogen werden.

## 8 Zusammenfassung

Hauptziel des Forschungsvorhabens ist es, über die die Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzungen von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtgemischen auf deren Gebrauchseigenschaften eine Herangehensweise für die Asphaltkonzeption von diesen Gemischen für zukünftige schwerste Verkehrsbelastung unter Verwendung von gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfverfahren zu entwickeln. Somit sollen Asphaltgemische entworfen werden, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anforderungen optimiert sind.

Dafür wurden an der TU Dresden als Asphaltdeckschichtgemisch der SMA 11 S unter Variation der Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes, sowie die alternativen Binderschichtgemische des AC 16 B S SG und der SMA 16 B S unter Variation des Bindemittelgehaltes untersucht. Die Optimierung der Asphaltgemische erfolgte anhand der Ergebnisse der Prognoserechnungen der Ermüdungsrisssbildung und der Spurrinnenbildung. Für die Bestimmung der benötigten Materialkenngrößen wurde eine Vielzahl an gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren durchgeführt:

- Bestimmung des Steifigkeitsverhalten mit dem Druck-Schwellversuch am schlanken Probekörper
- Bestimmung des Ermüdungsverhalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch
- Bestimmung des Tieftemperaturverhalten mit dem Abkühlversuch gemäß TP Asphalt-StB 46 A
- Bestimmung des Verformungsverhalten mit dem Druck-Schwellversuch gemäß TP Asphalt-StB 25 B 1, sowie am schlanken und gedrunenen Probekörper ohne Lastpause und mit dem Triaxialversuch an optimierten Asphaltgemischen
- Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens der Asphaltdeckschichtgemische mit dem Darmstädter Polierverfahren.

Die Prognoserechnungen der Ermüdungsrisssbildung beschränkten sich auf die Betrachtung der Risssbildung in der Asphaltdeckschicht bzw. in der Asphaltbinderschicht. Die Nachweisführung für die Deckschicht erfolgte in Analogie zu dem Verfahren der RDO Asphalt 2009 für die Tragschicht. Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltdeckschicht ist die Oberseite der Deckschicht unter Betrachtung der vertikalen Zugdehnungen. Die größten Zugdehnungen treten dabei 165 mm neben der Lastachse auf. Der maßgebende Nachweispunkt für die Asphaltbinderschicht ist die Unterseite der Binderschicht unter Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen und unter der Annahme des abgeminderten Schichtenverbundes zwischen den Asphaltsschichten. Die größten Zugdehnungen treten dabei in der Lastachse auf. Als Grundlage der Spurrinnenprognose diente der Ansatz von [Dragon 2015b]. Bei der Bestimmung der Materialkenngrößen der Impulskriechkurve konnte eine Temperaturabhängigkeit dieser Kenngrößen festgestellt werden. Diese Abhängigkeit wurde in die Prognoserechnung der Spurrinnenbildung berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die feine Korngrößenverteilung des SMA 11 S ein besseres Ermüdungsverhalten aufweist als die grobe Korngrößenverteilung. Dabei besitzt die feine Korngrößenverteilung den geringsten Ermüdungsstatus bei einem Bindemittelgehalt von 6,50 M-%. Die Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkt eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens der groben Korngrößenverteilung. Im gesamten untersuchten Bereich des Bindemittelgehaltes besaß die grobe Korngrößenverteilung ein besseres Verformungsverhalten. Bei einem Bindemittelgehalt von 6,71 M-% besitzt die grobe Sieblinie die höchste Verformungsbeständigkeit. Die Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkt bei der feinen Korngrößenverteilung eine Verschlechterung der Verformungsbeständigkeit.

Die Ergebnisse der Binderschichtgemische zeigten ein besseres Ermüdungsverhalten des SMA 16 B S, wobei der Bindemittelgehalt im untersuchten Bereich einen sehr geringen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten aufwies. Dagegen bewirkte die Zunahme des Bindemittelgehaltes eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens des AC 16 B S SG. Der stetig gestufte Asphaltbeton besitzt eine bessere Verformungsbeständigkeit gegenüber des SMA 16 B S. Eine Zunahme des Bindemittelgehaltes bewirkte bei beiden Korngrößenverteilungen eine Verschlechterung des Verformungsverhaltens. Des Weiteren konnte anhand der Prognoserechnungen zur Spurrinnenbildung gezeigt werden, dass die Unterschiede der relativen Spurrinne zwischen den einzelnen Binderschichtvarianten deutlich geringer ausgeprägt sind als die der Deckschichtgemische. Damit besitzt die Binderschicht einen geringeren Einfluss auf die Spurrinnenanfälligkeit der Fahrbahnkonstruktion.

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen zeigten ebenfalls, dass es bei allen vier untersuchten Asphaltgemischen jeweils ein Bereich des Bindemittelgehaltes vorhanden ist, in denen sich das Ermüdungs- und das Verformungsverhalten nur geringfügig ändert. Anhand der Laboruntersuchungen und der Prognoserechnung konnte eine Herangehensweise zur Optimierung von Asphaltgemischen für zukünftige schwerste Verkehrsbelastung aufgestellt werden.

Aufgrund einer fehlenden Kalibrierung der Prognoserechnung der Ermüdungsrissbildung für die Deck- bzw. für die Binderschicht, sowie die fehlende Validierung der Verfahrensweise der Spurrinnenbildung konnten die Ergebnisse nur als Relativwerte angegeben werden. Zur Ermittlung der Auswirkung der Asphaltgemische auf ihre Nutzungsdauer bzw. auf Erhaltungs-/Erneuerungsintervalle ist es wünschenswert, dass die Verfahren in Zukunft kalibriert bzw. validiert würden. An der TU Dresden wird zurzeit die probabilistische Verfahrensweise für die Nachweisführung der Rissbeständigkeit in der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht weiterentwickelt. Diese Verfahrensweise bietet die Möglichkeit die Variabilität der Materialkenngrößen in dem Berechnungsprozess einzubinden. Basierend auf der jeweiligen Stichprobe werden die charakteristischen Materialkenngrößen statistisch modelliert und durch Klassen diskret abgebildet. Dadurch können Streuungen der Materialeigenschaften im Prognoseprozess der Nutzungsdauer einbezogen werden.

In dieser Arbeit wurde die Optimierung der Asphaltzusammensetzung in Bezug auf die Korngrößenverteilung und des Bindemittelgehaltes durchgeführt. Die festgestellten optimierten Bindemittelgehalte der Asphaltgemische beziehen sich allerdings nur auf die verwendeten Ausgangsstoffe. Bei Verwendung anderer Gesteinskorngemische und Bindemittelsorten kann sich der optimierte Bindemittelgehalt ändern. Somit sollte eine Ausweitung der Optimierung der Asphaltzusammensetzung auf weitere modifizierte und viskositätsveränderte Bindemittel sowie Gesteinskorngemische in weiteren Forschungen mit berücksichtigt werden.

Die Versuchsergebnisse des Darmstädter Polierverfahrens zeigten, dass dieses Prüfverfahren ungeeignet ist zur Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens der Asphaltdeckschichtgemische. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Griffigkeitsverhaltens könnte das Prüfverfahren nach Wehner und Schulze bieten, welches allerdings für die Untersuchungen von Asphaltgemischen modifiziert werden müsste.

## 9 Literaturverzeichnis

[AP Klima und Verkehr]

AP Klima und Verkehr Entwurf 2016; Arbeitspapier Eingangsgrößen für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
unveröffentlicht; Entwurf 2016

[DIN EN 1097, Teil 8]

DIN EN 1097, Teil 8 2009; Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 8: Bestimmung des Polierwertes  
DIN Deutsches Institut für Normierung e.V.  
Beuth Verlag GmbH; Berlin; 2009

[EAB RDO]

Empfehlungen bei der Abwicklung von Bauverträgen bei Anwendung der RDO Asphalt  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag GmbH; Köln; 2011

[H AI ABi 2015]

H AI ABi 2015; Hinweise für die Planung und Ausführung von Alternativen Asphaltbinderschichten  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag GmbH; Köln; 2015

[RDO 09]

RDO-Asphalt 09; Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächenbefestigung mit Asphaltdeckschichten  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag GmbH; Köln; 2009

[RSO 18]

RSO-Asphalt Entwurf 2018; Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
unveröffentlicht; Entwurf 2018

[RStO 12]

RStO 2012; Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag GmbH; Köln; 2012

[TL Asphalt-StB 07/13]

TL Asphalt-StB 2007; Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag GmbH; Köln; 2013

[TL Bitumen-StB 07]

TL Bitumen-StB 2007; Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag; Köln; 2013

[TL Gestein-StB 04]

TL Gestein-StB 2004; Technische Lieferbedingung für Gesteinskörnungen im Straßenbau  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag; Köln; 2007

[TP Asphalt-StB 07]

TP Asphalt-StB 2007; Technische Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag; Köln; 2007

[TP Asphalt-StB Teil 24; Entwurf 2017]

TP Asphalt-StB Teil 24 Entwurf 2017; Spaltzug-Schwellversuch – Beständigkeit gegen Ermüdung  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
unveröffentlicht; Entwurf 2017

[TP Asphalt-StB Teil 26; Entwurf 2017]

TP Asphalt-StB Teil 26 Entwurf 2017; Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
unveröffentlicht; Entwurf 2017

[TP Griff-StB 07]

TP Griff-StB 2007; Technische Prüfvorschrift für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag GmbH; Köln; 2007

[ZTV Asphalt-StB 07/13]

ZTV Asphalt-StB 2007; Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen  
FGSV Verlag GmbH; Köln; 2013

[Arand 1996]

Arand, W.; Rubach, K.; von der Decken, S.:  
Grundlegende Untersuchungen über den Einfluß der Zusammensetzung auf die Ermüdungsbeständigkeit von Walzasphalten mittels systematischer Variation kompositioneller Merkmale zur Schaffung eines quantitativen Bewertungshintergrundes  
Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik; Heft 717; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen; Bonn; 1996

[Arand 2000]

Arand, W.; Zander, U.; Renken, P.; Büchler, S.:

Einfluss des Bindemittelgehaltes auf das mechanische Verhalten von Splittmastixasphalten mit unterschiedlichen stabilisierenden Zusätzen

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 794; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen; Bonn; 2000

[Bald 2004]

Bald, J. S.; Böhm, S.; Root, V.:

Polierverhalten von Asphaltmischungen – Vergleichende Untersuchungen zur Optimierung der Eignungsprüfung

Asphalt; 39. Jahrgang; Heft 5; Giesel-Verlag GmbH; Isernhagen; 2004

[BedeKovic 1957]

BedeKovic, V.:

Über eine Methode zur Bemessung der erforderlichen Bitumenmenge in Asphaltbelägen

Bitumen; 19. Jahrgang; Heft 5; Urban-Verlag Hamburg/Wien GmbH; 1957

[Behle 2005]

Behle, T.; Jannicke, B.; Radenberg, M.; Schmidt, H.:

Mineralstoffkonzepte mit unterschiedlich polierresistenten Splitten und deren Einfluss auf die Griffigkeitsentwicklung von Splittmastixasphalten

Straße und Autobahn; 56. Jahrgang; Heft 8; Kirchbaum-Verlag GmbH; Bonn; 2005

[Blab 1999]

Blab, R.; Litzka, J.:

Prognose von Spurrinnenausbildung in Asphaltbefestigungen

Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten; Straßenforschung; Heft 485; Wien; 1999

[Büchler 2008]

Büchler, S.; Mollenhauer, K.; Renken, P.:

Einfluss von modifizierten Bitumen auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften von Asphalt und deren Veränderung während der Nutzungsdauer

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 991; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bonn; 2008

[Di Benedetto 2004]

Di Benedetto, H.; de la Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, A.; Lundström, R.:

Fatigue of bituminous mixtures

Materials and Structure; Vol. 37; Springer Verlag; 2004



[Dragon 2011]

Dragon, I.; Wellner, F.:

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; Dresden; 2011

[Dragon 2014]

Dragon, I.; Wellner, F.; Birbaum, J.; Zander, U.:

Grundlagen für die Beurteilung der dimensionierungsrelevanten Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von Oberbaubefestigungen aus Asphalt

Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 07.0236/2010/AGB; Dresden; 2014

[Dragon 2015]

Dragon, I.:

Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf die Ermüdungsbeständigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt

Dissertation; Technische Universität Dresden; 2015

[Dragon 2015b]

Dragon, I.; Reinhardt, U.:

Weiterentwicklung der Ansätze für die Spurrinnenprognose von Asphaltbefestigungen Straße und Autobahn; 66. Jahrgang; Heft 4; Kirchbaum-Verlag; Bonn; 2015

[Eulitz 1987]

Eulitz, H.:

Kälteverhalten von Walzasphalten Prüftechnische Ansprache und Einfluss kompositioneller Merkmale

Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen der TU Braunschweig; Heft 7; Braunschweig; 1987

[Harvey 1996]

Harvey, J.; Tsai, B.-W.:

Effects of Asphalt Content and Air Void Content on Mix Fatigue and Stiffness

Transport Research Record No. 1543; Washington D. C.; 1996

[Hauser 2008]

Hauser, E.:

Asphaltkonstruktionen für hoch belastete Verkehrsflächen

GESTRATA Journal; 25. Jahrgang; Heft 121; Österreich; 2008

[Huschek 2002]

Huschek, S.:

Die Griffigkeitsprognose mit der Verkehrssimulation nach Wehner/Schulze

Bitumen; 64. Jahrgang; Heft 1; Urban-Verlag Hamburg/Wien GmbH; 2002

[Karcher 2005]

Karcher, C.:

Prognose und Bewertung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit dem Druckschwellversuch am Beispiel des Splittmastixasphaltes

Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH); Heft 54; Karlsruhe; 2005

[Kayser 2011]

Kayser, S.; Zeißler, A.; Reinhardt, U.:

Spurrinnenprognose für Asphaltbefestigungen unter Berücksichtigung von Zufallsprozessen

Beitrag zu den 2. Dresdner Asphalttagen; Dresden; 2011

[Lehne 2007]

Lehne, R.:

Griffigkeit von Fahrbahndeckschichten aus Asphalt

Vortrag VSVI Berlin/Brandenburg 07.03.2007

[Leutner 2000]

Leutner, R.; Renken, P.; Lühje, U.:

Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

Schlussbericht des AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11239; Braunschweig; 2000

[Lipke 2011]

Lipke, S.; Wellner, F.; Kayser, S.; Patzak, J.; Werkmeister, S.:

Dimensionierungsrelevante Eingangsgrößen für Asphaltbefestigungen

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 1056; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bonn; 2011

[Lühje 2000]

Nutzungsdauer von Asphalttschichten – Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

Lühje, U.:

Asphalt; 35. Jahrgang; Heft 8; Giesel-Verlag GmbH; Isernhagen; 2000

[Meissner 2007]

Meissner, S.:

Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Asphalten

Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden; Dresden; 2007

[Milliken 2002]

Milliken, G. A.; Johnson, D. E.:

Analysis of messy data, Volume III: Analysis of covariance

Chapmann & Hall/CRC; 2002

[Mollenhauer 2013]

Mollenhauer, K.; Wistuba, M. P.; Walther, A.:

Ermittlung der Streuung dimensionierungsrelevanter Eingangsgrößen für Asphalte  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 1087; Bundesministerium für  
Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bonn; 2013

[Pfeiler 2005]

Pfeiler, A.:

Griffigkeitserhöhung von Asphalten – Der Einfluss feiner Gesteinskörnungen  
Straße und Autobahn; 56. Jahrgang; Heft 8; Kirchbaum-Verlag GmbH; Bonn; 2005

[Radenberg 1996]

Radenberg, M.; Schmitz, J.:

Theoretische Berechnung des Bindemittelbedarfes für dünne Schichten im Kalteinbau  
(DSK)

Bitumen; 58. Jahrgang; Heft 2; Urban-Verlag Hamburg/Wien GmbH; 1996

[Reinhardt 2003]

Reinhardt, I.:

Auswirkungen der Mischgutzusammensetzungen im Rahmen zulässiger Toleranzen auf  
die Standfestigkeit von Asphalt – Untersuchungen mit Hilfe verschiedener Prüfmethode  
Dissertation; bergische Universität Wuppertal; 2003

[Roos 2003]

Roos, R.; Charif, K.; Karcher, C.; Schellenberg, K.; Grätz, B.; Wörner, T.:

Schaffung eines Bewertungshintergrundes zur Prognostizierung der Standfestigkeit von  
Asphalten mit dem Druckschwellversuch – Hauptphase

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 868; Bundesministerium für  
Verkehr, Bau und Wohnungswesen; Bonn; 2003

[Rowe 1993]

Rowe, G.:

Performance of Asphalt Mixtures in the trapezoidal Fatigue Test

Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists; Volume 62; USA; 1993

[Sachs 1999]

Sachs, L.:

Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden

9. Auflage; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg; 1999

[Steinhauer 2006]

Steinhauer, B.; Scharnigg, K.:

Vergleich der prüfverfahren zur Ansprache der Verformungseigenschaften von Asphalt.  
Grundsätzliches und Beitrag zur europäischen Normung

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 959; Bundesministerium für  
Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bonn; 2006

[Toutenburg 2003]

Toutenburg, H.:

Lineare Modelle – Theorie und Anwendung

2. Auflage; Physica Verlag; Heidelberg; 2003

[Weise 2008]

Weise, C.:

Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltgemischen unter Verwendung von ein- und mehraxialen Zugschwellversuchen

Dissertation, technische Universität Dresden; Dresden; 2008

[Wellner 2007]

Wellner, F.; Leutner, R.; Oeser, M.; Weise, C.; Jähnig, 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

Schlussbericht; Bergisch Gladbach; 2007

[Wellner 2016]

Wellner, F.; Wistuba, M. P.; Hristov, B.; Isailovic, I.; Büchler, S.:

Zyklische Scherfestigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen

Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhabens Nr. 17634 BG; Dresden und Braunschweig; 2016

## Anlagenverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Anlage 1: Korngrößenverteilung der Lieferkörnung                         | 128 |
| Anlage 2: Berechnung des Bindemittelbedarfs nach Radenberg und Bedekovic | 129 |
| Anlage 3: Extraktionsergebnisse der Asphaltmischgüter                    | 133 |
| Anlage 4: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen                      | 135 |
| Anlage 5: Ergebnisse der Ermüdungsversuche                               | 173 |
| Anlage 6: Ergebnisse der Tieftemperaturuntersuchungen                    | 183 |
| Anlage 7: Ergebnisse der Versuche zum Verformungsverhalten               | 205 |
| Anlage 8: Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchungen                      | 251 |

**Anlage 1: Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen**

| Sieböffnung<br>[mm]                  | Durchgang<br>[M-%] | Anforderung<br>[M-%] |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 31,5                                 | 100                | 100                  |
| 22,4                                 | 100                | 98-100               |
| 16                                   | 93,9               | 90-99                |
| 11,2                                 | 10,6               | 0-15                 |
| 5,6                                  | 0,6                | 0-5                  |
| 0,063                                | 0,4                | ≤1                   |
| Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]: 2,73 |                    |                      |

Tab.A-1: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 11/16

| Sieböffnung<br>[mm]                  | Durchgang<br>[M-%] | Anforderung<br>[M-%] |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 22,4                                 | 100                | 100                  |
| 16                                   | 100                | 98-100               |
| 11,2                                 | 91,6               | 90-99                |
| 8,0                                  | 13,2               | 0-15                 |
| 4,0                                  | 0,8                | 0-5                  |
| 0,063                                | 0,6                | ≤2                   |
| Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]: 2,73 |                    |                      |

Tab.A-2: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 8/11

| Sieböffnung<br>[mm]                  | Durchgang<br>[M-%] | Anforderung<br>[M-%] |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 16                                   | 100                | 100                  |
| 11,2                                 | 100                | 98-100               |
| 8                                    | 90,2               | 90-99                |
| 5,6                                  | 15,0               | 0-15                 |
| 2,8                                  | 1,5                | 0-5                  |
| 0,063                                | 0,9                | ≤2                   |
| Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]: 2,73 |                    |                      |

Tab.A-3: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 5/8

| Sieböffnung<br>[mm]                  | Durchgang<br>[M-%] | Anforderung<br>[M-%] |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 11,2                                 | 100                | 100                  |
| 8                                    | 100                | 98-100               |
| 5,6                                  | 91,8               | 90-99                |
| 2                                    | 5,2                | 0-10                 |
| 1                                    | 1,6                | 0-2                  |
| 0,063                                | 1,7                | ≤2                   |
| Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]: 2,72 |                    |                      |

Tab.A-4: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 2/5

| Sieböffnung<br>[mm]                  | Durchgang<br>[M-%] | Anforderung<br>[M-%] |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 4                                    | 100                | 100                  |
| 2                                    | 85,3               | 85-99                |
| 0,063                                | 8,6                | ≤16                  |
| Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]: 2,74 |                    |                      |

Tab.A-5: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 0/2

**Anlage 2: Berechnung des Bindemittelbedarfes nach Radenberg und Bedekovic**

SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung

| Kornklasse<br>[mm] | Gesteinsroh<br>dichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Masseanteil<br>[M-%] | Spezifische<br>Oberfläche<br>[cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ] | Oberfläche<br>Mineralstoffe<br>[cm <sup>2</sup> /g] | Anteil schlecht<br>geformter Körner<br>[M-%/100] | Faktor schlecht<br>geformter Körner<br>[cm <sup>2</sup> /100] | Bitumen-<br>filmdicke<br>[g/cm <sup>2</sup> *100] | Bindemittel-<br>bedarf<br>[M-%] |
|--------------------|---|----------------------|--|---|--|---|---|---------------------------------|
| 16,0-11,2          | 2,73  | 0                    | 5  | 0   | 0,0855   | 0   | 1,5   | 0                               |
| 11,2-8,0           | 2,73  | 0,34                 | 7  | 0,871794872   | 0,0638   | 0,020023385   | 1   | 0,891818256                     |
| 8,0-5,0            | 2,73  | 0,18                 | 11,5   | 0,758241758   | 0,074  | 0,02019956  | 0,75  | 0,583830989                     |
| 5,0-2,0            | 2,72  | 0,19                 | 24,5   | 1,711397059   | 0,1714   | 0,10560004  | 0,5   | 0,908498851                     |
| 2,0-1,0            | 2,75  | 0,09                 | 50   | 1,636363636   |  | 0   | 0,345   | 0,564545455                     |
| 1,0-0,5            | 2,66  | 0,03                 | 122,5  | 1,381578947   |  | 0   | 0,23  | 0,317763158                     |
| 0,5-0,25           | 2,65  | 0,03                 | 227,5  | 2,575471698   |  | 0   | 0,115   | 0,296179245                     |
| 0,25-0,125         | 2,68  | 0,01                 | 427,5  | 1,595149254   |  | 0   | 0,064   | 0,102089552                     |
| 0,125-0,063        | 2,73  | 0,01                 | 830  | 3,04029304  |  | 0   | 0,0395  | 0,120091575                     |
| <0,063             | 2,74  | 0,12                 | 5914   | 259,0072993   |  | 0   | 0,0125  | 3,237591241                     |
| Σ                  |   | 1                    |  |   |  |   |   | 7,0                             |

SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

| Kornklasse<br>[mm] | Gesteinsroh<br>dichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Masseanteil<br>[M-%] | Spezifische<br>Oberfläche<br>[cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ] | Oberfläche<br>Mineralstoffe<br>[cm <sup>2</sup> /g] | Anteil schlecht<br>geformter Körner<br>[M-%/100] | Faktor schlecht<br>geformter Körner<br>[cm <sup>2</sup> /100] | Bitumen-<br>filmdicke<br>[g/cm <sup>2</sup> *100] | Bindemittel-<br>bedarf<br>[M-%] |
|--------------------|---|----------------------|--|---|--|---|---|---------------------------------|
| 16,0-11,2          | 2,73  | 0,1                  | 5  | 0,183150183   | 0,0855   | 0,005637363   | 1,5   | 0,283181319                     |
| 11,2-8,0           | 2,73  | 0,38                 | 7  | 0,974358974   | 0,0638   | 0,022379077   | 1   | 0,996738051                     |
| 8,0-5,0            | 2,73  | 0,17                 | 11,5   | 0,716117216   | 0,074  | 0,019077363   | 0,75  | 0,551395934                     |
| 5,0-2,0            | 2,72  | 0,15                 | 24,5   | 1,351102941   | 0,1714   | 0,083368456   | 0,5   | 0,717235699                     |
| 2,0-1              | 2,75  | 0,05                 | 50   | 0,909090909   |  | 0   | 0,345   | 0,313636364                     |
| 1-0,5              | 2,66  | 0,025                | 122,5  | 1,151315789   |  | 0   | 0,23  | 0,264802632                     |
| 0,5-0,25           | 2,65  | 0,025                | 227,5  | 2,146226415   |  | 0   | 0,115   | 0,246816038                     |
| 0,25-0,125         | 2,68  | 0,01                 | 427,5  | 1,595149254   |  | 0   | 0,064   | 0,102089552                     |
| 0,125-0,063        | 2,73  | 0,01                 | 830  | 3,04029304  |  | 0   | 0,0395  | 0,120091575                     |
| <0,063             | 2,74  | 0,08                 | 5914   | 172,6715328   |  | 0   | 0,0125  | 2,158394161                     |
| Σ                  |   | 1                    |  |   |  |   |   | 5,8                             |



## AC 16 B S SG

| Kornklasse<br>[mm] | Gesteinsroh<br>dichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Masseanteil<br>[M-%] | Spezifische<br>Oberfläche<br>[cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ] | Oberfläche<br>Mineralstoffe<br>[cm <sup>2</sup> /g] | Anteil schlecht<br>geformter Körner<br>[M-%/100] | Faktor schlecht<br>geformter Körner<br>[cm <sup>2</sup> /100] | Bitumen-<br>filmdicke<br>[g/cm <sup>2</sup> *100] | Bindemittel-<br>bedarf<br>[M-%] |
|--------------------|---|----------------------|--|---|--|---|---|---------------------------------|
| 16,0-11,2          | 2,73  | 0,15                 | 5  | 0,274725275   | 0,0855   | 0,008456044   | 1,5   | 0,424771978                     |
| 11,2-8,0           | 2,73  | 0,15                 | 7  | 0,384615385   | 0,0638   | 0,008833846   | 1   | 0,393449231                     |
| 8,0-5,6            | 2,73  | 0,1                  | 11,5   | 0,421245421   | 0,074  | 0,0112221978  | 0,75  | 0,324350549                     |
| 5,6-2,0            | 2,72  | 0,25                 | 24,5   | 2,251838235   | 0,1714   | 0,138947426   | 0,5   | 1,195392831                     |
| 2,0-1              | 2,75  | 0,08                 | 50   | 1,454545455   |  | 0   | 0,345   | 0,501818182                     |
| 1-0,5              | 2,66  | 0,06                 | 122,5  | 2,763157895   |  | 0   | 0,23  | 0,635526316                     |
| 0,5-0,25           | 2,65  | 0,04                 | 227,5  | 3,433962264   |  | 0   | 0,115   | 0,39490566                      |
| 0,25-0,125         | 2,68  | 0,05                 | 427,5  | 7,975746269   |  | 0   | 0,064   | 0,510447761                     |
| 0,125-0,063        | 2,73  | 0,04                 | 830  | 12,16117216   |  | 0   | 0,0395  | 0,4803663                       |
| <0,063             | 2,74  | 0,08                 | 5914   | 172,6715328   |  | 0   | 0,0125  | 2,158394161                     |
| Σ                  |   | 1                    |  |   |  |   |   | 7,0                             |

## SMA 16 B S

| Kornklasse<br>[mm] | Gesteinsroh<br>dichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Masseanteil<br>[M-%] | Spezifische<br>Oberfläche<br>[cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ] | Oberfläche<br>Mineralstoffe<br>[cm <sup>2</sup> /g] | Anteil schlecht<br>geformter Körner<br>[M-%/100] | Faktor schlecht<br>geformter Körner<br>[cm <sup>2</sup> /100] | Bitumen-<br>filmdicke<br>[g/cm <sup>2</sup> *100] | Bindemittel-<br>bedarf<br>[M-%] |
|--------------------|---|----------------------|--|---|--|---|---|---------------------------------|
| 16,0-11,2          | 2,73  | 0,37                 | 5  | 0,677655678   | 0,0855   | 0,020858242   | 1,4   | 0,977919487                     |
| 11,2-8,0           | 2,73  | 0,17                 | 7  | 0,435897436   | 0,0638   | 0,010011692   | 1   | 0,445909128                     |
| 8,0-5,0            | 2,73  | 0,06                 | 11   | 0,241758242   | 0,074  | 0,00644044  | 0,75  | 0,186149011                     |
| 5,0-2,0            | 2,72  | 0,15                 | 24   | 1,323529412   | 0,1714   | 0,081667059   | 0,5   | 0,702598235                     |
| 2,0-1              | 2,75  | 0,06                 | 50   | 1,090909091   |  | 0   | 0,295   | 0,321818182                     |
| 1-0,5              | 2,66  | 0,04                 | 87   | 1,308270677   |  | 0   | 0,175   | 0,228947368                     |
| 0,5-0,25           | 2,65  | 0,03                 | 199  | 2,252830189   |  | 0   | 0,115   | 0,259075472                     |
| 0,25-0,125         | 2,68  | 0,03                 | 445  | 4,981343284   |  | 0   | 0,069   | 0,343712687                     |
| 0,125-0,063        | 2,73  | 0,03                 | 800  | 8,791208791   |  | 0   | 0,0395  | 0,347252747                     |
| <0,063             | 2,74  | 0,06                 | 5914   | 129,5036496   |  | 0   | 0,0125  | 1,61879562                      |
| Σ                  |   | 1                    |  |   |  |   |   | 5,4                             |

**Anlage 3: Extraktionsergebnisse der Asphaltmischgüter**

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung

| Sieböffnung<br>[mm]     | SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung (Bitumen 25/55-55A) |                |                |                |                |                |
|-------------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                         | Soll   | 1.<br>Variante | 2.<br>Variante | 3.<br>Variante | 4.<br>Variante | 5.<br>Variante |
| 16,0                    | 100  | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            |
| 11,2                    | 100  | 98,7           | 99,1           | 99,1           | 99,4           | 100            |
| 8,0                     | 65   | 61,7           | 61,3           | 61,3           | 62,6           | 60,6           |
| 5,6                     | 45   | 47,7           | 46,2           | 48,9           | 48,9           | 49,2           |
| 2,0                     | 30   | 30,7           | 28,5           | 30,3           | 32,8           | 30,9           |
| 0,063                   | 12   | 12,6           | 12,7           | 11,5           | 11,9           | 12,5           |
| Bindemittelgehalt [M-%] |  | 6,03           | 6,50           | 6,79           | 7,52           | 8,02           |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

| Sieböffnung<br>[mm]     | SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung (Bitumen 25/55-55A) |             |             |             |             |
|-------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                         | Soll   | 1. Variante | 2. Variante | 3. Variante | 4. Variante |
| 16,0                    | 100  | 100         | 100         | 100         | 100         |
| 11,2                    | 100  | 97,4        | 98,8        | 97,9        | 99,2        |
| 8,0                     | 50   | 50,8        | 51,9        | 51,8        | 53,0        |
| 5,6                     | 35   | 36,1        | 36,2        | 35,1        | 36,3        |
| 2,0                     | 20   | 16,8        | 17,2        | 17,9        | 19,1        |
| 0,063                   | 8  | 7,6         | 8,1         | 8,4         | 8,4         |
| Bindemittelgehalt [M-%] |  | 5,61        | 6,42        | 6,71        | 7,76        |

## SMA 11 S: alternative Bindemittelsorte

| Sieböffnung<br>[mm]     | SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung |                   |                   |
|-------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                         | Soll                                 | Bitumen 25/55-55A | Bitumen 10/40-65A |
| 16,0                    | 100                                  | 100               | 100               |
| 11,2                    | 100                                  | 99,1              | 97,7              |
| 8,0                     | 65                                   | 61,3              | 61,2              |
| 5,6                     | 45                                   | 48,9              | 47,0              |
| 2,0                     | 30                                   | 30,3              | 32,3              |
| 0,063                   | 12                                   | 11,5              | 11,6              |
| Bindemittelgehalt [M-%] |                                      | 6,79              | 7,01              |

## AC 16 B S SG

| Sieböffnung<br>[mm]     | AC 16 B S SG (Bitumen 10/40-65A) |                |                |                |                |                |
|-------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                         | Soll                             | 1.<br>Variante | 2.<br>Variante | 3.<br>Variante | 4.<br>Variante | 5.<br>Variante |
| 22,4                    | 100                              | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            |
| 16,0                    | 100                              | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            |
| 11,2                    | 85                               | 84,0           | 84,8           | 85,1           | 82,7           | 83,8           |
| 8,0                     | 70                               | 65,9           | 67,8           | 68,1           | 69,1           | 68,8           |
| 2,0                     | 35                               | 36,3           | 36,6           | 35,2           | 33,2           | 36,1           |
| 0,125                   | 12                               | 8,7            | 8,4            | 9,8            | 8,3            | 7,8            |
| 0,063                   | 8                                | 6,8            | 6,6            | 7,8            | 6,5            | 6,4            |
| Bindemittelgehalt [M-%] |                                  | 4,75           | 5,00           | 5,68           | 5,98           | 6,55           |

## SMA 16 B S

| Sieböffnung<br>[mm]     | SMA 16 B S (Bitumen 10/40-65A) |             |             |             |             |
|-------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                         | Soll                           | 1. Variante | 2. Variante | 3. Variante | 4. Variante |
| 22,4                    | 100                            | 100         | 100         | 100         | 100         |
| 16,0                    | 100                            | 100         | 99,1        | 99,0        | 99,5        |
| 11,2                    | 63                             | 69,2        | 67,6        | 67,0        | 61,2        |
| 8,0                     | 46                             | 46,8        | 47,6        | 49,1        | 43,3        |
| 2,0                     | 25                             | 25,3        | 26,9        | 27,9        | 26,2        |
| 0,063                   | 6                              | 8,0         | 6,3         | 6,4         | 6,7         |
| Bindemittelgehalt [M-%] |                                | 5,17        | 5,47        | 6,03        | 6,10        |

## AC 16 B S SG: alternative Bindemittelsorte

| Sieböffnung<br>[mm]     | AC 16 B S SG |                   |                   |
|-------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
|                         | Soll         | Bitumen 25/55-55A | Bitumen 10/40-65A |
| 22,4                    | 100          | 100               | 100               |
| 16,0                    | 100          | 99,0              | 100               |
| 11,2                    | 85           | 87,2              | 84,8              |
| 8,0                     | 70           | 68,4              | 67,8              |
| 2,0                     | 35           | 38,1              | 36,6              |
| 0,125                   | 12           | 11,5              | 8,4               |
| 0,063                   | 8            | 10,3              | 6,6               |
| Bindemittelgehalt [M-%] |              | 5,28              | 5,00              |

**Anlage 4: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen**

SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt: 6,03 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-1-06 | -10  | 10   | 1,582                | 0,0615     | 25.735,90            | 0,094        |
| D2-1-06 | -10  | 5    | 1,518                | 0,0592     | 25.632,60            | 0,0676       |
| D2-1-06 | -10  | 3    | 1,464                | 0,0599     | 24.458,30            | 0,0923       |
| D2-1-06 | -10  | 1    | 1,404                | 0,0622     | 22.567,80            | 0,0921       |
| D2-1-06 | -10  | 0,3  | 1,348                | 0,0651     | 20.688,80            | 0,1128       |
| D2-1-06 | -10  | 0,1  | 1,3                  | 0,0684     | 19.009,30            | 0,1275       |
| D2-1-13 | -10  | 10   | 1,672                | 0,0648     | 25.793,30            | 0,0609       |
| D2-1-13 | -10  | 5    | 1,573                | 0,0624     | 25.216,50            | 0,1075       |
| D2-1-13 | -10  | 3    | 1,514                | 0,066      | 22.922,20            | 0,06         |
| D2-1-13 | -10  | 1    | 1,402                | 0,0635     | 22.076,70            | 0,113        |
| D2-1-13 | -10  | 0,3  | 1,347                | 0,0666     | 20.234,50            | 0,1373       |
| D2-1-13 | -10  | 0,1  | 1,3                  | 0,0698     | 18.607,00            | 0,1421       |
| D2-1-20 | -10  | 10   | 1,679                | 0,0606     | 27.689,00            | 0,022        |
| D2-1-20 | -10  | 5    | 1,562                | 0,0572     | 27.308,50            | 0,1202       |
| D2-1-20 | -10  | 3    | 1,514                | 0,0577     | 26.234,40            | 0,0807       |
| D2-1-20 | -10  | 1    | 1,404                | 0,0587     | 23.899,40            | 0,1075       |
| D2-1-20 | -10  | 0,3  | 1,346                | 0,06       | 22.421,90            | 0,1384       |
| D2-1-20 | -10  | 0,1  | 1,298                | 0,0637     | 20.374,00            | 0,1424       |
| D2-1-06 | 5    | 10   | 0,973                | 0,0679     | 14.326,40            | 0,1729       |
| D2-1-06 | 5    | 5    | 0,917                | 0,0692     | 13.248,90            | 0,1948       |
| D2-1-06 | 5    | 3    | 0,866                | 0,0655     | 13.210,00            | 0,2128       |
| D2-1-06 | 5    | 1    | 0,751                | 0,0678     | 11.078,00            | 0,2358       |
| D2-1-06 | 5    | 0,3  | 0,646                | 0,0697     | 9.267,50             | 0,2694       |
| D2-1-06 | 5    | 0,1  | 0,518                | 0,0672     | 7.706,00             | 0,3248       |
| D2-1-13 | 5    | 10   | 1,082                | 0,069      | 15.684,00            | 0,1521       |
| D2-1-13 | 5    | 5    | 0,969                | 0,0638     | 15.187,10            | 0,1931       |
| D2-1-13 | 5    | 3    | 0,865                | 0,0631     | 13.701,90            | 0,1791       |
| D2-1-13 | 5    | 1    | 0,753                | 0,0627     | 12.009,30            | 0,2434       |
| D2-1-13 | 5    | 0,3  | 0,647                | 0,0664     | 9.750,00             | 0,2785       |
| D2-1-13 | 5    | 0,1  | 0,518                | 0,0634     | 8.168,90             | 0,332        |
| D2-1-20 | 5    | 10   | 1,073                | 0,0686     | 15.650,30            | 0,2217       |
| D2-1-20 | 5    | 5    | 0,964                | 0,0688     | 14.016,20            | 0,1823       |
| D2-1-20 | 5    | 3    | 0,861                | 0,0643     | 13.381,70            | 0,2006       |
| D2-1-20 | 5    | 1    | 0,753                | 0,0673     | 11.186,90            | 0,2578       |
| D2-1-20 | 5    | 0,3  | 0,647                | 0,0686     | 9.433,70             | 0,3182       |
| D2-1-20 | 5    | 0,1  | 0,519                | 0,0687     | 7.559,90             | 0,3562       |
| D2-1-06 | 20   | 10   | 0,492                | 0,0677     | 7.262,40             | 0,3201       |
| D2-1-06 | 20   | 5    | 0,465                | 0,0643     | 7.237,90             | 0,4084       |
| D2-1-06 | 20   | 3    | 0,427                | 0,067      | 6.372,60             | 0,4          |
| D2-1-06 | 20   | 1    | 0,321                | 0,066      | 4.861,90             | 0,445        |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-1-06 | 20   | 0,3  | 0,226                | 0,0667     | 3.388,60             | 0,4984       |
| D2-1-06 | 20   | 0,1  | 0,17                 | 0,0718     | 2.372,60             | 0,5398       |
| D2-1-13 | 20   | 10   | 0,517                | 0,0625     | 8.269,50             | 0,3454       |
| D2-1-13 | 20   | 5    | 0,498                | 0,0652     | 7.636,90             | 0,3668       |
| D2-1-13 | 20   | 3    | 0,459                | 0,0719     | 6.392,00             | 0,4305       |
| D2-1-13 | 20   | 1    | 0,321                | 0,0672     | 4.775,10             | 0,4601       |
| D2-1-13 | 20   | 0,3  | 0,224                | 0,0655     | 3.422,70             | 0,5017       |
| D2-1-13 | 20   | 0,1  | 0,147                | 0,0626     | 2.352,70             | 0,547        |
| D2-1-20 | 20   | 10   | 0,487                | 0,0608     | 8.015,30             | 0,3804       |
| D2-1-20 | 20   | 5    | 0,461                | 0,0709     | 6.505,00             | 0,4133       |
| D2-1-20 | 20   | 3    | 0,408                | 0,0645     | 6.322,70             | 0,4382       |
| D2-1-20 | 20   | 1    | 0,3                  | 0,0687     | 4.369,90             | 0,4963       |
| D2-1-20 | 20   | 0,3  | 0,195                | 0,065      | 2.999,90             | 0,5625       |
| D2-1-20 | 20   | 0,1  | 0,146                | 0,0711     | 2.053,40             | 0,618        |
| D2-1-02 | 35   | 10   | 0,182                | 0,0633     | 2.880,80             | 0,5605       |
| D2-1-02 | 35   | 5    | 0,156                | 0,0637     | 2.443,40             | 0,4992       |
| D2-1-02 | 35   | 3    | 0,131                | 0,0645     | 2.036,80             | 0,5327       |
| D2-1-02 | 35   | 1    | 0,095                | 0,0671     | 1.411,30             | 0,5507       |
| D2-1-02 | 35   | 0,3  | 0,07                 | 0,0705     | 998,2                | 0,5248       |
| D2-1-02 | 35   | 0,1  | 0,044                | 0,0588     | 748                  | 0,5477       |
| D2-1-03 | 35   | 10   | 0,181                | 0,0629     | 2.879,20             | 0,5436       |
| D2-1-03 | 35   | 5    | 0,157                | 0,0661     | 2.380,40             | 0,5134       |
| D2-1-03 | 35   | 3    | 0,136                | 0,0674     | 2.018,90             | 0,5252       |
| D2-1-03 | 35   | 1    | 0,098                | 0,0688     | 1.418,10             | 0,5623       |
| D2-1-03 | 35   | 0,3  | 0,063                | 0,0628     | 1.004,00             | 0,5162       |
| D2-1-03 | 35   | 0,1  | 0,052                | 0,0721     | 718,5                | 0,5479       |
| D2-1-22 | 35   | 10   | 0,174                | 0,068      | 2.554,10             | 0,546        |
| D2-1-22 | 35   | 5    | 0,135                | 0,0643     | 2.106,00             | 0,5568       |
| D2-1-22 | 35   | 3    | 0,115                | 0,0615     | 1.870,60             | 0,5203       |
| D2-1-22 | 35   | 1    | 0,078                | 0,0613     | 1.264,00             | 0,5655       |
| D2-1-22 | 35   | 0,3  | 0,054                | 0,0583     | 931,4                | 0,6036       |
| D2-1-22 | 35   | 0,1  | 0,047                | 0,0735     | 640,9                | 0,6515       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                19 [N\mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                31.308 [N\mm<sup>2</sup>]  
 m                     25.531 [-]  
 b1                    -0,66275688 [-]  
 b2                    1,83275181 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,99 [-]

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt: 6,50 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-2-11 | -10  | 10   | 1,28                 | 0,0646     | 19.796,50            | 0,0551       |
| D2-2-11 | -10  | 5    | 1,162                | 0,0588     | 19.743,50            | 0,1424       |
| D2-2-11 | -10  | 3    | 1,161                | 0,0612     | 18.978,10            | 0,1252       |
| D2-2-11 | -10  | 1    | 1,054                | 0,0596     | 17.689,90            | 0,1294       |
| D2-2-11 | -10  | 0,3  | 0,947                | 0,0588     | 16.118,60            | 0,1448       |
| D2-2-11 | -10  | 0,1  | 0,899                | 0,0601     | 14.955,80            | 0,1702       |
| D2-2-10 | -10  | 10   | 1,276                | 0,067      | 19.042,50            | 0,1407       |
| D2-2-10 | -10  | 5    | 1,218                | 0,0663     | 18.378,50            | 0,107        |
| D2-2-10 | -10  | 3    | 1,161                | 0,0666     | 17.429,40            | 0,0947       |
| D2-2-10 | -10  | 1    | 1,051                | 0,0649     | 16.210,80            | 0,1037       |
| D2-2-10 | -10  | 0,3  | 0,947                | 0,0628     | 15.083,90            | 0,1308       |
| D2-2-10 | -10  | 0,1  | 0,899                | 0,0663     | 13.561,00            | 0,1602       |
| D2-2-15 | -10  | 10   | 1,369                | 0,0627     | 21.837,20            | 0,0882       |
| D2-2-15 | -10  | 5    | 1,265                | 0,0616     | 20.536,90            | 0,0907       |
| D2-2-15 | -10  | 3    | 1,161                | 0,0588     | 19.730,50            | 0,0917       |
| D2-2-15 | -10  | 1    | 1,1                  | 0,056      | 19.626,70            | 0,1028       |
| D2-2-15 | -10  | 0,3  | 1,047                | 0,0596     | 17.582,70            | 0,1065       |
| D2-2-15 | -10  | 0,1  | 0,947                | 0,0591     | 16.029,30            | 0,1336       |
| D2-2-11 | 5    | 10   | 0,878                | 0,061      | 14.388,00            | 0,1465       |
| D2-2-11 | 5    | 5    | 0,825                | 0,0614     | 13.430,70            | 0,126        |
| D2-2-11 | 5    | 3    | 0,76                 | 0,0599     | 12.686,10            | 0,1661       |
| D2-2-11 | 5    | 1    | 0,705                | 0,0654     | 10.777,00            | 0,2045       |
| D2-2-11 | 5    | 0,3  | 0,628                | 0,0698     | 9.003,90             | 0,255        |
| D2-2-11 | 5    | 0,1  | 0,5                  | 0,0687     | 7.283,40             | 0,2769       |
| D2-2-10 | 5    | 10   | 0,926                | 0,065      | 14.252,20            | 0,1745       |
| D2-2-10 | 5    | 5    | 0,871                | 0,0614     | 14.178,60            | 0,16         |
| D2-2-10 | 5    | 3    | 0,808                | 0,062      | 13.019,70            | 0,2098       |
| D2-2-10 | 5    | 1    | 0,724                | 0,0627     | 11.547,00            | 0,2454       |
| D2-2-10 | 5    | 0,3  | 0,616                | 0,064      | 9.629,70             | 0,285        |
| D2-2-10 | 5    | 0,1  | 0,498                | 0,0632     | 7.874,40             | 0,3206       |
| D2-2-15 | 5    | 10   | 0,878                | 0,0604     | 14.525,30            | 0,118        |
| D2-2-15 | 5    | 5    | 0,809                | 0,0627     | 12.892,20            | 0,2118       |
| D2-2-15 | 5    | 3    | 0,781                | 0,0634     | 12.317,10            | 0,229        |
| D2-2-15 | 5    | 1    | 0,703                | 0,0648     | 10.843,40            | 0,2485       |
| D2-2-15 | 5    | 0,3  | 0,617                | 0,0702     | 8.790,50             | 0,2753       |
| D2-2-15 | 5    | 0,1  | 0,487                | 0,0688     | 7.077,40             | 0,3184       |
| D2-2-11 | 20   | 10   | 0,488                | 0,0701     | 6.963,50             | 0,3522       |
| D2-2-11 | 20   | 5    | 0,431                | 0,0691     | 6.240,40             | 0,4281       |
| D2-2-11 | 20   | 3    | 0,375                | 0,0688     | 5.447,20             | 0,4227       |
| D2-2-11 | 20   | 1    | 0,27                 | 0,069      | 3.910,00             | 0,4856       |
| D2-2-11 | 20   | 0,3  | 0,194                | 0,0718     | 2.708,90             | 0,5376       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-2-11 | 20   | 0,1  | 0,116                | 0,0598     | 1.937,80             | 0,5609       |
| D2-2-10 | 20   | 10   | 0,495                | 0,0662     | 7.470,90             | 0,3813       |
| D2-2-10 | 20   | 5    | 0,436                | 0,0669     | 6.514,60             | 0,4188       |
| D2-2-10 | 20   | 3    | 0,38                 | 0,0674     | 5.639,70             | 0,3787       |
| D2-2-10 | 20   | 1    | 0,271                | 0,0645     | 4.204,00             | 0,4554       |
| D2-2-10 | 20   | 0,3  | 0,186                | 0,063      | 2.957,70             | 0,4987       |
| D2-2-10 | 20   | 0,1  | 0,127                | 0,059      | 2.157,70             | 0,5451       |
| D2-2-15 | 20   | 10   | 0,504                | 0,0663     | 7.605,80             | 0,3539       |
| D2-2-15 | 20   | 5    | 0,437                | 0,0661     | 6.617,50             | 0,4196       |
| D2-2-15 | 20   | 3    | 0,381                | 0,0636     | 5.991,20             | 0,406        |
| D2-2-15 | 20   | 1    | 0,271                | 0,062      | 4.369,80             | 0,4786       |
| D2-2-15 | 20   | 0,3  | 0,185                | 0,06       | 3.085,30             | 0,5285       |
| D2-2-15 | 20   | 0,1  | 0,148                | 0,0675     | 2.192,90             | 0,5687       |
| D2-2-16 | 35   | 10   | 0,172                | 0,0607     | 2.833,10             | 0,5271       |
| D2-2-16 | 35   | 5    | 0,148                | 0,0618     | 2.388,20             | 0,4906       |
| D2-2-16 | 35   | 3    | 0,125                | 0,0607     | 2.056,20             | 0,5063       |
| D2-2-16 | 35   | 1    | 0,098                | 0,0682     | 1.440,30             | 0,5464       |
| D2-2-16 | 35   | 0,3  | 0,065                | 0,0647     | 1.007,40             | 0,5533       |
| D2-2-16 | 35   | 0,1  | 0,048                | 0,0658     | 726,9                | 0,5785       |
| D2-2-18 | 35   | 10   | 0,175                | 0,0634     | 2.759,30             | 0,5151       |
| D2-2-18 | 35   | 5    | 0,149                | 0,0646     | 2.301,00             | 0,5561       |
| D2-2-18 | 35   | 3    | 0,124                | 0,0627     | 1.979,90             | 0,5233       |
| D2-2-18 | 35   | 1    | 0,099                | 0,0722     | 1.370,00             | 0,5729       |
| D2-2-18 | 35   | 0,3  | 0,065                | 0,0687     | 953,5                | 0,5623       |
| D2-2-18 | 35   | 0,1  | 0,046                | 0,0651     | 709,2                | 0,5676       |
| D2-2-24 | 35   | 10   | 0,173                | 0,0599     | 2.894,50             | 0,5186       |
| D2-2-24 | 35   | 5    | 0,159                | 0,0699     | 2.272,10             | 0,5293       |
| D2-2-24 | 35   | 3    | 0,125                | 0,0638     | 1.952,00             | 0,5503       |
| D2-2-24 | 35   | 1    | 0,098                | 0,0703     | 1.400,70             | 0,5624       |
| D2-2-24 | 35   | 0,3  | 0,064                | 0,0647     | 990,3                | 0,5632       |
| D2-2-24 | 35   | 0,1  | 0,046                | 0,065      | 712                  | 0,6015       |

Tr                    20 [°C]  
E\_min                31 [N\mm<sup>2</sup>]  
E\_max                24.881 [N\mm<sup>2</sup>]  
m                     23.348 [-]  
b1                    -0,666037 [-]  
b2                    1,62763846 [-]  
R<sup>2</sup>                    0,986 [-]



## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt: 6,79 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-3-09 | -10  | 10   | 1,463                | 0,0671     | 21.802,40            | 0,0858       |
| D2-3-09 | -10  | 5    | 1,415                | 0,0645     | 21.939,20            | 0,1052       |
| D2-3-09 | -10  | 3    | 1,363                | 0,0637     | 21.390,20            | 0,1185       |
| D2-3-09 | -10  | 1    | 1,257                | 0,0626     | 20.097,00            | 0,1154       |
| D2-3-09 | -10  | 0,3  | 1,154                | 0,0645     | 17.912,50            | 0,1312       |
| D2-3-09 | -10  | 0,1  | 1,056                | 0,0641     | 16.468,30            | 0,1544       |
| D2-3-12 | -10  | 10   | 1,468                | 0,0626     | 23.442,90            | 0,0574       |
| D2-3-12 | -10  | 5    | 1,415                | 0,0635     | 22.285,10            | 0,0688       |
| D2-3-12 | -10  | 3    | 1,36                 | 0,0622     | 21.844,20            | 0,104        |
| D2-3-12 | -10  | 1    | 1,258                | 0,0632     | 19.922,60            | 0,1358       |
| D2-3-12 | -10  | 0,3  | 1,154                | 0,0629     | 18.348,80            | 0,1525       |
| D2-3-12 | -10  | 0,1  | 1,055                | 0,0641     | 16.456,60            | 0,1287       |
| D2-3-14 | -10  | 10   | 1,469                | 0,0615     | 23.878,20            | 0,1318       |
| D2-3-14 | -10  | 5    | 1,415                | 0,0602     | 23.501,80            | 0,1111       |
| D2-3-14 | -10  | 3    | 1,362                | -0,0613    | 22.222,20            | 0,1236       |
| D2-3-14 | -10  | 1    | 1,258                | 0,0599     | 21.018,20            | 0,1162       |
| D2-3-14 | -10  | 0,3  | 1,205                | 0,0625     | 19.265,50            | 0,1377       |
| D2-3-14 | -10  | 0,1  | 1,105                | 0,061      | 18.125,40            | 0,1355       |
| D2-3-09 | 5    | 10   | 0,913                | 0,0675     | 13.532,60            | 0,1646       |
| D2-3-09 | 5    | 5    | 0,864                | 0,0695     | 12.440,60            | 0,2111       |
| D2-3-09 | 5    | 3    | 0,811                | 0,0695     | 11.666,50            | 0,2225       |
| D2-3-09 | 5    | 1    | 0,646                | 0,0653     | 9.889,30             | 0,2394       |
| D2-3-09 | 5    | 0,3  | 0,55                 | 0,0682     | 8.066,90             | 0,2826       |
| D2-3-09 | 5    | 0,1  | 0,454                | 0,0689     | 6.591,70             | 0,3032       |
| D2-3-12 | 5    | 10   | 0,914                | 0,0628     | 14.560,50            | 0,1977       |
| D2-3-12 | 5    | 5    | 0,865                | 0,0657     | 13.156,90            | 0,2071       |
| D2-3-12 | 5    | 3    | 0,811                | 0,065      | 12.476,10            | 0,2108       |
| D2-3-12 | 5    | 1    | 0,656                | 0,0612     | 10.711,80            | 0,2448       |
| D2-3-12 | 5    | 0,3  | 0,553                | 0,0634     | 8.735,80             | 0,2815       |
| D2-3-12 | 5    | 0,1  | 0,454                | 0,0633     | 7.168,40             | 0,3151       |
| D2-3-14 | 5    | 10   | 0,913                | 0,0647     | 14.124,00            | 0,1965       |
| D2-3-14 | 5    | 5    | 0,864                | 0,0657     | 13.148,10            | 0,213        |
| D2-3-14 | 5    | 3    | 0,812                | 0,0667     | 12.183,80            | 0,1804       |
| D2-3-14 | 5    | 1    | 0,655                | 0,0636     | 10.298,60            | 0,2302       |
| D2-3-14 | 5    | 0,3  | 0,553                | 0,064      | 8.636,50             | 0,2569       |
| D2-3-14 | 5    | 0,1  | 0,455                | 0,0631     | 7.212,10             | 0,3087       |
| D2-3-09 | 20   | 10   | 0,385                | 0,0702     | 5.491,00             | 0,3314       |
| D2-3-09 | 20   | 5    | 0,334                | 0,0702     | 4.761,20             | 0,3641       |
| D2-3-09 | 20   | 3    | 0,294                | 0,0678     | 4.331,50             | 0,3731       |
| D2-3-09 | 20   | 1    | 0,213                | 0,0614     | 3.470,70             | 0,4118       |
| D2-3-09 | 20   | 0,3  | 0,184                | 0,0727     | 2.526,00             | 0,4201       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-3-09 | 20   | 0,1  | 0,114                | 0,0617     | 1.845,60             | 0,4737       |
| D2-3-12 | 20   | 10   | 0,363                | 0,0714     | 5.084,70             | 0,3641       |
| D2-3-12 | 20   | 5    | 0,314                | 0,0677     | 4.636,70             | 0,3784       |
| D2-3-12 | 20   | 3    | 0,264                | 0,0675     | 3.910,70             | 0,4075       |
| D2-3-12 | 20   | 1    | 0,214                | 0,0702     | 3.043,10             | 0,4259       |
| D2-3-12 | 20   | 0,3  | 0,164                | 0,0732     | 2.234,30             | 0,4515       |
| D2-3-12 | 20   | 0,1  | 0,114                | 0,0658     | 1.728,40             | 0,4756       |
| D2-3-14 | 20   | 10   | 0,346                | 0,0661     | 5.240,50             | 0,3399       |
| D2-3-14 | 20   | 5    | 0,312                | 0,0696     | 4.488,30             | 0,3445       |
| D2-3-14 | 20   | 3    | 0,26                 | 0,0607     | 4.289,40             | 0,3562       |
| D2-3-14 | 20   | 1    | 0,207                | 0,0633     | 3.277,60             | 0,4108       |
| D2-3-14 | 20   | 0,3  | 0,155                | 0,063      | 2.465,50             | 0,4574       |
| D2-3-14 | 20   | 0,1  | 0,136                | 0,0728     | 1.863,00             | 0,4991       |
| D2-3-02 | 35   | 10   | 0,165                | 0,0673     | 2.459                | 0,4726       |
| D2-3-02 | 35   | 5    | 0,132                | 0,0638     | 2.076                | 0,4954       |
| D2-3-02 | 35   | 3    | 0,113                | 0,0639     | 1.766                | 0,4722       |
| D2-3-02 | 35   | 1    | 0,093                | 0,0711     | 1.308                | 0,5523       |
| D2-3-02 | 35   | 0,3  | 0,062                | 0,0676     | 919                  | 0,6188       |
| D2-3-02 | 35   | 0,1  | 0,043                | 0,0636     | 671                  | 0,6955       |
| D2-3-08 | 35   | 10   | 0,164                | 0,0625     | 2.626                | 0,5114       |
| D2-3-08 | 35   | 5    | 0,144                | 0,0644     | 2.229                | 0,5042       |
| D2-3-08 | 35   | 3    | 0,113                | 0,0602     | 1.872                | 0,5092       |
| D2-3-08 | 35   | 1    | 0,082                | 0,0612     | 1.342                | 0,5874       |
| D2-3-08 | 35   | 0,3  | 0,061                | 0,0633     | 964                  | 0,645        |
| D2-3-08 | 35   | 0,1  | 0,042                | 0,0608     | 687                  | 0,7238       |
| D2-3-23 | 35   | 10   | 0,165                | 0,068      | 2.424                | 0,5078       |
| D2-3-23 | 35   | 5    | 0,133                | 0,0647     | 2.061                | 0,4726       |
| D2-3-23 | 35   | 3    | 0,114                | 0,0628     | 1.811                | 0,4789       |
| D2-3-23 | 35   | 1    | 0,082                | 0,0655     | 1.259                | 0,6075       |
| D2-3-23 | 35   | 0,3  | 0,061                | 0,0702     | 871                  | 0,6722       |
| D2-3-23 | 35   | 0,1  | 0,042                | 0,0637     | 660                  | 0,7075       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                26.917 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                    27.361 [-]  
 b1                    -0,6341691 [-]  
 b2                    1,83822575 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,995 [-]

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt: 7,52 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-4-13 | -10  | 10   | 1,368                | 0,0649     | 21.069,30            | 0,117        |
| D2-4-13 | -10  | 5    | 1,312                | 0,0641     | 20.483,30            | 0,1011       |
| D2-4-13 | -10  | 3    | 1,262                | 0,0626     | 20.142,70            | 0,0862       |
| D2-4-13 | -10  | 1    | 1,156                | 0,0634     | 18.249,90            | 0,1227       |
| D2-4-13 | -10  | 0,3  | 1,054                | 0,0634     | 16.623,70            | 0,1374       |
| D2-4-13 | -10  | 0,1  | 0,955                | 0,0633     | 15.090,40            | 0,1645       |
| D2-4-18 | -10  | 10   | 1,267                | 0,0656     | 19.310,90            | 0,0975       |
| D2-4-18 | -10  | 5    | 1,214                | 0,0661     | 18.356,90            | 0,0891       |
| D2-4-18 | -10  | 3    | 1,161                | 0,0663     | 17.507,80            | 0,1123       |
| D2-4-18 | -10  | 1    | 1,057                | 0,0657     | 16.100,70            | 0,1137       |
| D2-4-18 | -10  | 0,3  | 0,953                | 0,0646     | 14.757,30            | 0,1678       |
| D2-4-18 | -10  | 0,1  | 0,854                | 0,0639     | 13.372,10            | 0,1781       |
| D2-4-09 | -10  | 10   | 1,375                | 0,0611     | 22.497,70            | 0,1021       |
| D2-4-09 | -10  | 5    | 1,313                | 0,0605     | 21.701,40            | 0,0873       |
| D2-4-09 | -10  | 3    | 1,261                | 0,0619     | 20.386,30            | 0,0887       |
| D2-4-09 | -10  | 1    | 1,159                | 0,0602     | 19.235,80            | 0,0911       |
| D2-4-09 | -10  | 0,3  | 1,054                | 0,06       | 17.571,80            | 0,1231       |
| D2-4-09 | -10  | 0,1  | 1,005                | 0,0625     | 16.066,80            | 0,1591       |
| D2-4-13 | 5    | 10   | 0,867                | 0,0634     | 13.687,70            | 0,1817       |
| D2-4-13 | 5    | 5    | 0,811                | 0,0668     | 12.136,60            | 0,1964       |
| D2-4-13 | 5    | 3    | 0,761                | 0,0699     | 10.878,80            | 0,2695       |
| D2-4-13 | 5    | 1    | 0,656                | 0,0706     | 9.293,30             | 0,2418       |
| D2-4-13 | 5    | 0,3  | 0,501                | 0,0658     | 7.609,60             | 0,2816       |
| D2-4-13 | 5    | 0,1  | 0,403                | 0,0638     | 6.311,50             | 0,3446       |
| D2-4-18 | 5    | 10   | 0,813                | 0,069      | 11.789,90            | 0,2063       |
| D2-4-18 | 5    | 5    | 0,762                | 0,07       | 10.880,60            | 0,2244       |
| D2-4-18 | 5    | 3    | 0,687                | 0,0683     | 10.068,30            | 0,2423       |
| D2-4-18 | 5    | 1    | 0,554                | 0,0654     | 8.474,20             | 0,2524       |
| D2-4-18 | 5    | 0,3  | 0,45                 | 0,0653     | 6.891,40             | 0,3136       |
| D2-4-18 | 5    | 0,1  | 0,35                 | 0,0634     | 5.522,40             | 0,3691       |
| D2-4-09 | 5    | 10   | 0,915                | 0,0671     | 13.647,90            | 0,1847       |
| D2-4-09 | 5    | 5    | 0,863                | 0,0709     | 12.161,40            | 0,2152       |
| D2-4-09 | 5    | 3    | 0,809                | 0,0699     | 11.581,80            | 0,2325       |
| D2-4-09 | 5    | 1    | 0,653                | 0,0665     | 9.809,00             | 0,2657       |
| D2-4-09 | 5    | 0,3  | 0,547                | 0,0691     | 7.914,50             | 0,2989       |
| D2-4-09 | 5    | 0,1  | 0,449                | 0,0717     | 6.260,70             | 0,343        |
| D2-4-13 | 20   | 10   | 0,293                | 0,0668     | 4.387,30             | 0,3416       |
| D2-4-13 | 20   | 5    | 0,263                | 0,0676     | 3.886,40             | 0,3793       |
| D2-4-13 | 20   | 3    | 0,242                | 0,0708     | 3.415,40             | 0,4109       |
| D2-4-13 | 20   | 1    | 0,176                | 0,0676     | 2.611,90             | 0,4589       |
| D2-4-13 | 20   | 0,3  | 0,135                | 0,0706     | 1.906,30             | 0,4884       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-4-13 | 20   | 0,1  | 0,096                | 0,0664     | 1.452,40             | 0,5048       |
| D2-4-18 | 20   | 10   | 0,295                | 0,0632     | 4.661,30             | 0,3778       |
| D2-4-18 | 20   | 5    | 0,264                | 0,0686     | 3.840,30             | 0,4083       |
| D2-4-18 | 20   | 3    | 0,232                | 0,0686     | 3.373,90             | 0,4213       |
| D2-4-18 | 20   | 1    | 0,177                | 0,0713     | 2.483,90             | 0,4492       |
| D2-4-18 | 20   | 0,3  | 0,124                | 0,0674     | 1.843,00             | 0,4941       |
| D2-4-18 | 20   | 0,1  | 0,086                | 0,0641     | 1.342,80             | 0,5288       |
| D2-4-09 | 20   | 10   | 0,264                | 0,0664     | 3.982,70             | 0,3008       |
| D2-4-09 | 20   | 5    | 0,232                | 0,0681     | 3.411,70             | 0,3482       |
| D2-4-09 | 20   | 3    | 0,211                | 0,0688     | 3.072,30             | 0,3869       |
| D2-4-09 | 20   | 1    | 0,157                | 0,065      | 2.416,20             | 0,418        |
| D2-4-09 | 20   | 0,3  | 0,116                | 0,0647     | 1.786,10             | 0,4713       |
| D2-4-09 | 20   | 0,1  | 0,087                | 0,0642     | 1.348,00             | 0,5169       |
| D2-4-10 | 35   | 10   | 0,135                | 0,0661     | 2.039                | 0,5021       |
| D2-4-10 | 35   | 5    | 0,114                | 0,0679     | 1.675                | 0,5394       |
| D2-4-10 | 35   | 3    | 0,093                | 0,0649     | 1.438                | 0,5452       |
| D2-4-10 | 35   | 1    | 0,063                | 0,0633     | 990                  | 0,6144       |
| D2-4-10 | 35   | 0,3  | 0,042                | 0,0633     | 666                  | 0,7037       |
| D2-4-12 | 35   | 10   | 0,125                | 0,0704     | 1.772                | 0,5152       |
| D2-4-12 | 35   | 5    | 0,114                | 0,078      | 1.466                | 0,545        |
| D2-4-12 | 35   | 3    | 0,094                | 0,0749     | 1.250                | 0,5473       |
| D2-4-12 | 35   | 1    | 0,063                | 0,0708     | 889                  | 0,6432       |
| D2-4-12 | 35   | 0,3  | 0,042                | 0,0756     | 559                  | 0,7314       |
| D2-4-12 | 35   | 0,1  | 0,043                | 0,1257     | 342                  | 0,8549       |
| D2-4-21 | 35   | 10   | 0,135                | 0,078      | 1.731                | 0,5008       |
| D2-4-21 | 35   | 5    | 0,114                | 0,0782     | 1.452                | 0,5459       |
| D2-4-21 | 35   | 3    | 0,094                | 0,073      | 1.285                | 0,5511       |
| D2-4-21 | 35   | 1    | 0,063                | 0,0734     | 857                  | 0,6659       |
| D2-4-21 | 35   | 0,3  | 0,042                | 0,0795     | 530                  | 0,7711       |
| D2-4-21 | 35   | 0,1  | 0,042                | 0,0994     | 426                  | 0,917        |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                23.844 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                    26.144 [-]  
 b1                    -0,7193542 [-]  
 b2                    1,9942869 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,987 [-]

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt: 8,02 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-5-01 | -10  | 10   | 1,24                 | 0,0679     | 18.261,90            | 0,1126       |
| D2-5-01 | -10  | 5    | 1,213                | 0,0687     | 17.649,80            | 0,084        |
| D2-5-01 | -10  | 3    | 1,163                | 0,0681     | 17.089,80            | 0,0965       |
| D2-5-01 | -10  | 1    | 1,061                | 0,0678     | 15.649,80            | 0,1103       |
| D2-5-01 | -10  | 0,3  | 0,96                 | 0,0664     | 14.465,70            | 0,1468       |
| D2-5-01 | -10  | 0,1  | 0,86                 | 0,0673     | 12.781,20            | 0,1515       |
| D2-5-17 | -10  | 10   | 1,241                | 0,0644     | 19.268,60            | 0,0842       |
| D2-5-17 | -10  | 5    | 1,213                | 0,0676     | 17.933,10            | 0,0952       |
| D2-5-17 | -10  | 3    | 1,165                | 0,0652     | 17.866,90            | 0,129        |
| D2-5-17 | -10  | 1    | 1,062                | 0,0646     | 16.449,50            | 0,1294       |
| D2-5-17 | -10  | 0,3  | 0,961                | 0,0651     | 14.773,30            | 0,1421       |
| D2-5-17 | -10  | 0,1  | 0,861                | 0,0648     | 13.293,40            | 0,1571       |
| D2-5-06 | -10  | 10   | 1,243                | 0,0656     | 18.950,80            | 0,1137       |
| D2-5-06 | -10  | 5    | 1,214                | 0,0695     | 17.457,40            | 0,1134       |
| D2-5-06 | -10  | 3    | 1,164                | 0,0701     | 16.619,20            | 0,1407       |
| D2-5-06 | -10  | 1    | 1,062                | 0,0709     | 14.986,70            | 0,1345       |
| D2-5-06 | -10  | 0,3  | 0,961                | 0,0664     | 14.460,80            | 0,1476       |
| D2-5-06 | -10  | 0,1  | 0,861                | 0,0653     | 13.187,80            | 0,1705       |
| D2-5-01 | 5    | 10   | 0,612                | 0,0674     | 9.074,70             | 0,2118       |
| D2-5-01 | 5    | 5    | 0,577                | 0,0699     | 8.253,00             | 0,2342       |
| D2-5-01 | 5    | 3    | 0,557                | 0,0676     | 8.242,10             | 0,2528       |
| D2-5-01 | 5    | 1    | 0,448                | 0,0683     | 6.558,40             | 0,3002       |
| D2-5-01 | 5    | 0,3  | 0,34                 | 0,0676     | 5.026,60             | 0,3142       |
| D2-5-01 | 5    | 0,1  | 0,241                | 0,06       | 4.023,80             | 0,3662       |
| D2-5-17 | 5    | 10   | 0,61                 | 0,061      | 9.994,80             | 0,2205       |
| D2-5-17 | 5    | 5    | 0,574                | 0,0649     | 8.852,10             | 0,1973       |
| D2-5-17 | 5    | 3    | 0,552                | 0,0669     | 8.260,40             | 0,2474       |
| D2-5-17 | 5    | 1    | 0,445                | 0,065      | 6.854,80             | 0,2733       |
| D2-5-17 | 5    | 0,3  | 0,336                | 0,0613     | 5.479,40             | 0,3127       |
| D2-5-17 | 5    | 0,1  | 0,298                | 0,0699     | 4.264,40             | 0,3598       |
| D2-5-06 | 5    | 10   | 0,664                | 0,0652     | 10.180,10            | 0,2056       |
| D2-5-06 | 5    | 5    | 0,61                 | 0,0657     | 9.291,80             | 0,2249       |
| D2-5-06 | 5    | 3    | 0,558                | 0,0647     | 8.624,70             | 0,249        |
| D2-5-06 | 5    | 1    | 0,455                | 0,0618     | 7.364,80             | 0,2929       |
| D2-5-06 | 5    | 0,3  | 0,383                | 0,064      | 5.977,70             | 0,3224       |
| D2-5-06 | 5    | 0,1  | 0,301                | 0,0637     | 4.729,20             | 0,3592       |
| D2-5-01 | 20   | 10   | 0,296                | 0,0675     | 4.375,80             | 0,4031       |
| D2-5-01 | 20   | 5    | 0,242                | 0,0662     | 3.659,80             | 0,4109       |
| D2-5-01 | 20   | 3    | 0,207                | 0,0665     | 3.110,80             | 0,4254       |
| D2-5-01 | 20   | 1    | 0,149                | 0,0628     | 2.372,30             | 0,4527       |
| D2-5-01 | 20   | 0,3  | 0,107                | 0,0639     | 1.673,90             | 0,4944       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D2-5-01 | 20   | 0,1  | 0,079                | 0,0718     | 1.100,90             | 0,5905       |
| D2-5-17 | 20   | 10   | 0,297                | 0,0624     | 4.770,40             | 0,4002       |
| D2-5-17 | 20   | 3    | 0,231                | 0,0632     | 3.650,40             | 0,3985       |
| D2-5-17 | 20   | 1    | 0,151                | 0,0669     | 2.258,50             | 0,4676       |
| D2-5-17 | 20   | 0,3  | 0,107                | 0,0673     | 1.590,00             | 0,5196       |
| D2-5-17 | 20   | 0,1  | 0,07                 | 0,0599     | 1.165,10             | 0,5717       |
| D2-5-06 | 20   | 10   | 0,285                | 0,0627     | 4.552,20             | 0,369        |
| D2-5-06 | 20   | 5    | 0,24                 | 0,0669     | 3.579,40             | 0,3277       |
| D2-5-06 | 20   | 3    | 0,208                | 0,0621     | 3.352,30             | 0,4149       |
| D2-5-06 | 20   | 1    | 0,149                | 0,0611     | 2.432,70             | 0,448        |
| D2-5-06 | 20   | 0,3  | 0,104                | 0,0604     | 1.720,40             | 0,4942       |
| D2-5-06 | 20   | 0,1  | 0,076                | 0,0628     | 1.213,00             | 0,5749       |
| D2-5-11 | 35   | 10   | 0,115                | 0,0743     | 1.550,60             | 0,5118       |
| D2-5-11 | 35   | 5    | 0,103                | 0,0805     | 1.282                | 0,5613       |
| D2-5-11 | 35   | 3    | 0,094                | 0,0814     | 1.156                | 0,579        |
| D2-5-11 | 35   | 1    | 0,073                | 0,0934     | 783                  | 0,6091       |
| D2-5-11 | 35   | 0,3  | 0,052                | 0,1059     | 493                  | 0,7531       |
| D2-5-12 | 35   | 10   | 0,114                | 0,0696     | 1.645                | 0,5506       |
| D2-5-12 | 35   | 5    | 0,104                | 0,0741     | 1.407                | 0,6105       |
| D2-5-12 | 35   | 3    | 0,094                | 0,0829     | 1.132                | 0,5653       |
| D2-5-12 | 35   | 1    | 0,073                | 0,095      | 768                  | 0,6658       |
| D2-5-12 | 35   | 0,3  | 0,052                | 0,1076     | 483                  | 0,4959       |
| D2-5-15 | 35   | 10   | 0,115                | 0,0779     | 1.473                | 0,5586       |
| D2-5-15 | 35   | 5    | 0,104                | 0,0829     | 1.256                | 0,5618       |
| D2-5-15 | 35   | 3    | 0,093                | 0,0875     | 1.067                | 0,5784       |
| D2-5-15 | 35   | 1    | 0,073                | 0,099      | 736                  | 0,6729       |
| D2-5-15 | 35   | 0,3  | 0,052                | 0,1167     | 446                  | 0,7941       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                20.864 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                    24.769 [-]  
 b1                    -0,7534528 [-]  
 b2                    2,03094733 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,987 [-]

## SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A 7,01 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| DA-19   | -10  | 10   | 1,561                | 0,0575     | 27.137,10            | 0,0582       |
| DA-19   | -10  | 5    | 1,543                | 0,0613     | 25.150,60            | 0,0774       |
| DA-19   | -10  | 3    | 1,512                | 0,061      | 24.808,20            | 0,1028       |
| DA-19   | -10  | 1    | 1,412                | 0,0619     | 22.824,30            | 0,1019       |
| DA-19   | -10  | 0,3  | 1,311                | 0,0621     | 21.108,10            | 0,1224       |
| DA-19   | -10  | 0,1  | 1,211                | 0,0627     | 19.312,40            | 0,1746       |
| DA-15   | -10  | 10   | 1,559                | 0,0674     | 23.120,30            | 0,0856       |
| DA-15   | -10  | 5    | 1,542                | 0,0691     | 22.321,40            | 0,0992       |
| DA-15   | -10  | 3    | 1,513                | 0,0712     | 21.246,60            | 0,107        |
| DA-15   | -10  | 1    | 1,362                | 0,0704     | 19.339,70            | 0,095        |
| DA-15   | -10  | 0,3  | 1,261                | 0,0711     | 17.727,20            | 0,1179       |
| DA-15   | -10  | 0,1  | 1,161                | 0,0693     | 16.756,60            | 0,1458       |
| DA-02   | -10  | 10   | 1,561                | 0,07       | 22.284,40            | 0,0996       |
| DA-02   | -10  | 5    | 1,533                | 0,0706     | 21.714,00            | 0,1082       |
| DA-02   | -10  | 3    | 1,463                | 0,0697     | 21.000,70            | 0,0985       |
| DA-02   | -10  | 1    | 1,362                | 0,0709     | 19.217,40            | 0,1349       |
| DA-02   | -10  | 0,3  | 1,261                | 0,0717     | 17.589,60            | 0,1487       |
| DA-02   | -10  | 0,1  | 1,111                | 0,0705     | 15.752,40            | 0,1787       |
| DA-19   | 5    | 10   | 0,916                | 0,063      | 14.537,50            | 0,1686       |
| DA-19   | 5    | 5    | 0,863                | 0,0676     | 12.772,20            | 0,1629       |
| DA-19   | 5    | 3    | 0,807                | 0,0692     | 11.664,30            | 0,2131       |
| DA-19   | 5    | 1    | 0,704                | 0,0683     | 10.316,10            | 0,2088       |
| DA-19   | 5    | 0,3  | 0,55                 | 0,0668     | 8.230,60             | 0,265        |
| DA-19   | 5    | 0,1  | 0,451                | 0,0668     | 6.752,20             | 0,2823       |
| DA-15   | 5    | 10   | 0,915                | 0,0638     | 14.345,30            | 0,1523       |
| DA-15   | 5    | 5    | 0,863                | 0,0643     | 13.432,80            | 0,1338       |
| DA-15   | 5    | 3    | 0,809                | 0,064      | 12.643,90            | 0,1802       |
| DA-15   | 5    | 1    | 0,704                | 0,0647     | 10.875,60            | 0,222        |
| DA-15   | 5    | 0,3  | 0,55                 | 0,0617     | 8.920,60             | 0,2613       |
| DA-15   | 5    | 0,1  | 0,448                | 0,0613     | 7.307,10             | 0,2908       |
| DA-02   | 5    | 10   | 0,912                | 0,0622     | 14.664,20            | 0,1471       |
| DA-02   | 5    | 5    | 0,86                 | 0,0644     | 13.357,30            | 0,174        |
| DA-02   | 5    | 3    | 0,808                | 0,0658     | 12.283,10            | 0,2046       |
| DA-02   | 5    | 1    | 0,701                | 0,0644     | 10.870,50            | 0,2419       |
| DA-02   | 5    | 0,3  | 0,548                | 0,0617     | 8.874,80             | 0,2708       |
| DA-02   | 5    | 0,1  | 0,449                | 0,0626     | 7.161,00             | 0,3093       |
| DA-19   | 20   | 10   | 0,417                | 0,0675     | 6.174,40             | 0,3252       |
| DA-19   | 20   | 5    | 0,365                | 0,0713     | 5.119,40             | 0,342        |
| DA-19   | 20   | 3    | 0,314                | 0,0682     | 4.601,60             | 0,3579       |
| DA-19   | 20   | 1    | 0,243                | 0,068      | 3.571,60             | 0,3924       |
| DA-19   | 20   | 0,3  | 0,163                | 0,0639     | 2.560,00             | 0,4261       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| DA-19   | 20   | 0,1  | 0,114                | 0,0603     | 1.888,00             | 0,4896       |
| DA-15   | 20   | 10   | 0,417                | 0,0649     | 6.425,90             | 0,3288       |
| DA-15   | 20   | 5    | 0,365                | 0,061      | 5.984,50             | 0,3439       |
| DA-15   | 20   | 3    | 0,343                | 0,0616     | 5.575,10             | 0,3811       |
| DA-15   | 20   | 1    | 0,283                | 0,0644     | 4.393,40             | 0,4006       |
| DA-15   | 20   | 0,3  | 0,214                | 0,0684     | 3.123,90             | 0,4392       |
| DA-15   | 20   | 0,1  | 0,124                | 0,0601     | 2.061,30             | 0,47         |
| DA-02   | 20   | 10   | 0,397                | 0,0665     | 5.966,10             | 0,3352       |
| DA-02   | 20   | 5    | 0,345                | 0,0675     | 5.104,70             | 0,3518       |
| DA-02   | 20   | 3    | 0,304                | 0,0678     | 4.475,60             | 0,3576       |
| DA-02   | 20   | 1    | 0,223                | 0,0661     | 3.373,50             | 0,4268       |
| DA-02   | 20   | 0,3  | 0,163                | 0,0664     | 2.452,60             | 0,4484       |
| DA-02   | 20   | 0,1  | 0,124                | 0,0696     | 1.774,60             | 0,4982       |
| DA-07   | 35   | 10   | 0,165                | 0,0688     | 2.391                | 0,5493       |
| DA-07   | 35   | 5    | 0,143                | 0,0717     | 1.991                | 0,4809       |
| DA-07   | 35   | 3    | 0,124                | 0,0712     | 1.735                | 0,5368       |
| DA-07   | 35   | 1    | 0,082                | 0,0689     | 1.191                | 0,5887       |
| DA-07   | 35   | 0,3  | 0,062                | 0,0769     | 808                  | 0,6839       |
| DA-07   | 35   | 0,1  | 0,042                | 0,082      | 516                  | 0,7802       |
| DA-11   | 35   | 10   | 0,165                | 0,0669     | 2.462                | 0,5026       |
| DA-11   | 35   | 5    | 0,144                | 0,0682     | 2.110                | 0,5355       |
| DA-11   | 35   | 3    | 0,123                | 0,0708     | 1.743                | 0,5485       |
| DA-11   | 35   | 1    | 0,083                | 0,075      | 1.100                | 0,627        |
| DA-11   | 35   | 0,3  | 0,062                | 0,0825     | 750                  | 0,723        |
| DA-11   | 35   | 0,1  | 0,042                | 0,0921     | 461                  | 0,8474       |
| DA-21   | 35   | 10   | 0,174                | 0,0619     | 2.816                | 0,5326       |
| DA-21   | 35   | 5    | 0,153                | 0,0699     | 2.186                | 0,5398       |
| DA-21   | 35   | 3    | 0,123                | 0,0667     | 1.841                | 0,5409       |
| DA-21   | 35   | 1    | 0,082                | 0,0672     | 1.226                | 0,6071       |
| DA-21   | 35   | 0,3  | 0,062                | 0,0741     | 836                  | 0,7083       |
| DA-21   | 35   | 0,1  | 0,042                | 0,0723     | 580                  | 0,7675       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                27.004 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                    25.714 [-]  
 b1                    -0,6933735 [-]  
 b2                    1,82386017 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,987 [-]



## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-1-11 | -10  | 10   | 0,975                | 0,0618     | 15.782               | 0,0212       |
| D1-1-11 | -10  | 5    | 0,936                | 0,065      | 14.408               | 0,1156       |
| D1-1-11 | -10  | 3    | 0,906                | 0,0632     | 14.338               | 0,095        |
| D1-1-11 | -10  | 1    | 0,85                 | 0,0636     | 13.367               | 0,1375       |
| D1-1-11 | -10  | 0,3  | 0,797                | 0,0653     | 12.194               | 0,1252       |
| D1-1-11 | -10  | 0,1  | 0,746                | 0,0672     | 11.101               | 0,1586       |
| D1-1-17 | -10  | 10   | 1,17                 | 0,065      | 18.012               | 0,1025       |
| D1-1-17 | -10  | 5    | 1,071                | 0,0642     | 16.692               | 0,0951       |
| D1-1-17 | -10  | 3    | 0,961                | 0,0608     | 15.789               | 0,1076       |
| D1-1-17 | -10  | 1    | 0,902                | 0,0613     | 14.717               | 0,1298       |
| D1-1-17 | -10  | 0,3  | 0,844                | 0,0601     | 14.050               | 0,1382       |
| D1-1-17 | -10  | 0,1  | 0,797                | 0,0625     | 12.761               | 0,1544       |
| D1-1-24 | -10  | 10   | 0,971                | 0,0645     | 15.059               | 0,1132       |
| D1-1-24 | -10  | 5    | 0,935                | 0,0653     | 14.313               | 0,0725       |
| D1-1-24 | -10  | 3    | 0,909                | 0,0626     | 14.525               | 0,1293       |
| D1-1-24 | -10  | 1    | 0,853                | 0,0646     | 13.203               | 0,1238       |
| D1-1-24 | -10  | 0,3  | 0,794                | 0,0626     | 12.691               | 0,1319       |
| D1-1-24 | -10  | 0,1  | 0,747                | 0,0666     | 11.221               | 0,1487       |
| D1-1-11 | 5    | 10   | 0,679                | 0,0686     | 9.900                | 0,1608       |
| D1-1-11 | 5    | 5    | 0,637                | 0,0686     | 9.290                | 0,1761       |
| D1-1-11 | 5    | 3    | 0,611                | 0,0702     | 8.698                | 0,2138       |
| D1-1-11 | 5    | 1    | 0,519                | 0,07       | 7.418                | 0,2398       |
| D1-1-11 | 5    | 0,3  | 0,445                | 0,0715     | 6.231                | 0,2788       |
| D1-1-11 | 5    | 0,1  | 0,367                | 0,0714     | 5.135                | 0,325        |
| D1-1-17 | 5    | 10   | 0,741                | 0,0642     | 11.550               | 0,1315       |
| D1-1-17 | 5    | 5    | 0,691                | 0,0582     | 11.889               | 0,2193       |
| D1-1-17 | 5    | 3    | 0,655                | 0,0618     | 10.597               | 0,2124       |
| D1-1-17 | 5    | 1    | 0,569                | 0,0602     | 9.445                | 0,2256       |
| D1-1-17 | 5    | 0,3  | 0,496                | 0,0627     | 7.909                | 0,2671       |
| D1-1-17 | 5    | 0,1  | 0,449                | 0,069      | 6.504                | 0,321        |
| D1-1-24 | 5    | 10   | 0,87                 | 0,0605     | 14.380               | 0,1723       |
| D1-1-24 | 5    | 5    | 0,837                | 0,0648     | 12.920               | 0,195        |
| D1-1-24 | 5    | 3    | 0,809                | 0,0665     | 12.161               | 0,2136       |
| D1-1-24 | 5    | 1    | 0,702                | 0,067      | 10.474               | 0,2378       |
| D1-1-24 | 5    | 0,3  | 0,625                | 0,0709     | 8.811                | 0,2565       |
| D1-1-24 | 5    | 0,1  | 0,519                | 0,0715     | 7.252                | 0,3071       |
| D1-1-11 | 20   | 10   | 0,318                | 0,0653     | 4.870                | 0,3668       |
| D1-1-11 | 20   | 5    | 0,287                | 0,0656     | 4.367                | 0,3501       |
| D1-1-11 | 20   | 3    | 0,257                | 0,0684     | 3.761                | 0,349        |
| D1-1-11 | 20   | 1    | 0,198                | 0,0687     | 2.875                | 0,4232       |
| D1-1-11 | 20   | 0,3  | 0,144                | 0,0683     | 2.111                | 0,4578       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-1-11 | 20   | 0,1  | 0,097                | 0,0652     | 1.480                | 0,4826       |
| D1-1-17 | 20   | 10   | 0,314                | 0,0587     | 5.349                | 0,3948       |
| D1-1-17 | 20   | 5    | 0,294                | 0,0627     | 4.683                | 0,3954       |
| D1-1-17 | 20   | 3    | 0,269                | 0,0631     | 4.264                | 0,3915       |
| D1-1-17 | 20   | 1    | 0,21                 | 0,0662     | 3.170                | 0,4545       |
| D1-1-17 | 20   | 0,3  | 0,156                | 0,068      | 2.294                | 0,4859       |
| D1-1-17 | 20   | 0,1  | 0,107                | 0,0622     | 1.712                | 0,5304       |
| D1-1-24 | 20   | 10   | 0,366                | 0,0632     | 5.800                | 0,3205       |
| D1-1-24 | 20   | 5    | 0,331                | 0,0643     | 5.146                | 0,363        |
| D1-1-24 | 20   | 3    | 0,309                | 0,0662     | 4.662                | 0,3977       |
| D1-1-24 | 20   | 1    | 0,248                | 0,0688     | 3.599                | 0,4456       |
| D1-1-24 | 20   | 0,3  | 0,169                | 0,0654     | 2.578                | 0,4473       |
| D1-1-24 | 20   | 0,1  | 0,12                 | 0,0623     | 1.933                | 0,4943       |
| D1-1-14 | 35   | 10   | 0,146                | 0,0703     | 2.072                | 0,4072       |
| D1-1-14 | 35   | 5    | 0,116                | 0,0711     | 1.637                | 0,4589       |
| D1-1-14 | 35   | 3    | 0,092                | 0,0636     | 1.442                | 0,4421       |
| D1-1-14 | 35   | 1    | 0,062                | 0,0585     | 1.066                | 0,4215       |
| D1-1-14 | 35   | 0,3  | 0,053                | 0,066      | 796                  | 0,4132       |
| D1-1-14 | 35   | 0,1  | 0,045                | 0,0727     | 616                  | 0,4078       |
| D1-1-21 | 35   | 10   | 0,137                | 0,0689     | 1.982                | 0,5221       |
| D1-1-21 | 35   | 5    | 0,118                | 0,0662     | 1.777                | 0,4551       |
| D1-1-21 | 35   | 3    | 0,095                | 0,0629     | 1.510                | 0,4909       |
| D1-1-21 | 35   | 1    | 0,073                | 0,0648     | 1.127                | 0,472        |
| D1-1-21 | 35   | 0,3  | 0,055                | 0,0636     | 860                  | 0,4721       |
| D1-1-21 | 35   | 0,1  | 0,042                | 0,0656     | 639                  | 0,4865       |
| D1-1-23 | 35   | 10   | 0,141                | 0,0678     | 2.078                | 0,4616       |
| D1-1-23 | 35   | 5    | 0,119                | 0,0605     | 1.960                | 0,4713       |
| D1-1-23 | 35   | 3    | 0,103                | 0,0626     | 1.639                | 0,4246       |
| D1-1-23 | 35   | 1    | 0,067                | 0,093      | 726                  | 0,4542       |
| D1-1-23 | 35   | 0,3  | 0,045                | 0,0782     | 575                  | 0,3815       |
| D1-1-23 | 35   | 0,1  | 0,036                | 0,0761     | 470                  | 0,3445       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                99 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                20397 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                     24267 [-]  
 b1                    -0,653304 [-]  
 b2                    1,74423523 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,957 [-]

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-2-14 | -10  | 10   | 1,164                | 0,0685     | 16.999,30            | 0,0822       |
| D1-2-14 | -10  | 5    | 0,964                | 0,0604     | 15.961,40            | 0,0932       |
| D1-2-14 | -10  | 3    | 0,963                | 0,063      | 15.285,10            | 0,0959       |
| D1-2-14 | -10  | 1    | 0,913                | 0,063      | 14.494,50            | 0,0785       |
| D1-2-14 | -10  | 0,3  | 0,863                | 0,0647     | 13.343,00            | 0,1039       |
| D1-2-14 | -10  | 0,1  | 0,814                | 0,0657     | 12.375,60            | 0,1201       |
| D1-2-22 | -10  | 10   | 0,914                | 0,0749     | 12.213,70            | 0,1141       |
| D1-2-22 | -10  | 5    | 0,865                | 0,0734     | 11.783,90            | 0,0846       |
| D1-2-22 | -10  | 3    | 0,813                | 0,066      | 12.312,60            | 0,112        |
| D1-2-22 | -10  | 1    | 0,763                | 0,0698     | 10.929,50            | 0,0921       |
| D1-2-22 | -10  | 0,3  | 0,714                | 0,0711     | 10.032,10            | 0,1311       |
| D1-2-22 | -10  | 0,1  | 0,664                | 0,0711     | 9.331,60             | 0,1076       |
| D1-2-04 | -10  | 10   | 1,063                | 0,063      | 16.872,80            | 0,0762       |
| D1-2-04 | -10  | 5    | 0,962                | 0,06       | 16.026,70            | 0,0557       |
| D1-2-04 | -10  | 3    | 0,943                | 0,0622     | 15.163,30            | 0,1054       |
| D1-2-04 | -10  | 1    | 0,912                | 0,0649     | 14.046,10            | 0,1028       |
| D1-2-04 | -10  | 0,3  | 0,862                | 0,0636     | 13.547,10            | 0,1141       |
| D1-2-04 | -10  | 0,1  | 0,812                | 0,0643     | 12.639,80            | 0,117        |
| D1-2-14 | 5    | 10   | 0,615                | 0,0671     | 9.163,40             | 0,1211       |
| D1-2-14 | 5    | 5    | 0,585                | 0,0672     | 8.698,40             | 0,1745       |
| D1-2-14 | 5    | 3    | 0,563                | 0,0704     | 7.996,00             | 0,1969       |
| D1-2-14 | 5    | 1    | 0,513                | 0,0698     | 7.343,10             | 0,1798       |
| D1-2-14 | 5    | 0,3  | 0,444                | 0,0692     | 6.418,00             | 0,1911       |
| D1-2-14 | 5    | 0,1  | 0,384                | 0,0682     | 5.629,70             | 0,2427       |
| D1-2-22 | 5    | 10   | 0,595                | 0,0738     | 8.068,40             | 0,1502       |
| D1-2-22 | 5    | 5    | 0,534                | 0,0711     | 7.510,90             | 0,1733       |
| D1-2-22 | 5    | 3    | 0,493                | 0,0701     | 7.041,60             | 0,1795       |
| D1-2-22 | 5    | 1    | 0,413                | 0,0674     | 6.132,40             | 0,1955       |
| D1-2-22 | 5    | 0,3  | 0,364                | 0,0706     | 5.149,40             | 0,2355       |
| D1-2-22 | 5    | 0,1  | 0,294                | 0,07       | 4.196,50             | 0,2623       |
| D1-2-04 | 5    | 10   | 0,614                | 0,0686     | 8.945,00             | 0,1761       |
| D1-2-04 | 5    | 5    | 0,584                | 0,0705     | 8.280,90             | 0,2099       |
| D1-2-04 | 5    | 3    | 0,542                | 0,0678     | 7.992,60             | 0,1886       |
| D1-2-04 | 5    | 1    | 0,481                | 0,0715     | 6.728,30             | 0,2403       |
| D1-2-04 | 5    | 0,3  | 0,409                | 0,0714     | 5.725,70             | 0,2487       |
| D1-2-04 | 5    | 0,1  | 0,338                | 0,0706     | 4.790,50             | 0,2748       |
| D1-2-14 | 20   | 10   | 0,314                | 0,0702     | 4.471,90             | 0,2295       |
| D1-2-14 | 20   | 5    | 0,283                | 0,0705     | 4.013,60             | 0,2627       |
| D1-2-14 | 20   | 3    | 0,262                | 0,0694     | 3.774,50             | 0,2592       |
| D1-2-14 | 20   | 1    | 0,212                | 0,0661     | 3.209,30             | 0,2806       |
| D1-2-14 | 20   | 0,3  | 0,161                | 0,0622     | 2.585,00             | 0,3021       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-2-14 | 20   | 0,1  | 0,141                | 0,0634     | 2.225,20             | 0,3328       |
| D1-2-22 | 20   | 10   | 0,282                | 0,0724     | 3.895,80             | 0,2207       |
| D1-2-22 | 20   | 5    | 0,242                | 0,068      | 3.564,90             | 0,242        |
| D1-2-22 | 20   | 3    | 0,211                | 0,0643     | 3.278,00             | 0,2754       |
| D1-2-22 | 20   | 1    | 0,158                | 0,0588     | 2.683,30             | 0,3107       |
| D1-2-22 | 20   | 0,3  | 0,136                | 0,0635     | 2.134,10             | 0,3451       |
| D1-2-22 | 20   | 0,1  | 0,106                | 0,0686     | 1.551,40             | 0,4013       |
| D1-2-04 | 20   | 10   | 0,284                | 0,0801     | 3.544,70             | 0,2749       |
| D1-2-04 | 20   | 5    | 0,233                | 0,0719     | 3.235,00             | 0,2687       |
| D1-2-04 | 20   | 3    | 0,213                | 0,0725     | 2.936,80             | 0,2944       |
| D1-2-04 | 20   | 1    | 0,16                 | 0,0681     | 2.349,60             | 0,3189       |
| D1-2-04 | 20   | 0,3  | 0,137                | 0,0735     | 1.860,70             | 0,3725       |
| D1-2-04 | 20   | 0,1  | 0,097                | 0,0655     | 1.483,20             | 0,4193       |
| D1-2-02 | 35   | 10   | 0,137                | 0,069      | 1.988                | 0,407        |
| D1-2-02 | 35   | 5    | 0,115                | 0,0671     | 1.712                | 0,3659       |
| D1-2-02 | 35   | 3    | 0,092                | 0,0601     | 1.534                | 0,4025       |
| D1-2-02 | 35   | 1    | 0,071                | 0,069      | 1.025                | 0,3976       |
| D1-2-02 | 35   | 0,3  | 0,051                | 0,0621     | 815                  | 0,4205       |
| D1-2-02 | 35   | 0,1  | 0,041                | 0,0602     | 675                  | 0,4542       |
| D1-2-08 | 35   | 10   | 0,144                | 0,0667     | 2.158                | 0,3748       |
| D1-2-08 | 35   | 5    | 0,124                | 0,0642     | 1.930                | 0,398        |
| D1-2-08 | 35   | 3    | 0,113                | 0,0648     | 1.744                | 0,3975       |
| D1-2-08 | 35   | 1    | 0,092                | 0,0672     | 1.365                | 0,44         |
| D1-2-08 | 35   | 0,3  | 0,07                 | 0,0653     | 1.075                | 0,4452       |
| D1-2-08 | 35   | 0,1  | 0,061                | 0,0717     | 849                  | 0,5181       |
| D1-2-12 | 35   | 10   | 0,155                | 0,0618     | 2.500                | 0,3141       |
| D1-2-12 | 35   | 5    | 0,144                | 0,0646     | 2.225                | 0,3343       |
| D1-2-12 | 35   | 3    | 0,134                | 0,0656     | 2.038                | 0,3625       |
| D1-2-12 | 35   | 1    | 0,112                | 0,0685     | 1.631                | 0,3914       |
| D1-2-12 | 35   | 0,3  | 0,09                 | 0,0704     | 1.285                | 0,4025       |
| D1-2-12 | 35   | 0,1  | 0,07                 | 0,0665     | 1.057                | 0,4494       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                27.860 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                     29.084 [-]  
 b1                    -0,4123559 [-]  
 b2                    2,14235441 [-]  
 R<sup>2</sup>                   0,958 [-]

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-3-01 | -10  | 10   | 1,165                | 0,0701     | 16.623,30            | 0,0805       |
| D1-3-01 | -10  | 5    | 1,062                | 0,0681     | 15.588,40            | 0,0675       |
| D1-3-01 | -10  | 3    | 0,962                | 0,0637     | 15.115,50            | 0,0948       |
| D1-3-01 | -10  | 1    | 0,911                | 0,0667     | 13.658,30            | 0,1035       |
| D1-3-01 | -10  | 0,3  | 0,86                 | 0,0706     | 12.188,30            | 0,1393       |
| D1-3-01 | -10  | 0,1  | 0,788                | 0,0701     | 11.237,90            | 0,157        |
| D1-3-10 | -10  | 10   | 0,966                | 0,0629     | 15.361,10            | 0,0607       |
| D1-3-10 | -10  | 5    | 0,933                | 0,0626     | 14.895,00            | 0,0471       |
| D1-3-10 | -10  | 3    | 0,912                | 0,0646     | 14.129,30            | 0,1273       |
| D1-3-10 | -10  | 1    | 0,86                 | 0,0644     | 13.345,70            | 0,1245       |
| D1-3-10 | -10  | 0,3  | 0,808                | 0,0663     | 12.176,80            | 0,1345       |
| D1-3-10 | -10  | 0,1  | 0,758                | 0,0687     | 11.036,50            | 0,1522       |
| D1-3-20 | -10  | 10   | 0,964                | 0,065      | 14.835,30            | 0,1125       |
| D1-3-20 | -10  | 5    | 0,931                | 0,0688     | 13.536,50            | 0,0989       |
| D1-3-20 | -10  | 3    | 0,912                | 0,0684     | 13.345,80            | 0,093        |
| D1-3-20 | -10  | 1    | 0,859                | 0,0723     | 11.879,10            | 0,134        |
| D1-3-20 | -10  | 0,3  | 0,786                | 0,0732     | 10.740,20            | 0,1239       |
| D1-3-20 | -10  | 0,1  | 0,705                | 0,0719     | 9.806,60             | 0,1457       |
| D1-3-01 | 5    | 10   | 0,515                | 0,0653     | 7.880,60             | 0,1541       |
| D1-3-01 | 5    | 5    | 0,484                | 0,0645     | 7.495,00             | 0,1939       |
| D1-3-01 | 5    | 3    | 0,463                | 0,0667     | 6.950,70             | 0,188        |
| D1-3-01 | 5    | 1    | 0,413                | 0,0708     | 5.829,20             | 0,2237       |
| D1-3-01 | 5    | 0,3  | 0,343                | 0,0682     | 5.028,50             | 0,2318       |
| D1-3-01 | 5    | 0,1  | 0,294                | 0,0701     | 4.185,90             | 0,263        |
| D1-3-10 | 5    | 10   | 0,516                | 0,0654     | 7.886,20             | 0,1656       |
| D1-3-10 | 5    | 5    | 0,484                | 0,0686     | 7.064,30             | 0,2072       |
| D1-3-10 | 5    | 3    | 0,464                | 0,0689     | 6.730,90             | 0,2242       |
| D1-3-10 | 5    | 1    | 0,414                | 0,0711     | 5.813,20             | 0,2231       |
| D1-3-10 | 5    | 0,3  | 0,334                | 0,0695     | 4.803,20             | 0,2601       |
| D1-3-10 | 5    | 0,1  | 0,284                | 0,0711     | 3.991,20             | 0,2934       |
| D1-3-20 | 5    | 10   | 0,564                | 0,0637     | 8.854,30             | 0,1296       |
| D1-3-20 | 5    | 5    | 0,484                | 0,0602     | 8.038,20             | 0,1882       |
| D1-3-20 | 5    | 3    | 0,463                | 0,0614     | 7.541,20             | 0,1844       |
| D1-3-20 | 5    | 1    | 0,413                | 0,0627     | 6.590,90             | 0,1995       |
| D1-3-20 | 5    | 0,3  | 0,344                | 0,0624     | 5.504,00             | 0,231        |
| D1-3-20 | 5    | 0,1  | 0,284                | 0,0621     | 4.568,00             | 0,2694       |
| D1-3-01 | 20   | 10   | 0,313                | 0,0631     | 4.955,50             | 0,2941       |
| D1-3-01 | 20   | 5    | 0,283                | 0,0657     | 4.308,70             | 0,2982       |
| D1-3-01 | 20   | 3    | 0,261                | 0,066      | 3.951,80             | 0,3398       |
| D1-3-01 | 20   | 1    | 0,209                | 0,0665     | 3.141,00             | 0,3637       |
| D1-3-01 | 20   | 0,3  | 0,155                | 0,0633     | 2.448,80             | 0,3814       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-3-01 | 20   | 0,1  | 0,116                | 0,0705     | 1.638,10             | 0,3834       |
| D1-3-10 | 20   | 10   | 0,264                | 0,0686     | 3.843,50             | 0,2886       |
| D1-3-10 | 20   | 5    | 0,242                | 0,0732     | 3.301,50             | 0,317        |
| D1-3-10 | 20   | 3    | 0,209                | 0,0702     | 2.982,50             | 0,3139       |
| D1-3-10 | 20   | 1    | 0,155                | 0,0642     | 2.410,10             | 0,3418       |
| D1-3-10 | 20   | 0,3  | 0,112                | 0,0586     | 1.905,30             | 0,3487       |
| D1-3-10 | 20   | 0,1  | 0,083                | 0,0544     | 1.523,70             | 0,3771       |
| D1-3-20 | 20   | 10   | 0,265                | 0,0713     | 3.718,70             | 0,3521       |
| D1-3-20 | 20   | 5    | 0,23                 | 0,0688     | 3.342,00             | 0,2959       |
| D1-3-20 | 20   | 3    | 0,209                | 0,0679     | 3.077,60             | 0,3038       |
| D1-3-20 | 20   | 1    | 0,151                | 0,0617     | 2.455,90             | 0,3391       |
| D1-3-20 | 20   | 0,3  | 0,111                | 0,059      | 1.875,90             | 0,3863       |
| D1-3-20 | 20   | 0,1  | 0,101                | 0,0685     | 1.477,40             | 0,437        |
| D1-3-13 | 35   | 10   | 0,136                | 0,0671     | 2.031                | 0,3965       |
| D1-3-13 | 35   | 5    | 0,114                | 0,0669     | 1.707                | 0,395        |
| D1-3-13 | 35   | 3    | 0,103                | 0,0734     | 1.402                | 0,3924       |
| D1-3-13 | 35   | 1    | 0,071                | 0,0689     | 1.035                | 0,3953       |
| D1-3-13 | 35   | 0,3  | 0,059                | 0,0686     | 864                  | 0,4184       |
| D1-3-13 | 35   | 0,1  | 0,051                | 0,0726     | 700                  | 0,453        |
| D1-3-15 | 35   | 10   | 0,136                | 0,0646     | 2.104                | 0,4219       |
| D1-3-15 | 35   | 5    | 0,113                | 0,0621     | 1.823                | 0,4096       |
| D1-3-15 | 35   | 3    | 0,092                | 0,0598     | 1.538                | 0,3652       |
| D1-3-15 | 35   | 1    | 0,071                | 0,0618     | 1.148                | 0,4378       |
| D1-3-15 | 35   | 0,3  | 0,06                 | 0,0654     | 918                  | 0,4648       |
| D1-3-15 | 35   | 0,1  | 0,051                | 0,0719     | 704                  | 0,5265       |
| D1-3-22 | 35   | 10   | 0,136                | 0,0644     | 2.117                | 0,3979       |
| D1-3-22 | 35   | 5    | 0,114                | 0,0613     | 1.863                | 0,3927       |
| D1-3-22 | 35   | 3    | 0,102                | 0,0612     | 1.675                | 0,4029       |
| D1-3-22 | 35   | 1    | 0,081                | 0,0627     | 1.291                | 0,4628       |
| D1-3-22 | 35   | 0,3  | 0,06                 | 0,0591     | 1.013                | 0,4828       |
| D1-3-22 | 35   | 0,1  | 0,051                | 0,065      | 785                  | 0,5571       |

Tr                    20 [°C]  
E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
E\_max                24.380 [N/mm<sup>2</sup>]  
m                     26.159 [-]  
b1                    -0,4875126 [-]  
b2                    2,0710788 [-]  
R<sup>2</sup>                   0,987 [-]

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-5-01 | -10  | 10   | 0,965                | 0,0629     | 15.347,00            | 0,0923       |
| D1-5-01 | -10  | 5    | 0,932                | 0,0605     | 15.414,80            | 0,0839       |
| D1-5-01 | -10  | 3    | 0,911                | 0,0606     | 15.047,70            | 0,109        |
| D1-5-01 | -10  | 1    | 0,858                | 0,0626     | 13.709,60            | 0,1192       |
| D1-5-01 | -10  | 0,3  | 0,805                | 0,066      | 12.205,60            | 0,1253       |
| D1-5-01 | -10  | 0,1  | 0,756                | 0,0669     | 11.285,90            | 0,1319       |
| D1-5-11 | -10  | 10   | 1,165                | 0,0651     | 17.909,30            | 0,12         |
| D1-5-11 | -10  | 5    | 1,064                | 0,0624     | 17.058,70            | 0,1349       |
| D1-5-11 | -10  | 3    | 0,963                | 0,0598     | 16.089,60            | 0,1022       |
| D1-5-11 | -10  | 1    | 0,907                | 0,0598     | 15.155,00            | 0,1293       |
| D1-5-11 | -10  | 0,3  | 0,851                | 0,0619     | 13.737,90            | 0,1428       |
| D1-5-11 | -10  | 0,1  | 0,804                | 0,063      | 12.763,50            | 0,1605       |
| D1-5-24 | -10  | 10   | 0,967                | 0,0621     | 15.570,60            | 0,0902       |
| D1-5-24 | -10  | 5    | 0,93                 | 0,0639     | 14.552,70            | 0,0879       |
| D1-5-24 | -10  | 3    | 0,91                 | 0,0629     | 14.472,70            | 0,1092       |
| D1-5-24 | -10  | 1    | 0,857                | 0,0657     | 13.040,50            | 0,1417       |
| D1-5-24 | -10  | 0,3  | 0,802                | 0,0693     | 11.579,60            | 0,1395       |
| D1-5-24 | -10  | 0,1  | 0,754                | 0,0717     | 10.517,20            | 0,1664       |
| D1-5-01 | 5    | 10   | 0,565                | 0,0638     | 8.865,00             | 0,2262       |
| D1-5-01 | 5    | 5    | 0,534                | 0,0668     | 7.987,60             | 0,1796       |
| D1-5-01 | 5    | 3    | 0,512                | 0,0659     | 7.766,80             | 0,2107       |
| D1-5-01 | 5    | 1    | 0,458                | 0,0713     | 6.418,00             | 0,2343       |
| D1-5-01 | 5    | 0,3  | 0,356                | 0,0664     | 5.369,70             | 0,2455       |
| D1-5-01 | 5    | 0,1  | 0,303                | 0,0674     | 4.490,60             | 0,2882       |
| D1-5-11 | 5    | 10   | 0,565                | 0,0637     | 8.869,90             | 0,187        |
| D1-5-11 | 5    | 5    | 0,532                | 0,0621     | 8.560,50             | 0,1793       |
| D1-5-11 | 5    | 3    | 0,512                | 0,0659     | 7.765,20             | 0,2107       |
| D1-5-11 | 5    | 1    | 0,437                | 0,0654     | 6.688,50             | 0,2227       |
| D1-5-11 | 5    | 0,3  | 0,352                | 0,0632     | 5.570,50             | 0,2469       |
| D1-5-11 | 5    | 0,1  | 0,304                | 0,0653     | 4.649,80             | 0,2669       |
| D1-5-24 | 5    | 10   | 0,565                | 0,0695     | 8.128,70             | 0,1594       |
| D1-5-24 | 5    | 5    | 0,536                | 0,0703     | 7.630,70             | 0,1606       |
| D1-5-24 | 5    | 3    | 0,511                | 0,0739     | 6.916,30             | 0,2079       |
| D1-5-24 | 5    | 1    | 0,436                | 0,0714     | 6.102,10             | 0,2268       |
| D1-5-24 | 5    | 0,3  | 0,354                | 0,0702     | 5.036,00             | 0,2439       |
| D1-5-24 | 5    | 0,1  | 0,305                | 0,0722     | 4.223,10             | 0,2934       |
| D1-5-01 | 20   | 10   | 0,286                | 0,0711     | 4.013,60             | 0,2927       |
| D1-5-01 | 20   | 5    | 0,241                | 0,0679     | 3.551,70             | 0,3137       |
| D1-5-01 | 20   | 3    | 0,209                | 0,0657     | 3.179,50             | 0,3393       |
| D1-5-01 | 20   | 1    | 0,155                | 0,0612     | 2.539,80             | 0,3833       |
| D1-5-01 | 20   | 0,3  | 0,133                | 0,0682     | 1.950,80             | 0,3951       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| D1-5-01 | 20   | 0,1  | 0,104                | 0,0723     | 1.434,80             | 0,429        |
| D1-5-11 | 20   | 10   | 0,243                | 0,0675     | 3.596,00             | 0,2916       |
| D1-5-11 | 20   | 5    | 0,211                | 0,0683     | 3.094,60             | 0,2897       |
| D1-5-11 | 20   | 3    | 0,18                 | 0,0601     | 2.986,00             | 0,3262       |
| D1-5-11 | 20   | 1    | 0,156                | 0,0671     | 2.325,70             | 0,3614       |
| D1-5-11 | 20   | 0,3  | 0,133                | 0,0732     | 1.815,80             | 0,401        |
| D1-5-11 | 20   | 0,1  | 0,085                | 0,0604     | 1.413,40             | 0,4049       |
| D1-5-24 | 20   | 10   | 0,244                | 0,0658     | 3.701,50             | 0,313        |
| D1-5-24 | 20   | 5    | 0,209                | 0,061      | 3.426,00             | 0,3139       |
| D1-5-24 | 20   | 3    | 0,18                 | 0,0606     | 2.968,40             | 0,3256       |
| D1-5-24 | 20   | 1    | 0,155                | 0,0638     | 2.428,30             | 0,3484       |
| D1-5-24 | 20   | 0,3  | 0,122                | 0,0662     | 1.848,40             | 0,3882       |
| D1-5-24 | 20   | 0,1  | 0,095                | 0,0641     | 1.480,50             | 0,4339       |
| D1-5-07 | 35   | 10   | 0,135                | 0,0607     | 2.228                | 0,4061       |
| D1-5-07 | 35   | 5    | 0,124                | 0,0658     | 1.878                | 0,4336       |
| D1-5-07 | 35   | 1    | 0,071                | 0,059      | 1.205                | 0,4627       |
| D1-5-07 | 35   | 0,3  | 0,059                | 0,0723     | 820                  | 0,371        |
| D1-5-07 | 35   | 0,1  | 0,051                | 0,0777     | 654                  | 0,4172       |
| D1-5-09 | 35   | 10   | 0,136                | 0,0717     | 1.895                | 0,4125       |
| D1-5-09 | 35   | 5    | 0,114                | 0,0704     | 1.625                | 0,395        |
| D1-5-09 | 35   | 3    | 0,103                | 0,0712     | 1.449                | 0,4045       |
| D1-5-09 | 35   | 1    | 0,071                | 0,0627     | 1.136                | 0,408        |
| D1-5-09 | 35   | 0,3  | 0,061                | 0,0665     | 912                  | 0,4572       |
| D1-5-09 | 35   | 0,1  | 0,051                | 0,0714     | 717                  | 0,5376       |
| D1-5-15 | 35   | 10   | 0,135                | 0,0668     | 2.019                | 0,4185       |
| D1-5-15 | 35   | 5    | 0,113                | 0,0631     | 1.790                | 0,4267       |
| D1-5-15 | 35   | 3    | 0,103                | 0,0651     | 1.581                | 0,4094       |
| D1-5-15 | 35   | 1    | 0,082                | 0,0651     | 1.257                | 0,4377       |
| D1-5-15 | 35   | 0,3  | 0,061                | 0,0614     | 989                  | 0,4638       |
| D1-5-15 | 35   | 0,1  | 0,051                | 0,0642     | 793                  | 0,5321       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                28.954 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                    27.755 [-]  
 b1                    -0,4610748 [-]  
 b2                    2,28798676 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,986 [-]



## AC 16 B S SG: 4,75 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-1-15 | -10  | 10   | 1,362                | 0,0683     | 19.935,50            | 0,1439       |
| B2-1-15 | -10  | 5    | 1,315                | 0,0653     | 20.152,10            | 0,0531       |
| B2-1-15 | -10  | 3    | 1,263                | 0,0645     | 19.574,90            | 0,0617       |
| B2-1-15 | -10  | 1    | 1,161                | 0,0637     | 18.224,80            | 0,0747       |
| B2-1-15 | -10  | 0,3  | 1,081                | 0,0628     | 17.214,80            | 0,0908       |
| B2-1-15 | -10  | 0,1  | 1,011                | 0,0632     | 15.991,60            | 0,1126       |
| B2-1-18 | -10  | 10   | 1,362                | 0,0676     | 20.153,80            | 0,0744       |
| B2-1-18 | -10  | 5    | 1,314                | 0,07       | 18.776,60            | 0,0585       |
| B2-1-18 | -10  | 3    | 1,263                | 0,0673     | 18.762,50            | 0,0805       |
| B2-1-18 | -10  | 1    | 1,162                | 0,0653     | 17.785,60            | 0,0915       |
| B2-1-18 | -10  | 0,3  | 1,08                 | 0,0656     | 16.475,70            | 0,105        |
| B2-1-18 | -10  | 0,1  | 1,011                | 0,0648     | 15.603,80            | 0,1049       |
| B2-1-21 | -10  | 10   | 1,359                | 0,0713     | 19.070,70            | 0,1199       |
| B2-1-21 | -10  | 5    | 1,264                | 0,0713     | 17.735,60            | 0,0883       |
| B2-1-21 | -10  | 3    | 1,214                | 0,0715     | 16.983,50            | 0,0786       |
| B2-1-21 | -10  | 1    | 1,113                | 0,0661     | 16.820,80            | 0,0855       |
| B2-1-21 | -10  | 0,3  | 1,061                | 0,068      | 15.603,90            | 0,0889       |
| B2-1-21 | -10  | 0,1  | 0,991                | 0,0686     | 14.456,90            | 0,1102       |
| B2-1-15 | 5    | 10   | 1,013                | 0,0633     | 16.014,60            | 0,0711       |
| B2-1-15 | 5    | 5    | 0,964                | 0,0662     | 14.561,90            | 0,1378       |
| B2-1-15 | 5    | 3    | 0,913                | 0,0668     | 13.665,70            | 0,1164       |
| B2-1-15 | 5    | 1    | 0,811                | 0,0637     | 12.734,30            | 0,1351       |
| B2-1-15 | 5    | 0,3  | 0,711                | 0,0612     | 11.620,80            | 0,1351       |
| B2-1-15 | 5    | 0,1  | 0,631                | 0,0604     | 10.441,90            | 0,1509       |
| B2-1-18 | 5    | 10   | 1,061                | 0,0647     | 16.403,90            | 0,0649       |
| B2-1-18 | 5    | 5    | 1,014                | 0,0625     | 16.228,90            | 0,1021       |
| B2-1-18 | 5    | 3    | 0,963                | 0,0636     | 15.140,50            | 0,1208       |
| B2-1-18 | 5    | 1    | 0,861                | 0,0609     | 14.135,50            | 0,1458       |
| B2-1-18 | 5    | 0,3  | 0,79                 | 0,0622     | 12.693,40            | 0,1503       |
| B2-1-18 | 5    | 0,1  | 0,71                 | 0,0628     | 11.317,10            | 0,1643       |
| B2-1-21 | 5    | 10   | 1,012                | 0,0673     | 15.045,50            | 0,042        |
| B2-1-21 | 5    | 5    | 0,965                | 0,0705     | 13.685,30            | 0,1061       |
| B2-1-21 | 5    | 3    | 0,914                | 0,0681     | 13.416,40            | 0,142        |
| B2-1-21 | 5    | 1    | 0,811                | 0,0685     | 11.851,20            | 0,1056       |
| B2-1-21 | 5    | 0,3  | 0,71                 | 0,0654     | 10.866,90            | 0,1534       |
| B2-1-21 | 5    | 0,1  | 0,64                 | 0,0661     | 9.689,20             | 0,1446       |
| B2-1-15 | 20   | 10   | 0,563                | 0,0622     | 9.056,80             | 0,2026       |
| B2-1-15 | 20   | 5    | 0,534                | 0,0636     | 8.402,70             | 0,1809       |
| B2-1-15 | 20   | 3    | 0,513                | 0,0674     | 7.616,50             | 0,2556       |
| B2-1-15 | 20   | 1    | 0,442                | 0,0657     | 6.722,90             | 0,2399       |
| B2-1-15 | 20   | 0,3  | 0,361                | 0,0664     | 5.431,60             | 0,2812       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-1-15 | 20   | 0,1  | 0,281                | 0,0606     | 4.634,80             | 0,3271       |
| B2-1-18 | 20   | 10   | 0,565                | 0,0609     | 9.283,40             | 0,1573       |
| B2-1-18 | 20   | 5    | 0,544                | 0,0621     | 8.762,20             | 0,1895       |
| B2-1-18 | 20   | 3    | 0,514                | 0,0611     | 8.403,80             | 0,25         |
| B2-1-18 | 20   | 1    | 0,452                | 0,0647     | 6.978,00             | 0,2785       |
| B2-1-18 | 20   | 0,3  | 0,37                 | 0,0629     | 5.885,70             | 0,2552       |
| B2-1-18 | 20   | 0,1  | 0,31                 | 0,0639     | 4.850,00             | 0,3233       |
| B2-1-21 | 20   | 10   | 0,564                | 0,0629     | 8.978,50             | 0,2115       |
| B2-1-21 | 20   | 5    | 0,534                | 0,0659     | 8.098,20             | 0,2226       |
| B2-1-21 | 20   | 3    | 0,513                | 0,0672     | 7.637,80             | 0,1937       |
| B2-1-21 | 20   | 1    | 0,442                | 0,0686     | 6.440,90             | 0,2479       |
| B2-1-21 | 20   | 0,3  | 0,36                 | 0,0666     | 5.405,30             | 0,2975       |
| B2-1-21 | 20   | 0,1  | 0,29                 | 0,0634     | 4.576,10             | 0,3426       |
| B2-1-05 | 35   | 10   | 0,364                | 0,0669     | 5.443,60             | 0,3014       |
| B2-1-05 | 35   | 5    | 0,335                | 0,0688     | 4.871,80             | 0,3087       |
| B2-1-05 | 35   | 3    | 0,293                | 0,0682     | 4.296,30             | 0,3216       |
| B2-1-05 | 35   | 1    | 0,243                | 0,0705     | 3.438,20             | 0,3592       |
| B2-1-05 | 35   | 0,3  | 0,181                | 0,0636     | 2.846,60             | 0,3705       |
| B2-1-05 | 35   | 0,1  | 0,152                | 0,068      | 2.232,80             | 0,3785       |
| B2-1-13 | 35   | 10   | 0,316                | 0,065      | 4.858,10             | 0,2937       |
| B2-1-13 | 35   | 5    | 0,285                | 0,0625     | 4.552,90             | 0,3196       |
| B2-1-13 | 35   | 3    | 0,264                | 0,0628     | 4.200,30             | 0,3267       |
| B2-1-13 | 35   | 1    | 0,212                | 0,0658     | 3.226,70             | 0,3756       |
| B2-1-13 | 35   | 0,3  | 0,161                | 0,0615     | 2.616,80             | 0,3789       |
| B2-1-13 | 35   | 0,1  | 0,142                | 0,0662     | 2.139,70             | 0,4093       |
| B2-1-17 | 35   | 10   | 0,316                | 0,0665     | 4.750,20             | 0,3308       |
| B2-1-17 | 35   | 5    | 0,285                | 0,0717     | 3.975,20             | 0,3362       |
| B2-1-17 | 35   | 3    | 0,244                | 0,065      | 3.753,70             | 0,306        |
| B2-1-17 | 35   | 1    | 0,212                | 0,0713     | 2.970,60             | 0,3793       |
| B2-1-17 | 35   | 0,3  | 0,15                 | 0,0632     | 2.381,60             | 0,4052       |
| B2-1-17 | 35   | 0,1  | 0,131                | 0,069      | 1.895,90             | 0,4429       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                28.048 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                     25.791 [-]  
 b1                    -0,4118101 [-]  
 b2                    1,17253445 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,973 [-]

## AC 16 B S SG: 5,00 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-2-06 | -10  | 10   | 1,46                 | 0,0699     | 20.899,90            | 0,0107       |
| B2-2-06 | -10  | 5    | 1,365                | 0,0701     | 19.487,90            | 0,074        |
| B2-2-06 | -10  | 3    | 1,313                | 0,0705     | 18.637,00            | 0,0677       |
| B2-2-06 | -10  | 1    | 1,212                | 0,0687     | 17.637,60            | 0,0662       |
| B2-2-06 | -10  | 0,3  | 1,131                | 0,0682     | 16.580,40            | 0,0962       |
| B2-2-06 | -10  | 0,1  | 1,061                | 0,0684     | 15.518,90            | 0,1111       |
| B2-2-09 | -10  | 10   | 1,462                | 0,0639     | 22.864,90            | 0,1062       |
| B2-2-09 | -10  | 5    | 1,416                | 0,0668     | 21.186,50            | 0,0678       |
| B2-2-09 | -10  | 3    | 1,364                | 0,0668     | 20.414,70            | 0,0601       |
| B2-2-09 | -10  | 1    | 1,263                | 0,0637     | 19.839,70            | 0,0948       |
| B2-2-09 | -10  | 0,3  | 1,181                | 0,0641     | 18.408,30            | 0,0783       |
| B2-2-09 | -10  | 0,1  | 1,111                | 0,0648     | 17.147,70            | 0,1033       |
| B2-2-05 | -10  | 10   | 1,461                | 0,0636     | 22.958,20            | 0,0969       |
| B2-2-05 | -10  | 5    | 1,414                | 0,0625     | 22.621,30            | 0,0792       |
| B2-2-05 | -10  | 3    | 1,364                | 0,0624     | 21.861,50            | 0,1276       |
| B2-2-05 | -10  | 1    | 1,262                | 0,0608     | 20.762,50            | 0,0685       |
| B2-2-05 | -10  | 0,3  | 1,182                | 0,0607     | 19.458,70            | 0,0648       |
| B2-2-05 | -10  | 0,1  | 1,112                | 0,0607     | 18.328,00            | 0,1228       |
| B2-2-06 | 5    | 10   | 1,012                | 0,0674     | 15.019,60            | 0,1409       |
| B2-2-06 | 5    | 5    | 0,964                | 0,0641     | 15.051,50            | 0,1291       |
| B2-2-06 | 5    | 3    | 0,913                | 0,0652     | 14.008,70            | 0,1309       |
| B2-2-06 | 5    | 1    | 0,811                | 0,0636     | 12.747,50            | 0,1421       |
| B2-2-06 | 5    | 0,3  | 0,71                 | 0,0621     | 11.432,20            | 0,1638       |
| B2-2-06 | 5    | 0,1  | 0,641                | 0,0625     | 10.262,60            | 0,1823       |
| B2-2-09 | 5    | 10   | 1,063                | 0,0653     | 16.271,80            | 0,1718       |
| B2-2-09 | 5    | 5    | 1,013                | 0,0631     | 16.039,80            | 0,1101       |
| B2-2-09 | 5    | 3    | 0,965                | 0,0626     | 15.412,10            | 0,1325       |
| B2-2-09 | 5    | 1    | 0,862                | 0,0619     | 13.919,70            | 0,1179       |
| B2-2-09 | 5    | 0,3  | 0,811                | 0,0638     | 12.717,10            | 0,148        |
| B2-2-09 | 5    | 0,1  | 0,741                | 0,064      | 11.586,90            | 0,1688       |
| B2-2-05 | 5    | 10   | 1,009                | 0,0614     | 16.426,30            | 0,0943       |
| B2-2-05 | 5    | 5    | 0,962                | 0,0607     | 15.853,90            | 0,1094       |
| B2-2-05 | 5    | 3    | 0,943                | 0,0615     | 15.342,70            | 0,0787       |
| B2-2-05 | 5    | 1    | 0,862                | 0,061      | 14.141,20            | 0,1415       |
| B2-2-05 | 5    | 0,3  | 0,811                | 0,0626     | 12.940,10            | 0,1363       |
| B2-2-05 | 5    | 0,1  | 0,741                | 0,0645     | 11.487,20            | 0,1683       |
| B2-2-06 | 20   | 10   | 0,615                | 0,0626     | 9.822,00             | 0,1927       |
| B2-2-06 | 20   | 5    | 0,585                | 0,0664     | 8.818,10             | 0,2147       |
| B2-2-06 | 20   | 3    | 0,564                | 0,0676     | 8.339,90             | 0,218        |
| B2-2-06 | 20   | 1    | 0,492                | 0,0693     | 7.097,80             | 0,2708       |
| B2-2-06 | 20   | 0,3  | 0,411                | 0,0714     | 5.755,30             | 0,2912       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-2-06 | 20   | 0,1  | 0,331                | 0,0687     | 4.820,20             | 0,3366       |
| B2-2-09 | 20   | 10   | 0,613                | 0,0645     | 9.515,50             | 0,3068       |
| B2-2-09 | 20   | 5    | 0,585                | 0,0659     | 8.884,70             | 0,2406       |
| B2-2-09 | 20   | 3    | 0,564                | 0,0662     | 8.517,10             | 0,2099       |
| B2-2-09 | 20   | 1    | 0,481                | 0,0676     | 7.114,50             | 0,2843       |
| B2-2-09 | 20   | 0,3  | 0,401                | 0,0686     | 5.840,70             | 0,2772       |
| B2-2-09 | 20   | 0,1  | 0,331                | 0,0675     | 4.907,40             | 0,312        |
| B2-2-05 | 20   | 10   | 0,633                | 0,0637     | 9.929,90             | 0,1709       |
| B2-2-05 | 20   | 5    | 0,615                | 0,0685     | 8.974,50             | 0,2186       |
| B2-2-05 | 20   | 3    | 0,583                | 0,0692     | 8.430,20             | 0,2473       |
| B2-2-05 | 20   | 1    | 0,482                | 0,0684     | 7.049,80             | 0,2444       |
| B2-2-05 | 20   | 0,3  | 0,399                | 0,0676     | 5.905,70             | 0,2868       |
| B2-2-05 | 20   | 0,1  | 0,331                | 0,0682     | 4.848,20             | 0,3296       |
| B2-2-01 | 35   | 10   | 0,295                | 0,0696     | 4.235,80             | 0,3349       |
| B2-2-01 | 35   | 5    | 0,264                | 0,0695     | 3.806,10             | 0,3417       |
| B2-2-01 | 35   | 3    | 0,224                | 0,0625     | 3.582,10             | 0,3632       |
| B2-2-01 | 35   | 1    | 0,171                | 0,0625     | 2.738,30             | 0,3975       |
| B2-2-01 | 35   | 0,3  | 0,141                | 0,0653     | 2.156,40             | 0,407        |
| B2-2-01 | 35   | 0,1  | 0,111                | 0,0637     | 1.748,20             | 0,42         |
| B2-2-20 | 35   | 10   | 0,316                | 0,0632     | 4.997,90             | 0,2674       |
| B2-2-20 | 35   | 5    | 0,284                | 0,0653     | 4.339,90             | 0,3381       |
| B2-2-20 | 35   | 3    | 0,264                | 0,0661     | 3.998,30             | 0,3606       |
| B2-2-20 | 35   | 1    | 0,212                | 0,0693     | 3.055,20             | 0,3758       |
| B2-2-20 | 35   | 0,3  | 0,161                | 0,0661     | 2.435,20             | 0,3752       |
| B2-2-20 | 35   | 0,1  | 0,132                | 0,0667     | 1.973,20             | 0,4197       |
| B2-2-23 | 35   | 10   | 0,317                | 0,0663     | 4.778,60             | 0,2917       |
| B2-2-23 | 35   | 5    | 0,284                | 0,0665     | 4.265,30             | 0,3362       |
| B2-2-23 | 35   | 3    | 0,263                | 0,0677     | 3.892,40             | 0,3571       |
| B2-2-23 | 35   | 1    | 0,212                | 0,0667     | 3.177,30             | 0,3886       |
| B2-2-23 | 35   | 0,3  | 0,161                | 0,0667     | 2.410,60             | 0,4013       |
| B2-2-23 | 35   | 0,1  | 0,132                | 0,0677     | 1.942,40             | 0,4138       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                0 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                29.768 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                     27.579 [-]  
 b1                    -0,4244998 [-]  
 b2                    1,2361237 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,978 [-]

## AC 16 B S SG: 5,68 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-3-02 | -10  | 10   | 1,56                 | 0,0644     | 24.216,90            | 0,067        |
| B2-3-02 | -10  | 5    | 1,514                | 0,0676     | 22.386,90            | 0,0756       |
| B2-3-02 | -10  | 3    | 1,464                | 0,0656     | 22.322,00            | 0,0703       |
| B2-3-02 | -10  | 1    | 1,363                | 0,066      | 20.650,80            | 0,0839       |
| B2-3-02 | -10  | 0,3  | 1,282                | 0,0661     | 19.384,20            | 0,1215       |
| B2-3-02 | -10  | 0,1  | 1,212                | 0,0686     | 17.654,10            | 0,1228       |
| B2-3-10 | -10  | 10   | 1,511                | 0,0657     | 23.006,10            | 0,0554       |
| B2-3-10 | -10  | 5    | 1,465                | 0,0642     | 22.832,50            | 0,0554       |
| B2-3-10 | -10  | 3    | 1,414                | 0,0677     | 20.903,90            | 0,0694       |
| B2-3-10 | -10  | 1    | 1,312                | 0,0691     | 19.002,40            | 0,0874       |
| B2-3-10 | -10  | 0,3  | 1,231                | 0,0635     | 19.390,10            | 0,1126       |
| B2-3-10 | -10  | 0,1  | 1,161                | 0,0655     | 17.738,40            | 0,1209       |
| B2-3-17 | -10  | 10   | 1,505                | 0,0657     | 22.922,80            | 0,0554       |
| B2-3-17 | -10  | 5    | 1,46                 | 0,0642     | 22.749,80            | 0,0554       |
| B2-3-17 | -10  | 3    | 1,409                | 0,0677     | 20.828,20            | 0,0694       |
| B2-3-17 | -10  | 1    | 1,307                | 0,0691     | 18.933,60            | 0,0874       |
| B2-3-17 | -10  | 0,3  | 1,226                | 0,0635     | 19.319,90            | 0,1126       |
| B2-3-17 | -10  | 0,1  | 1,157                | 0,0655     | 17.674,10            | 0,1209       |
| B2-3-02 | 5    | 10   | 1,158                | 0,062      | 18.672,00            | 0,1565       |
| B2-3-02 | 5    | 5    | 1,063                | 0,0623     | 17.057,20            | 0,1741       |
| B2-3-02 | 5    | 3    | 1,012                | 0,0629     | 16.094,20            | 0,1544       |
| B2-3-02 | 5    | 1    | 0,912                | 0,0631     | 14.457,60            | 0,1611       |
| B2-3-02 | 5    | 0,3  | 0,81                 | 0,0624     | 12.979,70            | 0,173        |
| B2-3-02 | 5    | 0,1  | 0,811                | 0,0713     | 11.376,60            | 0,2108       |
| B2-3-10 | 5    | 10   | 1,159                | 0,0627     | 18.475,90            | 0,103        |
| B2-3-10 | 5    | 5    | 1,063                | 0,0618     | 17.202,80            | 0,1732       |
| B2-3-10 | 5    | 3    | 0,962                | 0,0607     | 15.850,90            | 0,1069       |
| B2-3-10 | 5    | 1    | 0,912                | 0,0627     | 14.546,70            | 0,1677       |
| B2-3-10 | 5    | 0,3  | 0,81                 | 0,0645     | 12.557,70            | 0,1911       |
| B2-3-10 | 5    | 0,1  | 0,711                | 0,0639     | 11.122,80            | 0,2236       |
| B2-3-17 | 5    | 10   | 1,163                | 0,0638     | 18.224,20            | 0,1231       |
| B2-3-17 | 5    | 5    | 1,063                | 0,0612     | 17.364,90            | 0,1405       |
| B2-3-17 | 5    | 3    | 1,013                | 0,0616     | 16.440,20            | 0,1632       |
| B2-3-17 | 5    | 1    | 0,913                | 0,0627     | 14.564,10            | 0,1604       |
| B2-3-17 | 5    | 0,3  | 0,811                | 0,0629     | 12.893,50            | 0,2188       |
| B2-3-17 | 5    | 0,1  | 0,71                 | 0,0656     | 10.827,30            | 0,2295       |
| B2-3-02 | 20   | 10   | 0,615                | 0,0621     | 9.895,00             | 0,1948       |
| B2-3-02 | 20   | 5    | 0,585                | 0,063      | 9.287,00             | 0,2476       |
| B2-3-02 | 20   | 3    | 0,563                | 0,0653     | 8.615,90             | 0,2773       |
| B2-3-02 | 20   | 1    | 0,482                | 0,0685     | 7.035,80             | 0,2981       |
| B2-3-02 | 20   | 0,3  | 0,38                 | 0,0693     | 5.488,10             | 0,3679       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-3-02 | 20   | 0,1  | 0,291                | 0,0674     | 4.311,80             | 0,3844       |
| B2-3-10 | 20   | 10   | 0,612                | 0,0627     | 9.761,60             | 0,3042       |
| B2-3-10 | 20   | 5    | 0,585                | 0,0643     | 9.104,60             | 0,3031       |
| B2-3-10 | 20   | 3    | 0,564                | 0,0719     | 7.837,80             | 0,2519       |
| B2-3-10 | 20   | 1    | 0,452                | 0,0683     | 6.609,00             | 0,3304       |
| B2-3-10 | 20   | 0,3  | 0,361                | 0,0714     | 5.050,60             | 0,3875       |
| B2-3-10 | 20   | 0,1  | 0,26                 | 0,067      | 3.886,20             | 0,4178       |
| B2-3-17 | 20   | 10   | 0,614                | 0,066      | 9.312,40             | 0,2032       |
| B2-3-17 | 20   | 5    | 0,564                | 0,0726     | 7.769,40             | 0,2707       |
| B2-3-17 | 20   | 3    | 0,512                | 0,0714     | 7.177,40             | 0,307        |
| B2-3-17 | 20   | 1    | 0,392                | 0,0713     | 5.503,20             | 0,3331       |
| B2-3-17 | 20   | 0,3  | 0,311                | 0,0719     | 4.324,30             | 0,3789       |
| B2-3-17 | 20   | 0,1  | 0,211                | 0,0632     | 3.335,10             | 0,4264       |
| B2-3-01 | 35   | 10   | 0,266                | 0,0663     | 4.017,90             | 0,3954       |
| B2-3-01 | 35   | 5    | 0,233                | 0,0646     | 3.613,90             | 0,353        |
| B2-3-01 | 35   | 3    | 0,213                | 0,068      | 3.131,30             | 0,3791       |
| B2-3-01 | 35   | 1    | 0,162                | 0,0669     | 2.426,50             | 0,4125       |
| B2-3-01 | 35   | 0,3  | 0,121                | 0,0652     | 1.863,80             | 0,4081       |
| B2-3-01 | 35   | 0,1  | 0,092                | 0,0629     | 1.454,80             | 0,4353       |
| B2-3-08 | 35   | 10   | 0,265                | 0,062      | 4.268,70             | 0,3961       |
| B2-3-08 | 35   | 5    | 0,235                | 0,0643     | 3.646,00             | 0,4096       |
| B2-3-08 | 35   | 3    | 0,213                | 0,0656     | 3.249,60             | 0,4022       |
| B2-3-08 | 35   | 1    | 0,162                | 0,0669     | 2.421,80             | 0,4306       |
| B2-3-08 | 35   | 0,3  | 0,122                | 0,0647     | 1.878,90             | 0,4443       |
| B2-3-08 | 35   | 0,1  | 0,092                | 0,0615     | 1.496,20             | 0,4518       |
| B2-3-13 | 35   | 10   | 0,264                | 0,0676     | 3.903,30             | 0,3877       |
| B2-3-13 | 35   | 5    | 0,234                | 0,0657     | 3.562,60             | 0,3842       |
| B2-3-13 | 35   | 3    | 0,213                | 0,0663     | 3.211,70             | 0,4001       |
| B2-3-13 | 35   | 1    | 0,162                | 0,0654     | 2.482,80             | 0,4239       |
| B2-3-13 | 35   | 0,3  | 0,122                | 0,0648     | 1.877,50             | 0,4365       |
| B2-3-13 | 35   | 0,1  | 0,092                | 0,0614     | 1.498,20             | 0,4438       |

Tr                    20 [°C]  
E\_min                52 [N/mm<sup>2</sup>]  
E\_max                28.673 [N/mm<sup>2</sup>]  
m                     25.322 [-]  
b1                    -0,5469448 [-]  
b2                    1,28318623 [-]  
R<sup>2</sup>                   0,982 [-]

## AC 16 B S SG: 5,98 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-4-11 | -10  | 10   | 1,478                | 0,0647     | 22.833,60            | 0,0975       |
| B2-4-11 | -10  | 5    | 1,43                 | 0,0655     | 21.850,70            | 0,085        |
| B2-4-11 | -10  | 3    | 1,379                | 0,0639     | 21.579,90            | 0,1047       |
| B2-4-11 | -10  | 1    | 1,327                | 0,0676     | 19.649,50            | 0,1009       |
| B2-4-11 | -10  | 0,3  | 1,244                | 0,0678     | 18.366,70            | 0,1101       |
| B2-4-11 | -10  | 0,1  | 1,174                | 0,0686     | 17.123,10            | 0,1168       |
| B2-4-13 | -10  | 10   | 1,459                | 0,066      | 22.097,60            | 0,0559       |
| B2-4-13 | -10  | 5    | 1,414                | 0,063      | 22.449,00            | 0,0951       |
| B2-4-13 | -10  | 3    | 1,364                | 0,0607     | 22.469,40            | 0,0489       |
| B2-4-13 | -10  | 1    | 1,311                | 0,0627     | 20.918,70            | 0,1067       |
| B2-4-13 | -10  | 0,3  | 1,228                | 0,0618     | 19.876,60            | 0,0858       |
| B2-4-13 | -10  | 0,1  | 1,159                | 0,0618     | 18.751,60            | 0,0929       |
| B2-4-18 | -10  | 10   | 1,46                 | 0,0647     | 22.559,40            | 0,0975       |
| B2-4-18 | -10  | 5    | 1,413                | 0,0655     | 21.588,40            | 0,085        |
| B2-4-18 | -10  | 3    | 1,363                | 0,0639     | 21.320,80            | 0,1047       |
| B2-4-18 | -10  | 1    | 1,312                | 0,0676     | 19.413,50            | 0,1009       |
| B2-4-18 | -10  | 0,3  | 1,229                | 0,0678     | 18.146,10            | 0,1101       |
| B2-4-18 | -10  | 0,1  | 1,16                 | 0,0686     | 16.917,50            | 0,1168       |
| B2-4-11 | 5    | 10   | 0,963                | 0,0668     | 14.408,80            | 0,1031       |
| B2-4-11 | 5    | 5    | 0,915                | 0,0678     | 13.499,50            | 0,1346       |
| B2-4-11 | 5    | 3    | 0,864                | 0,0682     | 12.666,80            | 0,1145       |
| B2-4-11 | 5    | 1    | 0,761                | 0,066      | 11.526,10            | 0,1666       |
| B2-4-11 | 5    | 0,3  | 0,659                | 0,0654     | 10.070,70            | 0,1589       |
| B2-4-11 | 5    | 0,1  | 0,559                | 0,0596     | 9.387,70             | 0,1631       |
| B2-4-13 | 5    | 10   | 0,963                | 0,0668     | 14.410,60            | 0,1576       |
| B2-4-13 | 5    | 5    | 0,914                | 0,0681     | 13.416,30            | 0,1026       |
| B2-4-13 | 5    | 3    | 0,864                | 0,0658     | 13.139,40            | 0,1461       |
| B2-4-13 | 5    | 1    | 0,76                 | 0,0631     | 12.045,90            | 0,1572       |
| B2-4-13 | 5    | 0,3  | 0,658                | 0,0619     | 10.631,90            | 0,1567       |
| B2-4-13 | 5    | 0,1  | 0,609                | 0,0643     | 9.476,90             | 0,1872       |
| B2-4-18 | 5    | 10   | 0,964                | 0,0629     | 15.334,70            | 0,1589       |
| B2-4-18 | 5    | 5    | 0,913                | 0,0623     | 14.651,00            | 0,16         |
| B2-4-18 | 5    | 3    | 0,863                | 0,0647     | 13.349,10            | 0,2099       |
| B2-4-18 | 5    | 1    | 0,76                 | 0,0611     | 12.440,50            | 0,2124       |
| B2-4-18 | 5    | 0,3  | 0,708                | 0,067      | 10.567,70            | 0,1823       |
| B2-4-18 | 5    | 0,1  | 0,659                | 0,0695     | 9.480,40             | 0,222        |
| B2-4-11 | 20   | 10   | 0,565                | 0,0626     | 9.018,00             | 0,2069       |
| B2-4-11 | 20   | 5    | 0,534                | 0,0658     | 8.120,80             | 0,2325       |
| B2-4-11 | 20   | 3    | 0,514                | 0,07       | 7.335,90             | 0,2645       |
| B2-4-11 | 20   | 1    | 0,421                | 0,0685     | 6.147,30             | 0,2937       |
| B2-4-11 | 20   | 0,3  | 0,34                 | 0,0692     | 4.917,10             | 0,3119       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-4-11 | 20   | 0,1  | 0,26                 | 0,0668     | 3.894,10             | 0,3469       |
| B2-4-13 | 20   | 10   | 0,564                | 0,0685     | 8.242,20             | 0,1941       |
| B2-4-13 | 20   | 5    | 0,515                | 0,0709     | 7.257,50             | 0,1825       |
| B2-4-13 | 20   | 3    | 0,464                | 0,069      | 6.719,20             | 0,2574       |
| B2-4-13 | 20   | 1    | 0,381                | 0,0681     | 5.601,60             | 0,2847       |
| B2-4-13 | 20   | 0,3  | 0,29                 | 0,0639     | 4.536,00             | 0,3264       |
| B2-4-13 | 20   | 0,1  | 0,26                 | 0,0709     | 3.670,70             | 0,34         |
| B2-4-18 | 20   | 10   | 0,515                | 0,0652     | 7.904,40             | 0,2648       |
| B2-4-18 | 20   | 5    | 0,485                | 0,0656     | 7.385,10             | 0,2648       |
| B2-4-18 | 20   | 3    | 0,464                | 0,071      | 6.537,30             | 0,2626       |
| B2-4-18 | 20   | 1    | 0,362                | 0,0684     | 5.295,30             | 0,3226       |
| B2-4-18 | 20   | 0,3  | 0,28                 | 0,0663     | 4.218,10             | 0,3505       |
| B2-4-18 | 20   | 0,1  | 0,211                | 0,0652     | 3.230,70             | 0,4101       |
| B2-4-12 | 35   | 10   | 0,264                | 0,0708     | 3.728,80             | 0,3619       |
| B2-4-12 | 35   | 5    | 0,215                | 0,0679     | 3.166,70             | 0,3361       |
| B2-4-12 | 35   | 3    | 0,193                | 0,0689     | 2.803,80             | 0,3554       |
| B2-4-12 | 35   | 1    | 0,142                | 0,0652     | 2.182,50             | 0,3979       |
| B2-4-12 | 35   | 0,3  | 0,112                | 0,0642     | 1.736,00             | 0,412        |
| B2-4-12 | 35   | 0,1  | 0,082                | 0,0598     | 1.376,30             | 0,4189       |
| B2-4-22 | 35   | 10   | 0,246                | 0,0665     | 3.704,40             | 0,3511       |
| B2-4-22 | 35   | 5    | 0,215                | 0,0691     | 3.109,40             | 0,3651       |
| B2-4-22 | 35   | 3    | 0,193                | 0,0698     | 2.770,70             | 0,3868       |
| B2-4-22 | 35   | 1    | 0,142                | 0,067      | 2.124,40             | 0,4009       |
| B2-4-22 | 35   | 0,3  | 0,092                | 0,0596     | 1.537,30             | 0,4032       |
| B2-4-22 | 35   | 0,1  | 0,072                | 0,059      | 1.225,50             | 0,4201       |
| B2-4-24 | 35   | 10   | 0,266                | 0,0703     | 3.779,10             | 0,4462       |
| B2-4-24 | 35   | 5    | 0,214                | 0,067      | 3.198,00             | 0,4001       |
| B2-4-24 | 35   | 3    | 0,194                | 0,0656     | 2.952,20             | 0,3867       |
| B2-4-24 | 35   | 1    | 0,143                | 0,061      | 2.336,90             | 0,4127       |
| B2-4-24 | 35   | 0,3  | 0,111                | 0,0618     | 1.803,80             | 0,3833       |
| B2-4-24 | 35   | 0,1  | 0,092                | 0,0621     | 1.483,40             | 0,4246       |

Tr                            20 [°C]  
E\_min                        1 [N/mm<sup>2</sup>]  
E\_max                        32.322 [N/mm<sup>2</sup>]  
m                              29.066 [-]  
b1                            -0,4388743 [-]  
b2                            1,60810851 [-]  
R<sup>2</sup>                            0,992 [-]



## AC 16 B S SG: 6,55 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-5-05 | -10  | 10   | 1,463                | 0,0646     | 22.640,20            | 0,0959       |
| B2-5-05 | -10  | 5    | 1,413                | 0,0657     | 21.516,70            | 0,106        |
| B2-5-05 | -10  | 3    | 1,363                | 0,0664     | 20.532,70            | 0,0828       |
| B2-5-05 | -10  | 1    | 1,262                | 0,0659     | 19.139,90            | 0,1111       |
| B2-5-05 | -10  | 0,3  | 1,18                 | 0,0668     | 17.666,40            | 0,1297       |
| B2-5-05 | -10  | 0,1  | 1,111                | 0,0674     | 16.472,60            | 0,1285       |
| B2-5-06 | -10  | 10   | 1,461                | 0,0645     | 22.634,10            | 0,084        |
| B2-5-06 | -10  | 5    | 1,414                | 0,0644     | 21.948,50            | 0,0859       |
| B2-5-06 | -10  | 3    | 1,364                | 0,064      | 21.296,50            | 0,0915       |
| B2-5-06 | -10  | 1    | 1,262                | 0,0635     | 19.879,80            | 0,1022       |
| B2-5-06 | -10  | 0,3  | 1,18                 | 0,0636     | 18.552,30            | 0,1066       |
| B2-5-06 | -10  | 0,1  | 1,11                 | 0,0636     | 17.441,00            | 0,1154       |
| B2-5-11 | -10  | 10   | 1,458                | 0,0645     | 22.588,40            | 0,084        |
| B2-5-11 | -10  | 5    | 1,411                | 0,0644     | 21.904,20            | 0,0859       |
| B2-5-11 | -10  | 3    | 1,361                | 0,064      | 21.253,50            | 0,0915       |
| B2-5-11 | -10  | 1    | 1,259                | 0,0635     | 19.839,70            | 0,1022       |
| B2-5-11 | -10  | 0,3  | 1,178                | 0,0636     | 18.514,90            | 0,1066       |
| B2-5-11 | -10  | 0,1  | 1,108                | 0,0636     | 17.405,80            | 0,1154       |
| B2-5-05 | 5    | 10   | 0,962                | 0,0648     | 14.846,80            | 0,0927       |
| B2-5-05 | 5    | 5    | 0,913                | 0,0647     | 14.116,40            | 0,132        |
| B2-5-05 | 5    | 3    | 0,864                | 0,0647     | 13.366,00            | 0,1224       |
| B2-5-05 | 5    | 1    | 0,761                | 0,0625     | 12.168,60            | 0,1542       |
| B2-5-05 | 5    | 0,3  | 0,709                | 0,0659     | 10.750,60            | 0,1749       |
| B2-5-05 | 5    | 0,1  | 0,659                | 0,0695     | 9.472,50             | 0,1838       |
| B2-5-06 | 5    | 10   | 0,965                | 0,0655     | 14.731,90            | 0,1322       |
| B2-5-06 | 5    | 5    | 0,914                | 0,064      | 14.287,30            | 0,1465       |
| B2-5-06 | 5    | 3    | 0,863                | 0,0637     | 13.550,00            | 0,1196       |
| B2-5-06 | 5    | 1    | 0,762                | 0,0633     | 12.024,90            | 0,152        |
| B2-5-06 | 5    | 0,3  | 0,709                | 0,0654     | 10.846,10            | 0,151        |
| B2-5-06 | 5    | 0,1  | 0,64                 | 0,068      | 9.413,90             | 0,1818       |
| B2-5-11 | 5    | 10   | 0,912                | 0,0722     | 12.639,30            | 0,1972       |
| B2-5-11 | 5    | 5    | 0,864                | 0,0725     | 11.918,30            | 0,1417       |
| B2-5-11 | 5    | 3    | 0,763                | 0,0686     | 11.127,70            | 0,148        |
| B2-5-11 | 5    | 1    | 0,662                | 0,0647     | 10.234,00            | 0,1673       |
| B2-5-11 | 5    | 0,3  | 0,61                 | 0,0684     | 8.925,00             | 0,1743       |
| B2-5-11 | 5    | 0,1  | 0,54                 | 0,0677     | 7.976,00             | 0,1953       |
| B2-5-05 | 20   | 10   | 0,515                | 0,0605     | 8.525,80             | 0,196        |
| B2-5-05 | 20   | 5    | 0,495                | 0,0635     | 7.794,90             | 0,2641       |
| B2-5-05 | 20   | 3    | 0,463                | 0,0635     | 7.291,10             | 0,2792       |
| B2-5-05 | 20   | 1    | 0,392                | 0,0643     | 6.094,70             | 0,2707       |
| B2-5-05 | 20   | 0,3  | 0,31                 | 0,0652     | 4.761,00             | 0,3232       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B2-5-05 | 20   | 0,1  | 0,261                | 0,0655     | 3.978,90             | 0,3375       |
| B2-5-06 | 20   | 10   | 0,514                | 0,0647     | 7.949,50             | 0,2295       |
| B2-5-06 | 20   | 5    | 0,486                | 0,0718     | 6.766,60             | 0,2408       |
| B2-5-06 | 20   | 3    | 0,464                | 0,0716     | 6.477,10             | 0,2151       |
| B2-5-06 | 20   | 1    | 0,371                | 0,0696     | 5.332,50             | 0,2831       |
| B2-5-06 | 20   | 0,3  | 0,29                 | 0,0687     | 4.226,30             | 0,3077       |
| B2-5-06 | 20   | 0,1  | 0,24                 | 0,0699     | 3.431,60             | 0,3382       |
| B2-5-11 | 20   | 10   | 0,514                | 0,0688     | 7.470,80             | 0,203        |
| B2-5-11 | 20   | 5    | 0,465                | 0,0691     | 6.719,40             | 0,242        |
| B2-5-11 | 20   | 3    | 0,433                | 0,0702     | 6.173,20             | 0,2761       |
| B2-5-11 | 20   | 1    | 0,342                | 0,0675     | 5.062,50             | 0,2956       |
| B2-5-11 | 20   | 0,3  | 0,26                 | 0,0648     | 4.019,80             | 0,3185       |
| B2-5-11 | 20   | 0,1  | 0,211                | 0,0649     | 3.245,60             | 0,3635       |
| B2-5-08 | 35   | 10   | 0,244                | 0,0636     | 3.830,00             | 0,3501       |
| B2-5-08 | 35   | 5    | 0,224                | 0,0665     | 3.371,20             | 0,3535       |
| B2-5-08 | 35   | 3    | 0,204                | 0,0687     | 2.962,00             | 0,3764       |
| B2-5-08 | 35   | 1    | 0,16                 | 0,0684     | 2.336,30             | 0,3949       |
| B2-5-08 | 35   | 0,3  | 0,129                | 0,0687     | 1.878,00             | 0,3962       |
| B2-5-08 | 35   | 0,1  | 0,1                  | 0,0652     | 1.536,70             | 0,4102       |
| B2-5-09 | 35   | 10   | 0,246                | 0,0665     | 3.690,30             | 0,369        |
| B2-5-09 | 35   | 5    | 0,224                | 0,0716     | 3.130,40             | 0,3191       |
| B2-5-09 | 35   | 3    | 0,194                | 0,0645     | 3.002,10             | 0,3203       |
| B2-5-09 | 35   | 1    | 0,151                | 0,0659     | 2.286,90             | 0,3859       |
| B2-5-09 | 35   | 0,3  | 0,12                 | 0,0644     | 1.856,20             | 0,3864       |
| B2-5-09 | 35   | 0,1  | 0,09                 | 0,0604     | 1.486,20             | 0,4052       |
| B2-5-14 | 35   | 10   | 0,245                | 0,069      | 3.553,70             | 0,3817       |
| B2-5-14 | 35   | 5    | 0,214                | 0,0698     | 3.063,70             | 0,3543       |
| B2-5-14 | 35   | 3    | 0,194                | 0,0711     | 2.722,70             | 0,3571       |
| B2-5-14 | 35   | 1    | 0,15                 | 0,0694     | 2.167,10             | 0,3779       |
| B2-5-14 | 35   | 0,3  | 0,119                | 0,0696     | 1.711,80             | 0,3993       |
| B2-5-14 | 35   | 0,1  | 0,09                 | 0,0645     | 1.396,50             | 0,4242       |

Tr                            20 [°C]  
E\_min                        0 [N/mm<sup>2</sup>]  
E\_max                        36.259 [N/mm<sup>2</sup>]  
m                             29.152 [-]  
b1                            -0,4045114 [-]  
b2                            1,77528492 [-]  
R<sup>2</sup>                            0,989 [-]

## AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| BA-10   | -10  | 10   | 1,561                | 0,067      | 23.284,20            | 0,0775       |
| BA-10   | -10  | 5    | 1,512                | 0,0665     | 22.735,50            | 0,0912       |
| BA-10   | -10  | 3    | 1,464                | 0,0643     | 22.781,30            | 0,0822       |
| BA-10   | -10  | 1    | 1,362                | 0,0627     | 21.716,10            | 0,0911       |
| BA-10   | -10  | 0,3  | 1,261                | 0,0597     | 21.100,80            | 0,1293       |
| BA-10   | -10  | 0,1  | 1,211                | 0,0611     | 19.810,40            | 0,1067       |
| BA-18   | -10  | 10   | 1,557                | 0,0669     | 23.260,70            | 0,0425       |
| BA-18   | -10  | 5    | 1,512                | 0,0682     | 22.176,50            | 0,0652       |
| BA-18   | -10  | 3    | 1,462                | 0,0663     | 22.035,30            | 0,0604       |
| BA-18   | -10  | 1    | 1,361                | 0,0655     | 20.790,70            | 0,0858       |
| BA-18   | -10  | 0,3  | 1,311                | 0,0679     | 19.293,80            | 0,1053       |
| BA-18   | -10  | 0,1  | 1,211                | 0,0656     | 18.461,30            | 0,1013       |
| BA-11   | -10  | 10   | 1,557                | 0,0653     | 23.844,40            | 0,1222       |
| BA-11   | -10  | 5    | 1,512                | 0,0654     | 23.103,20            | 0,0757       |
| BA-11   | -10  | 3    | 1,463                | 0,0647     | 22.631,80            | 0,0854       |
| BA-11   | -10  | 1    | 1,412                | 0,0606     | 23.302,90            | 0,1132       |
| BA-11   | -10  | 0,3  | 1,311                | 0,0606     | 21.615,50            | 0,1055       |
| BA-11   | -10  | 0,1  | 1,211                | 0,0599     | 20.235,70            | 0,1313       |
| BA-10   | 5    | 10   | 1,068                | 0,0694     | 15.399,60            | 0,1322       |
| BA-10   | 5    | 5    | 0,964                | 0,0659     | 14.624,90            | 0,1462       |
| BA-10   | 5    | 3    | 0,911                | 0,0658     | 13.837,00            | 0,1168       |
| BA-10   | 5    | 1    | 0,805                | 0,067      | 12.018,00            | 0,2092       |
| BA-10   | 5    | 0,3  | 0,703                | 0,0649     | 10.839,50            | 0,2153       |
| BA-10   | 5    | 0,1  | 0,605                | 0,0654     | 9.245,70             | 0,2301       |
| BA-18   | 5    | 10   | 1,067                | 0,0633     | 16.853,90            | 0,1588       |
| BA-18   | 5    | 5    | 1,014                | 0,0617     | 16.421,20            | 0,1447       |
| BA-18   | 5    | 3    | 0,959                | 0,0613     | 15.643,40            | 0,1821       |
| BA-18   | 5    | 1    | 0,854                | 0,0623     | 13.718,80            | 0,179        |
| BA-18   | 5    | 0,3  | 0,751                | 0,0626     | 12.000,90            | 0,2155       |
| BA-18   | 5    | 0,1  | 0,653                | 0,0616     | 10.599,90            | 0,2471       |
| BA-11   | 5    | 10   | 1,067                | 0,0698     | 15.299,90            | 0,1444       |
| BA-11   | 5    | 5    | 0,912                | 0,0655     | 13.921,80            | 0,1843       |
| BA-11   | 5    | 3    | 0,859                | 0,0625     | 13.745,70            | 0,1671       |
| BA-11   | 5    | 1    | 0,753                | 0,0618     | 12.188,20            | 0,1844       |
| BA-11   | 5    | 0,3  | 0,65                 | 0,0618     | 10.517,90            | 0,2216       |
| BA-11   | 5    | 0,1  | 0,603                | 0,067      | 9.003,40             | 0,224        |
| BA-10   | 20   | 10   | 0,566                | 0,068      | 8.323,90             | 0,2438       |
| BA-10   | 20   | 5    | 0,49                 | 0,0666     | 7.360,50             | 0,2549       |
| BA-10   | 20   | 3    | 0,442                | 0,0659     | 6.713,50             | 0,2754       |
| BA-10   | 20   | 1    | 0,361                | 0,0645     | 5.590,40             | 0,2851       |
| BA-10   | 20   | 0,3  | 0,309                | 0,0693     | 4.454,70             | 0,3343       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| BA-10   | 20   | 0,1  | 0,229                | 0,065      | 3.521,70             | 0,3642       |
| BA-18   | 20   | 10   | 0,585                | 0,0652     | 8.968,90             | 0,2379       |
| BA-18   | 20   | 5    | 0,507                | 0,0609     | 8.327,30             | 0,2756       |
| BA-18   | 20   | 3    | 0,472                | 0,0609     | 7.752,20             | 0,2789       |
| BA-18   | 20   | 1    | 0,4                  | 0,0632     | 6.329,50             | 0,3085       |
| BA-18   | 20   | 0,3  | 0,34                 | 0,0676     | 5.027,60             | 0,3533       |
| BA-18   | 20   | 0,1  | 0,278                | 0,0722     | 3.848,40             | 0,3835       |
| BA-11   | 20   | 10   | 0,585                | 0,0618     | 9.458,90             | 0,2632       |
| BA-11   | 20   | 5    | 0,513                | 0,0609     | 8.435,80             | 0,2547       |
| BA-11   | 20   | 3    | 0,482                | 0,0634     | 7.607,60             | 0,2823       |
| BA-11   | 20   | 1    | 0,408                | 0,0644     | 6.332,80             | 0,3228       |
| BA-11   | 20   | 0,3  | 0,285                | 0,0685     | 4.162,40             | 0,3412       |
| BA-11   | 20   | 0,1  | 0,222                | 0,0675     | 3.293,90             | 0,3798       |
| BA-13   | 35   | 10   | 0,266                | 0,0637     | 4.173,70             | 0,2636       |
| BA-13   | 35   | 5    | 0,233                | 0,0664     | 3.514,90             | 0,3741       |
| BA-13   | 35   | 3    | 0,213                | 0,0685     | 3.106,10             | 0,3808       |
| BA-13   | 35   | 1    | 0,16                 | 0,0655     | 2.447,90             | 0,3972       |
| BA-13   | 35   | 0,3  | 0,129                | 0,0665     | 1.942,90             | 0,42         |
| BA-13   | 35   | 0,1  | 0,11                 | 0,0697     | 1.574,20             | 0,4418       |
| BA-14   | 35   | 10   | 0,265                | 0,0643     | 4.119,10             | 0,3966       |
| BA-14   | 35   | 5    | 0,234                | 0,0662     | 3.532,10             | 0,3726       |
| BA-14   | 35   | 3    | 0,212                | 0,0704     | 3.015,30             | 0,3934       |
| BA-14   | 35   | 1    | 0,16                 | 0,0685     | 2.329,70             | 0,4246       |
| BA-14   | 35   | 0,3  | 0,128                | 0,0711     | 1.806,60             | 0,4454       |
| BA-14   | 35   | 0,1  | 0,099                | 0,0692     | 1.435,70             | 0,4976       |
| BA-21   | 35   | 10   | 0,267                | 0,0628     | 4.249,20             | 0,3547       |
| BA-21   | 35   | 5    | 0,245                | 0,0634     | 3.856,90             | 0,3524       |
| BA-21   | 35   | 3    | 0,214                | 0,0634     | 3.375,80             | 0,3913       |
| BA-21   | 35   | 1    | 0,16                 | 0,0604     | 2.653,90             | 0,4249       |
| BA-21   | 35   | 0,3  | 0,139                | 0,0665     | 2.084,20             | 0,4492       |
| BA-21   | 35   | 0,1  | 0,109                | 0,0683     | 1.601,70             | 0,4773       |

Tr                            20 [°C]  
E\_min                        0 [N/mm<sup>2</sup>]  
E\_max                        35.574 [N/mm<sup>2</sup>]  
m                              28.820 [-]  
b1                            -0,428294 [-]  
b2                            1,63258287 [-]  
R<sup>2</sup>                            0,985 [-]

## SMA 16 B S: 5,17 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B1-1-06 | -10  | 10   | 1,56                 | 0,0647     | 24.101,10            | 0,0844       |
| B1-1-06 | -10  | 5    | 1,513                | 0,0692     | 21.863,80            | 0,0614       |
| B1-1-06 | -10  | 3    | 1,463                | 0,0674     | 21.692,80            | 0,0866       |
| B1-1-06 | -10  | 1    | 1,362                | 0,0653     | 20.869,00            | 0,0691       |
| B1-1-06 | -10  | 0,3  | 1,262                | 0,0647     | 19.499,80            | 0,0996       |
| B1-1-06 | -10  | 0,1  | 1,162                | 0,0638     | 18.204,30            | 0,115        |
| B1-1-08 | -10  | 10   | 1,461                | 0,0714     | 20.481,30            | 0,0178       |
| B1-1-08 | -10  | 5    | 1,364                | 0,0671     | 20.322,50            | 0,1168       |
| B1-1-08 | -10  | 3    | 1,312                | 0,0669     | 19.604,00            | 0,0694       |
| B1-1-08 | -10  | 1    | 1,212                | 0,0646     | 18.760,30            | 0,0971       |
| B1-1-08 | -10  | 0,3  | 1,111                | 0,0625     | 17.778,30            | 0,0719       |
| B1-1-08 | -10  | 0,1  | 1,011                | 0,0604     | 16.728,80            | 0,1152       |
| B1-1-09 | -10  | 10   | 1,562                | 0,0627     | 24.889,40            | 0,0719       |
| B1-1-09 | -10  | 5    | 1,514                | 0,0651     | 23.232,40            | 0,0495       |
| B1-1-09 | -10  | 3    | 1,463                | 0,0628     | 23.288,10            | 0,0764       |
| B1-1-09 | -10  | 1    | 1,362                | 0,0627     | 21.739,40            | 0,0829       |
| B1-1-09 | -10  | 0,3  | 1,261                | 0,0616     | 20.455,60            | 0,0938       |
| B1-1-09 | -10  | 0,1  | 1,161                | 0,0597     | 19.445,30            | 0,1009       |
| B1-1-06 | 5    | 10   | 1,061                | 0,0646     | 16.407,10            | 0,1891       |
| B1-1-06 | 5    | 5    | 0,964                | 0,0642     | 15.009,50            | 0,1417       |
| B1-1-06 | 5    | 3    | 0,914                | 0,0615     | 14.859,70            | 0,1514       |
| B1-1-06 | 5    | 1    | 0,86                 | 0,0652     | 13.194,60            | 0,1583       |
| B1-1-06 | 5    | 0,3  | 0,759                | 0,0639     | 11.877,80            | 0,1899       |
| B1-1-06 | 5    | 0,1  | 0,659                | 0,0656     | 10.041,80            | 0,256        |
| B1-1-08 | 5    | 10   | 1,064                | 0,0631     | 16.854,80            | 0,1777       |
| B1-1-08 | 5    | 5    | 0,965                | 0,0636     | 15.180,30            | 0,1502       |
| B1-1-08 | 5    | 3    | 0,913                | 0,0626     | 14.586,30            | 0,1357       |
| B1-1-08 | 5    | 1    | 0,861                | 0,0636     | 13.547,70            | 0,1747       |
| B1-1-08 | 5    | 0,3  | 0,759                | 0,0637     | 11.916,60            | 0,1675       |
| B1-1-08 | 5    | 0,1  | 0,659                | 0,0625     | 10.540,80            | 0,2378       |
| B1-1-09 | 5    | 10   | 1,063                | 0,0643     | 16.530,60            | 0,1583       |
| B1-1-09 | 5    | 5    | 0,964                | 0,0664     | 14.519,70            | 0,1107       |
| B1-1-09 | 5    | 3    | 0,914                | 0,0643     | 14.211,40            | 0,1537       |
| B1-1-09 | 5    | 1    | 0,86                 | 0,0671     | 12.824,10            | 0,1489       |
| B1-1-09 | 5    | 0,3  | 0,76                 | 0,0673     | 11.289,80            | 0,1899       |
| B1-1-09 | 5    | 0,1  | 0,659                | 0,0674     | 9.772,00             | 0,2204       |
| B1-1-06 | 20   | 10   | 0,564                | 0,0607     | 9.304,50             | 0,2102       |
| B1-1-06 | 20   | 5    | 0,514                | 0,0618     | 8.330,90             | 0,2573       |
| B1-1-06 | 20   | 3    | 0,464                | 0,0608     | 7.625,30             | 0,3112       |
| B1-1-06 | 20   | 1    | 0,382                | 0,0622     | 6.143,80             | 0,3116       |
| B1-1-06 | 20   | 0,3  | 0,311                | 0,0647     | 4.809,00             | 0,3809       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B1-1-06 | 20   | 0,1  | 0,241                | 0,0612     | 3.936,60             | 0,3897       |
| B1-1-08 | 20   | 10   | 0,564                | 0,0668     | 8.446,90             | 0,2208       |
| B1-1-08 | 20   | 5    | 0,514                | 0,0687     | 7.478,60             | 0,2829       |
| B1-1-08 | 20   | 3    | 0,462                | 0,0653     | 7.079,80             | 0,2861       |
| B1-1-08 | 20   | 1    | 0,383                | 0,0673     | 5.687,10             | 0,3107       |
| B1-1-08 | 20   | 0,3  | 0,312                | 0,0697     | 4.475,00             | 0,3392       |
| B1-1-08 | 20   | 0,1  | 0,242                | 0,0677     | 3.570,80             | 0,4047       |
| B1-1-09 | 20   | 10   | 0,614                | 0,0637     | 9.636,40             | 0,2417       |
| B1-1-09 | 20   | 5    | 0,563                | 0,0683     | 8.249,50             | 0,2935       |
| B1-1-09 | 20   | 3    | 0,514                | 0,0645     | 7.962,80             | 0,2761       |
| B1-1-09 | 20   | 1    | 0,442                | 0,0681     | 6.492,80             | 0,3299       |
| B1-1-09 | 20   | 0,3  | 0,361                | 0,07       | 5.161,30             | 0,3641       |
| B1-1-09 | 20   | 0,1  | 0,261                | 0,0653     | 4.000,80             | 0,405        |
| B1-1-01 | 35   | 10   | 0,265                | 0,0658     | 4.031,50             | 0,3466       |
| B1-1-01 | 35   | 5    | 0,235                | 0,0687     | 3.424,60             | 0,3626       |
| B1-1-01 | 35   | 3    | 0,213                | 0,0673     | 3.166,20             | 0,3998       |
| B1-1-01 | 35   | 1    | 0,16                 | 0,0665     | 2.407,50             | 0,4276       |
| B1-1-01 | 35   | 0,3  | 0,128                | 0,0676     | 1.898,60             | 0,4314       |
| B1-1-01 | 35   | 0,1  | 0,109                | 0,0719     | 1.510,70             | 0,4533       |
| B1-1-05 | 35   | 10   | 0,265                | 0,0667     | 3.969,30             | 0,4191       |
| B1-1-05 | 35   | 5    | 0,235                | 0,0647     | 3.630,60             | 0,3852       |
| B1-1-05 | 35   | 3    | 0,213                | 0,0706     | 3.014,20             | 0,4084       |
| B1-1-05 | 35   | 1    | 0,161                | 0,0687     | 2.338,50             | 0,4166       |
| B1-1-05 | 35   | 0,3  | 0,129                | 0,0704     | 1.836,20             | 0,4427       |
| B1-1-05 | 35   | 0,1  | 0,1                  | 0,0689     | 1.445,10             | 0,4547       |
| B1-1-24 | 35   | 10   | 0,287                | 0,0662     | 4.331,10             | 0,4051       |
| B1-1-24 | 35   | 5    | 0,255                | 0,0714     | 3.566,90             | 0,3432       |
| B1-1-24 | 35   | 3    | 0,212                | 0,0697     | 3.045,30             | 0,3982       |
| B1-1-24 | 35   | 1    | 0,16                 | 0,0661     | 2.420,90             | 0,4066       |
| B1-1-24 | 35   | 0,3  | 0,129                | 0,0678     | 1.898,60             | 0,4377       |
| B1-1-24 | 35   | 0,1  | 0,101                | 0,0716     | 1.408,10             | 0,5099       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                9 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                29.411 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                    27.663 [-]  
 b1                    -0,4867545 [-]  
 b2                    1,37242185 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,985 [-]

## SMA 16 B S: 5,47 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B1-2-04 | -10  | 10   | 1,413                | 0,0689     | 20.503,70            | 0,039        |
| B1-2-04 | -10  | 5    | 1,364                | 0,0683     | 19.979,70            | 0,0528       |
| B1-2-04 | -10  | 3    | 1,313                | 0,0669     | 19.617,40            | 0,0726       |
| B1-2-04 | -10  | 1    | 1,212                | 0,0663     | 18.283,10            | 0,0886       |
| B1-2-04 | -10  | 0,3  | 1,111                | 0,0654     | 16.984,00            | 0,1044       |
| B1-2-04 | -10  | 0,1  | 1,01                 | 0,0621     | 16.266,90            | 0,1048       |
| B1-2-07 | -10  | 10   | 1,464                | 0,0616     | 23.787,70            | 0,0562       |
| B1-2-07 | -10  | 5    | 1,414                | 0,0631     | 22.402,40            | 0,0775       |
| B1-2-07 | -10  | 3    | 1,364                | 0,0611     | 22.328,90            | 0,0521       |
| B1-2-07 | -10  | 1    | 1,262                | 0,0604     | 20.891,70            | 0,0736       |
| B1-2-07 | -10  | 0,3  | 1,211                | 0,0615     | 19.691,20            | 0,1062       |
| B1-2-07 | -10  | 0,1  | 1,111                | 0,06       | 18.509,00            | 0,1168       |
| B1-2-08 | -10  | 10   | 1,464                | 0,0635     | 23.037,60            | 0,01779      |
| B1-2-08 | -10  | 5    | 1,412                | 0,0619     | 22.817,80            | 0,0506       |
| B1-2-08 | -10  | 3    | 1,364                | 0,0616     | 22.135,90            | 0,0805       |
| B1-2-08 | -10  | 1    | 1,263                | 0,0606     | 20.849,90            | 0,0863       |
| B1-2-08 | -10  | 0,3  | 1,211                | 0,0614     | 19.716,10            | 0,0976       |
| B1-2-08 | -10  | 0,1  | 1,111                | 0,06       | 18.502,60            | 0,1214       |
| B1-2-04 | 5    | 10   | 0,963                | 0,0675     | 14.256,70            | 0,1533       |
| B1-2-04 | 5    | 5    | 0,915                | 0,0667     | 13.719,50            | 0,1422       |
| B1-2-04 | 5    | 3    | 0,863                | 0,0669     | 12.892,70            | 0,1097       |
| B1-2-04 | 5    | 1    | 0,761                | 0,0657     | 11.579,90            | 0,1672       |
| B1-2-04 | 5    | 0,3  | 0,659                | 0,0662     | 9.942,70             | 0,1957       |
| B1-2-04 | 5    | 0,1  | 0,56                 | 0,0643     | 8.706,50             | 0,2078       |
| B1-2-07 | 5    | 10   | 1,065                | 0,0638     | 16.700,20            | 0,1187       |
| B1-2-07 | 5    | 5    | 0,964                | 0,062      | 15.557,80            | 0,1176       |
| B1-2-07 | 5    | 3    | 0,914                | 0,0624     | 14.656,00            | 0,1746       |
| B1-2-07 | 5    | 1    | 0,861                | 0,0651     | 13.213,90            | 0,1659       |
| B1-2-07 | 5    | 0,3  | 0,759                | 0,0656     | 11.563,70            | 0,1707       |
| B1-2-07 | 5    | 0,1  | 0,66                 | 0,0653     | 10.108,10            | 0,2323       |
| B1-2-08 | 5    | 10   | 1,064                | 0,0637     | 16.707,80            | 0,1505       |
| B1-2-08 | 5    | 5    | 0,963                | 0,0622     | 15.479,70            | 0,1131       |
| B1-2-08 | 5    | 3    | 0,913                | 0,0622     | 14.677,90            | 0,1655       |
| B1-2-08 | 5    | 1    | 0,862                | 0,0632     | 13.637,50            | 0,1676       |
| B1-2-08 | 5    | 0,3  | 0,76                 | 0,0651     | 11.675,40            | 0,1847       |
| B1-2-08 | 5    | 0,1  | 0,66                 | 0,0651     | 10.136,80            | 0,2291       |
| B1-2-04 | 20   | 10   | 0,466                | 0,0632     | 7.378,80             | 0,237        |
| B1-2-04 | 20   | 5    | 0,434                | 0,0686     | 6.331,90             | 0,2624       |
| B1-2-04 | 20   | 3    | 0,413                | 0,0703     | 5.865,20             | 0,3106       |
| B1-2-04 | 20   | 1    | 0,342                | 0,0704     | 4.864,10             | 0,3192       |
| B1-2-04 | 20   | 0,3  | 0,261                | 0,068      | 3.847,60             | 0,3663       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B1-2-04 | 20   | 0,1  | 0,212                | 0,0707     | 2.991,40             | 0,4401       |
| B1-2-07 | 20   | 10   | 0,516                | 0,06       | 8.598,40             | 0,3143       |
| B1-2-07 | 20   | 5    | 0,494                | 0,0604     | 8.171,10             | 0,2432       |
| B1-2-07 | 20   | 3    | 0,464                | 0,0636     | 7.287,20             | 0,2803       |
| B1-2-07 | 20   | 1    | 0,383                | 0,0655     | 5.845,80             | 0,3278       |
| B1-2-07 | 20   | 0,3  | 0,311                | 0,0682     | 4.565,40             | 0,3494       |
| B1-2-07 | 20   | 0,1  | 0,241                | 0,0657     | 3.672,20             | 0,4063       |
| B1-2-08 | 20   | 10   | 0,565                | 0,0679     | 8.320,20             | 0,2367       |
| B1-2-08 | 20   | 5    | 0,514                | 0,0705     | 7.285,30             | 0,28         |
| B1-2-08 | 20   | 3    | 0,464                | 0,0707     | 6.553,10             | 0,3107       |
| B1-2-08 | 20   | 1    | 0,362                | 0,0689     | 5.252,30             | 0,3387       |
| B1-2-08 | 20   | 0,3  | 0,29                 | 0,0698     | 4.161,20             | 0,3694       |
| B1-2-08 | 20   | 0,1  | 0,211                | 0,064      | 3.302,30             | 0,3808       |
| B1-2-01 | 35   | 10   | 0,236                | 0,0643     | 3.676,50             | 0,1907       |
| B1-2-01 | 35   | 5    | 0,205                | 0,0656     | 3.122,40             | 0,3698       |
| B1-2-01 | 35   | 3    | 0,183                | 0,0672     | 2.727,40             | 0,3896       |
| B1-2-01 | 35   | 1    | 0,131                | 0,062      | 2.116,90             | 0,4316       |
| B1-2-01 | 35   | 0,3  | 0,11                 | 0,0676     | 1.628,10             | 0,4225       |
| B1-2-01 | 35   | 0,1  | 0,08                 | 0,0633     | 1.266,90             | 0,4542       |
| B1-2-05 | 35   | 10   | 0,245                | 0,0603     | 4.071,40             | 0,3885       |
| B1-2-05 | 35   | 5    | 0,214                | 0,0614     | 3.495,00             | 0,3692       |
| B1-2-05 | 35   | 3    | 0,193                | 0,0628     | 3.071,20             | 0,3773       |
| B1-2-05 | 35   | 1    | 0,141                | 0,0622     | 2.262,90             | 0,4454       |
| B1-2-05 | 35   | 0,3  | 0,119                | 0,067      | 1.783,50             | 0,4254       |
| B1-2-05 | 35   | 0,1  | 0,089                | 0,0629     | 1.421,50             | 0,4584       |
| B1-2-13 | 35   | 10   | 0,246                | 0,0622     | 3.953,60             | 0,387        |
| B1-2-13 | 35   | 5    | 0,215                | 0,062      | 3.458,40             | 0,3517       |
| B1-2-13 | 35   | 3    | 0,192                | 0,0618     | 3.112,40             | 0,36         |
| B1-2-13 | 35   | 1    | 0,14                 | 0,0609     | 2.299,00             | 0,4147       |
| B1-2-13 | 35   | 0,3  | 0,119                | 0,0647     | 1.839,00             | 0,4196       |
| B1-2-13 | 35   | 0,1  | 0,09                 | 0,0602     | 1.489,80             | 0,4546       |

Tr                    20 [°C]  
E\_min                8 [N/mm<sup>2</sup>]  
E\_max                28.539 [N/mm<sup>2</sup>]  
m                     27.920 [-]  
b1                    -0,497384 [-]  
b2                    1,42272376 [-]  
R<sup>2</sup>                   0,984 [-]



## SMA 16 B S: 6,03 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B1-3-12 | -10  | 10   | 1,464                | 0,064      | 22.874,50            | 0,0288       |
| B1-3-12 | -10  | 5    | 1,414                | 0,0647     | 21.846,60            | 0,0556       |
| B1-3-12 | -10  | 3    | 1,363                | 0,0622     | 21.910,90            | 0,0792       |
| B1-3-12 | -10  | 1    | 1,262                | 0,0609     | 20.715,40            | 0,0838       |
| B1-3-12 | -10  | 0,3  | 1,162                | 0,0613     | 18.950,20            | 0,1195       |
| B1-3-12 | -10  | 0,1  | 1,062                | 0,0585     | 18.147,00            | 0,1073       |
| B1-3-13 | -10  | 10   | 1,513                | 0,0629     | 24.046,20            | 0,0732       |
| B1-3-13 | -10  | 5    | 1,463                | 0,0621     | 23.576,60            | 0,0787       |
| B1-3-13 | -10  | 3    | 1,415                | 0,0632     | 22.394,20            | 0,0671       |
| B1-3-13 | -10  | 1    | 1,312                | 0,0614     | 21.362,50            | 0,0804       |
| B1-3-13 | -10  | 0,3  | 1,211                | 0,0612     | 19.807,20            | 0,1067       |
| B1-3-13 | -10  | 0,1  | 1,112                | 0,0588     | 18.906,80            | 0,106        |
| B1-3-14 | -10  | 10   | 1,462                | 0,0633     | 23.096,40            | 0,0508       |
| B1-3-14 | -10  | 5    | 1,412                | 0,0683     | 20.671,10            | 0,0718       |
| B1-3-14 | -10  | 3    | 1,363                | 0,0684     | 19.938,00            | 0,0787       |
| B1-3-14 | -10  | 1    | 1,262                | 0,0668     | 18.900,00            | 0,0807       |
| B1-3-14 | -10  | 0,3  | 1,161                | 0,0674     | 17.226,00            | 0,1002       |
| B1-3-14 | -10  | 0,1  | 1,061                | 0,0658     | 16.117,00            | 0,1188       |
| B1-3-12 | 5    | 10   | 0,964                | 0,0615     | 15.683,90            | 0,0655       |
| B1-3-12 | 5    | 5    | 0,935                | 0,0615     | 15.212,10            | 0,1433       |
| B1-3-12 | 5    | 3    | 0,913                | 0,0641     | 14.229,80            | 0,1524       |
| B1-3-12 | 5    | 1    | 0,862                | 0,0681     | 12.660,80            | 0,1617       |
| B1-3-12 | 5    | 0,3  | 0,759                | 0,069      | 10.994,10            | 0,2142       |
| B1-3-12 | 5    | 0,1  | 0,659                | 0,0693     | 9.504,40             | 0,2436       |
| B1-3-13 | 5    | 10   | 1,014                | 0,0625     | 16.216,40            | 0,1473       |
| B1-3-13 | 5    | 5    | 0,933                | 0,0611     | 15.273,00            | 0,1535       |
| B1-3-13 | 5    | 3    | 0,914                | 0,0607     | 15.064,70            | 0,1502       |
| B1-3-13 | 5    | 1    | 0,862                | 0,0656     | 13.137,00            | 0,1691       |
| B1-3-13 | 5    | 0,3  | 0,759                | 0,0664     | 11.424,40            | 0,1995       |
| B1-3-13 | 5    | 0,1  | 0,66                 | 0,0657     | 10.041,60            | 0,2145       |
| B1-3-14 | 5    | 10   | 0,962                | 0,0626     | 15.355,90            | 0,1592       |
| B1-3-14 | 5    | 5    | 0,933                | 0,066      | 14.142,80            | 0,0912       |
| B1-3-14 | 5    | 3    | 0,913                | 0,0684     | 13.338,30            | 0,16         |
| B1-3-14 | 5    | 1    | 0,862                | 0,0715     | 12.055,40            | 0,1479       |
| B1-3-14 | 5    | 0,3  | 0,71                 | 0,0685     | 10.357,80            | 0,2006       |
| B1-3-14 | 5    | 0,1  | 0,61                 | 0,0661     | 9.217,80             | 0,2148       |
| B1-3-12 | 20   | 10   | 0,515                | 0,0642     | 8.025,70             | 0,3112       |
| B1-3-12 | 20   | 5    | 0,464                | 0,0667     | 6.954,40             | 0,3007       |
| B1-3-12 | 20   | 3    | 0,415                | 0,0637     | 6.505,10             | 0,3559       |
| B1-3-12 | 20   | 1    | 0,312                | 0,064      | 4.870,80             | 0,411        |
| B1-3-12 | 20   | 0,3  | 0,24                 | 0,0657     | 3.653,60             | 0,4566       |

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_vert           | eps_vert   | E-Modul              | Ph.-Versch.1 |
|---------|------|------|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [rad]        |
| B1-3-12 | 20   | 0,1  | 0,181                | 0,0652     | 2.782,60             | 0,4892       |
| B1-3-13 | 20   | 10   | 0,514                | 0,0622     | 8.263,90             | 0,3103       |
| B1-3-13 | 20   | 5    | 0,494                | 0,0654     | 7.552,80             | 0,2912       |
| B1-3-13 | 20   | 3    | 0,463                | 0,0652     | 7.099,40             | 0,297        |
| B1-3-13 | 20   | 1    | 0,362                | 0,0651     | 5.550,40             | 0,3408       |
| B1-3-13 | 20   | 0,3  | 0,28                 | 0,0639     | 4.383,60             | 0,3628       |
| B1-3-13 | 20   | 0,1  | 0,211                | 0,0611     | 3.452,00             | 0,4133       |
| B1-3-14 | 20   | 10   | 0,516                | 0,062      | 8.319,70             | 0,2739       |
| B1-3-14 | 20   | 5    | 0,494                | 0,0643     | 7.684,60             | 0,2806       |
| B1-3-14 | 20   | 3    | 0,464                | 0,0654     | 7.091,10             | 0,2829       |
| B1-3-14 | 20   | 1    | 0,362                | 0,0656     | 5.518,60             | 0,3401       |
| B1-3-14 | 20   | 0,3  | 0,28                 | 0,0647     | 4.336,20             | 0,4143       |
| B1-3-14 | 20   | 0,1  | 0,211                | 0,0601     | 3.503,40             | 0,4178       |
| B1-3-04 | 35   | 10   | 0,235                | 0,061      | 3.853,40             | 0,4045       |
| B1-3-04 | 35   | 5    | 0,214                | 0,0715     | 2.987,80             | 0,4446       |
| B1-3-04 | 35   | 3    | 0,182                | 0,0665     | 2.735,10             | 0,4004       |
| B1-3-04 | 35   | 1    | 0,131                | 0,066      | 1.982,90             | 0,4198       |
| B1-3-04 | 35   | 0,3  | 0,109                | 0,0706     | 1.543,90             | 0,4497       |
| B1-3-04 | 35   | 0,1  | 0,08                 | 0,0636     | 1.259,70             | 0,4668       |
| B1-3-09 | 35   | 10   | 0,216                | 0,0629     | 3.425,80             | 0,4554       |
| B1-3-09 | 35   | 5    | 0,195                | 0,065      | 2.992,10             | 0,4141       |
| B1-3-09 | 35   | 3    | 0,162                | 0,0604     | 2.689,70             | 0,3907       |
| B1-3-09 | 35   | 1    | 0,131                | 0,0643     | 2.040,00             | 0,4172       |
| B1-3-09 | 35   | 0,3  | 0,11                 | 0,0697     | 1.575,70             | 0,4375       |
| B1-3-09 | 35   | 0,1  | 0,08                 | 0,0639     | 1.259,20             | 0,4702       |
| B1-3-15 | 35   | 10   | 0,216                | 0,067      | 3.221,90             | 0,3752       |
| B1-3-15 | 35   | 5    | 0,193                | 0,0699     | 2.762,20             | 0,4064       |
| B1-3-15 | 35   | 3    | 0,162                | 0,0656     | 2.470,10             | 0,4188       |
| B1-3-15 | 35   | 1    | 0,131                | 0,069      | 1.904,20             | 0,4333       |
| B1-3-15 | 35   | 0,3  | 0,109                | 0,0755     | 1.449,20             | 0,4498       |
| B1-3-15 | 35   | 0,1  | 0,08                 | 0,0691     | 1.152,10             | 0,4665       |

Tr                    20 [°C]  
 E\_min                38 [N/mm<sup>2</sup>]  
 E\_max                26.906 [N/mm<sup>2</sup>]  
 m                     27.327 [-]  
 b1                    -0,5622268 [-]  
 b2                    1,39727394 [-]  
 R<sup>2</sup>                    0,992 [-]

**Anlage 5: Ergebnisse der Ermüdungsversuche**

SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,03 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D2-1-09 | 20   | 10   | 0,65                 | 698     | 0,223      | 5.344,50             |
| D2-1-10 | 20   | 10   | 0,62                 | 772     | 0,2        | 5.674,90             |
| D2-1-13 | 20   | 10   | 0,62                 | 1059    | 0,1852     | 6.118,90             |
| D2-1-11 | 20   | 10   | 0,35                 | 9681    | 0,0965     | 6.303,00             |
| D2-1-12 | 20   | 10   | 0,35                 | 8563    | 0,096      | 6.272,70             |
| D2-1-15 | 20   | 10   | 0,35                 | 9383    | 0,0869     | 6.879,40             |
| D2-1-02 | 20   | 10   | 0,23                 | 48564   | 0,0521     | 6.679,00             |
| D2-1-03 | 20   | 10   | 0,24                 | 48600   | 0,0533     | 6.944,40             |
| D2-1-07 | 20   | 10   | 0,23                 | 52475   | 0,0518     | 6.718,80             |

Ermüdungsfunktion:

a1            6,74148766  
a2            -3,0247718  
R<sup>2</sup>            0,996

SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,50 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D2-2-06 | 20   | 10   | 0,65                 | 2140    | 0,1849     | 6.455,20             |
| D2-2-08 | 20   | 10   | 0,66                 | 1598    | 0,2109     | 5.749,40             |
| D2-2-16 | 20   | 10   | 0,66                 | 2447    | 0,1807     | 6.729,40             |
| D2-2-01 | 20   | 10   | 0,4                  | 17043   | 0,1038     | 6.789,50             |
| D2-2-04 | 20   | 10   | 0,42                 | 7665    | 0,1228     | 6.051,90             |
| D2-2-09 | 20   | 10   | 0,41                 | 14113   | 0,1025     | 7.017,20             |
| D2-2-05 | 20   | 10   | 0,27                 | 124901  | 0,0572     | 7.561,60             |
| D2-2-12 | 20   | 10   | 0,27                 | 147142  | 0,0608     | 6.806,00             |
| D2-2-15 | 20   | 10   | 0,27                 | 99341   | 0,0622     | 6.973,50             |

Ermüdungsfunktion:

a1            5,64506908  
a2            -3,52664624  
R<sup>2</sup>            0,992

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,79 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D2-3-02 | 20   | 10   | 0,55                 | 1811    | 0,1932     | 5.137,70             |
| D2-3-03 | 20   | 10   | 0,55                 | 2140    | 0,1885     | 5.268,60             |
| D2-3-11 | 20   | 10   | 0,55                 | 1889    | 0,1949     | 5.083,20             |
| D2-3-01 | 20   | 10   | 0,35                 | 20614   | 0,1014     | 5.950,50             |
| D2-3-09 | 20   | 10   | 0,36                 | 21923   | 0,1038     | 6.007,20             |
| D2-3-08 | 20   | 10   | 0,36                 | 13476   | 0,1136     | 5.468,20             |
| D2-3-06 | 20   | 10   | 0,25                 | 109951  | 0,064      | 5.863,70             |
| D2-3-07 | 20   | 10   | 0,25                 | 87976   | 0,0628     | 6.016,40             |
| D2-3-16 | 20   | 10   | 0,25                 | 71244   | 0,0615     | 6.048,00             |

Ermüdungsfunktion:

a1            7,43371098  
a2            -3,41620462  
R<sup>2</sup>            0,988

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 7,52 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D2-4-03 | 20   | 10   | 0,5                  | 5397    | 0,1669     | 5.334                |
| D2-4-06 | 20   | 10   | 0,55                 | 4092    | 0,1893     | 5.223                |
| D2-4-13 | 20   | 10   | 0,55                 | 4388    | 0,1767     | 5.608                |
| D2-4-10 | 20   | 10   | 0,3                  | 47746   | 0,0901     | 5.468                |
| D2-4-12 | 20   | 10   | 0,34                 | 36716   | 0,094      | 5.876                |
| D2-4-14 | 20   | 10   | 0,35                 | 28011   | 0,1062     | 5.433                |
| D2-4-01 | 20   | 10   | 0,25                 | 143477  | 0,0577     | 6.353                |
| D2-4-08 | 20   | 10   | 0,25                 | 107524  | 0,0623     | 6.153                |
| D2-4-05 | 20   | 10   | 0,25                 | 146357  | 0,0619     | 6.390                |

Ermüdungsfunktion:

a1            21,72586074  
a2            -3,12767334  
R<sup>2</sup>            0,992

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 8,02 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D2-5-04 | 20   | 10   | 0,5                  | 4500    | 0,1814     | 4.883                |
| D2-5-10 | 20   | 10   | 0,525                | 3464    | 0,1986     | 4.706                |
| D2-5-15 | 20   | 10   | 0,525                | 3583    | 0,1843     | 5.094                |
| D2-5-08 | 20   | 10   | 0,34                 | 16269   | 0,117      | 4.839                |
| D2-5-11 | 20   | 10   | 0,34                 | 26298   | 0,1156     | 4.927                |
| D2-5-09 | 20   | 10   | 0,34                 | 17590   | 0,1039     | 5.484                |
| D2-5-03 | 20   | 10   | 0,23                 | 79251   | 0,0577     | 5.751                |
| D2-5-06 | 20   | 10   | 0,23                 | 86967   | 0,0552     | 6.285                |
| D2-5-05 | 20   | 10   | 0,22                 | 62108   | 0,066      | 4.733                |

Ermüdungsfunktion:

a1            60,60584634  
a2            -2,55097509  
R<sup>2</sup>            0,968

## SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A; 7,01 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| DA-08   | 20   | 10   | 0,72                 | 3126    | 0,1908     | 6.959                |
| DA-10   | 20   | 10   | 0,72                 | 3603    | 0,1839     | 7.211                |
| DA-14   | 20   | 10   | 0,72                 | 3578    | 0,2027     | 6.544                |
| DA-13   | 20   | 10   | 0,45                 | 22800   | 0,108      | 7.382                |
| DA-15   | 20   | 10   | 0,45                 | 30943   | 0,0962     | 8.299                |
| DA-16   | 20   | 10   | 0,45                 | 24517   | 0,1088     | 7.364                |
| DA-03   | 20   | 10   | 0,28                 | 201108  | 0,0544     | 8.223                |
| DA-06   | 20   | 10   | 0,29                 | 295415  | 0,0546     | 8.587                |
| DA-11   | 20   | 10   | 0,28                 | 197045  | 0,0586     | 7.721                |

Ermüdungsfunktion:

a1            12,93948261  
a2            -3,37747903  
R<sup>2</sup>            0,993

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D1-1-02 | 20   | 10   | 0,4                  | 1.422   | 0,1789     | 3.901                |
| D1-1-05 | 20   | 10   | 0,4                  | 1.776   | 0,1784     | 3.904                |
| D1-1-08 | 20   | 10   | 0,4                  | 925     | 0,2097     | 3.285                |
| D1-1-03 | 20   | 10   | 0,25                 | 6.866   | 0,0962     | 3.990                |
| D1-1-04 | 20   | 10   | 0,24                 | 5.955   | 0,0893     | 4.099                |
| D1-1-11 | 20   | 10   | 0,23                 | 10.608  | 0,0816     | 4.193                |
| D1-1-07 | 20   | 10   | 0,19                 | 21.130  | 0,0497     | 5.102                |
| D1-1-14 | 20   | 10   | 0,17                 | 23.358  | 0,0504     | 4.278                |
| D1-1-10 | 20   | 10   | 0,18                 | 26.934  | 0,0585     | 4.468                |

## Ermüdungsfunktion:

a1            31,45247469  
a2            -2,25374211  
R<sup>2</sup>            0,974

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D1-2-03 | 20   | 10   | 0,35                 | 2869    | 0,1962     | 3.001,90             |
| D1-2-05 | 20   | 10   | 0,35                 | 3759    | 0,1686     | 3.504,00             |
| D1-2-11 | 20   | 10   | 0,35                 | 2811    | 0,1642     | 3.581,50             |
| D1-2-04 | 20   | 10   | 0,22                 | 21108   | 0,088      | 3.698,10             |
| D1-2-13 | 20   | 10   | 0,23                 | 20589   | 0,0879     | 3.898,30             |
| D1-2-14 | 20   | 10   | 0,23                 | 22608   | 0,0888     | 3.805,90             |
| D1-2-06 | 20   | 10   | 0,18                 | 43108   | 0,0564     | 4.099,10             |
| D1-2-15 | 20   | 10   | 0,175                | 65220   | 0,0554     | 4.075,70             |
| D1-2-16 | 20   | 10   | 0,175                | 83108   | 0,0534     | 4.097,90             |

## Ermüdungsfunktion:

a1            37,30607091  
a2            -2,57407622  
R<sup>2</sup>            0,977

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D1-3-03 | 20   | 10   | 0,5                  | 3254    | 0,214      | 4.125                |
| D1-3-06 | 20   | 10   | 0,5                  | 3514    | 0,1806     | 4.893                |
| D1-3-12 | 20   | 10   | 0,5                  | 4012    | 0,1828     | 4.868                |
| D1-3-04 | 20   | 10   | 0,31                 | 23404   | 0,1018     | 4.878                |
| D1-3-14 | 20   | 10   | 0,31                 | 40052   | 0,0961     | 5.080                |
| D1-3-15 | 20   | 10   | 0,31                 | 26025   | 0,0935     | 5.527                |
| D1-3-07 | 20   | 10   | 0,22                 | 98027   | 0,0585     | 5.424                |
| D1-3-13 | 20   | 10   | 0,22                 | 122579  | 0,0545     | 5.643                |
| D1-3-08 | 20   | 10   | 0,24                 | 81680   | 0,0573     | 5.827                |

## Ermüdungsfunktion:

a1            42,73663099  
a2            -2,72892319  
R<sup>2</sup>            0,979

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| D1-5-07 | 20   | 10   | 0,45                 | 3697    | 0,1889     | 4.148                |
| D1-5-10 | 20   | 10   | 0,45                 | 4978    | 0,193      | 4.088                |
| D1-5-16 | 20   | 10   | 0,45                 | 8140    | 0,1592     | 4.968                |
| D1-5-03 | 20   | 10   | 0,3                  | 25056   | 0,1222     | 4.083                |
| D1-5-11 | 20   | 10   | 0,3                  | 26371   | 0,1051     | 4.686                |
| D1-5-14 | 20   | 10   | 0,3                  | 24243   | 0,1051     | 4.682                |
| D1-5-06 | 20   | 10   | 0,2                  | 119338  | 0,0625     | 4.295                |
| D1-5-09 | 20   | 10   | 0,22                 | 71240   | 0,0554     | 5.289                |
| D1-5-08 | 20   | 10   | 0,21                 | 209756  | 0,0583     | 5.350                |

## Ermüdungsfunktion:

a1            52,99169339  
a2            -2,7398801  
R<sup>2</sup>            0,932

## AC 16 B S SG: 4,75 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B2-1-02 | 20   | 10   | 0,9                  | 2349    | 0,1581     | 10.607               |
| B2-1-08 | 20   | 10   | 0,93                 | 1154    | 0,2042     | 8.515                |
| B2-1-15 | 20   | 10   | 0,93                 | 619     | 0,2189     | 7.917                |
| B2-1-01 | 20   | 10   | 0,55                 | 7441    | 0,1118     | 8.964                |
| B2-1-07 | 20   | 10   | 0,53                 | 19116   | 0,0859     | 11.225               |
| B2-1-14 | 20   | 10   | 0,53                 | 21381   | 0,0807     | 11.936               |
| B2-1-09 | 20   | 10   | 0,38                 | 116075  | 0,0589     | 10.558               |
| B2-1-11 | 20   | 10   | 0,38                 | 109452  | 0,0562     | 11.322               |
| B2-1-12 | 20   | 10   | 0,37                 | 121899  | 0,06       | 10.168               |

Ermüdungsfunktion:

a1            2,14832915  
a2            -3,78301558  
R<sup>2</sup>            0,989

## AC 16 B S SG: 5,00 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B2-2-07 | 20   | 10   | 0,9                  | 950     | 0,1762     | 9.497                |
| B2-2-11 | 20   | 10   | 0,9                  | 511     | 0,2089     | 7.975                |
| B2-2-12 | 20   | 10   | 0,88                 | 1934    | 0,1659     | 9.862                |
| B2-2-01 | 20   | 10   | 0,55                 | 14785   | 0,0884     | 11.325               |
| B2-2-02 | 20   | 10   | 0,56                 | 37390   | 0,0858     | 11.934               |
| B2-2-06 | 20   | 10   | 0,55                 | 22237   | 0,1029     | 9.748                |
| B2-2-03 | 20   | 10   | 0,35                 | 247033  | 0,0591     | 9.680                |
| B2-2-04 | 20   | 10   | 0,38                 | 284620  | 0,0564     | 10.741               |
| B2-2-13 | 20   | 10   | 0,39                 | 166761  | 0,056      | 11.063               |

Ermüdungsfunktion:

a1            0,36470298  
a2            -4,64864059  
R<sup>2</sup>            0,978



## AC 16 B S SG: 5,68 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B2-3-09 | 20   | 10   | 0,85                 | 1459    | 0,2087     | 7.564                |
| B2-3-10 | 20   | 10   | 0,85                 | 1428    | 0,1796     | 8.803                |
| B2-3-16 | 20   | 10   | 0,85                 | 1383    | 0,2067     | 7.646                |
| B2-3-05 | 20   | 10   | 0,5                  | 13858   | 0,1046     | 8.608                |
| B2-3-06 | 20   | 10   | 0,5                  | 15189   | 0,1003     | 9.015                |
| B2-3-08 | 20   | 10   | 0,5                  | 16134   | 0,0982     | 9.130                |
| B2-3-11 | 20   | 10   | 0,32                 | 131974  | 0,0539     | 8.876                |
| B2-3-13 | 20   | 10   | 0,35                 | 67321   | 0,0543     | 10.306               |
| B2-3-15 | 20   | 10   | 0,32                 | 125984  | 0,0576     | 8.526                |

Ermüdungsfunktion:

a1            6,69657665  
a2            -3,33745959  
R<sup>2</sup>            0,98

## AC 16 B S SG: 5,98 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B2-4-04 | 20   | 10   | 0,8                  | 1839    | 0,2196     | 6.715                |
| B2-4-09 | 20   | 10   | 0,79                 | 1958    | 0,2085     | 6.995                |
| B2-4-11 | 20   | 10   | 0,79                 | 2935    | 0,2018     | 7.214                |
| B2-4-02 | 20   | 10   | 0,4                  | 54565   | 0,093      | 7.565                |
| B2-4-03 | 20   | 10   | 0,42                 | 46438   | 0,0931     | 7.990                |
| B2-4-14 | 20   | 10   | 0,42                 | 80133   | 0,1013     | 7.327                |
| B2-4-08 | 20   | 10   | 0,32                 | 236997  | 0,056      | 8.707                |
| B2-4-10 | 20   | 10   | 0,32                 | 174488  | 0,0591     | 8.478                |
| B2-4-16 | 20   | 10   | 0,32                 | 137182  | 0,0581     | 8.328                |

Ermüdungsfunktion:

a1            11,63503239  
a2            -3,46227981  
R<sup>2</sup>            0,96

## AC 16 B S SG: 6,55 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B2-5-04 | 20   | 10   | 0,75                 | 3708    | 0,2213     | 6.238                |
| B2-5-10 | 20   | 10   | 0,75                 | 3459    | 0,1967     | 7.023                |
| B2-5-16 | 20   | 10   | 0,75                 | 3739    | 0,2179     | 6.333                |
| B2-5-05 | 20   | 10   | 0,45                 | 68606   | 0,1056     | 7.528                |
| B2-5-09 | 20   | 10   | 0,42                 | 54994   | 0,1151     | 6.444                |
| B2-5-14 | 20   | 10   | 0,45                 | 32031   | 0,1038     | 7.589                |
| B2-5-07 | 20   | 10   | 0,3                  | 385886  | 0,0514     | 9.176                |
| B2-5-08 | 20   | 10   | 0,32                 | 229245  | 0,0596     | 8.143                |
| B2-5-12 | 20   | 10   | 0,3                  | 387485  | 0,0634     | 7.648                |

Ermüdungsfunktion:

a1            20,40270925  
a2            -3,41809913  
R<sup>2</sup>            0,963

## AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| BA-03   | 20   | 10   | 0,75                 | 1513    | 0,1747     | 7.973,70             |
| BA-07   | 20   | 10   | 0,75                 | 1808    | 0,1732     | 8.039,50             |
| BA-01   | 20   | 10   | 0,75                 | 1421    | 0,1808     | 7.686,50             |
| BA-04   | 20   | 10   | 0,45                 | 33250   | 0,0941     | 8.598,10             |
| BA-08   | 20   | 10   | 0,47                 | 15963   | 0,1042     | 8.119,10             |
| BA-11   | 20   | 10   | 0,47                 | 12761   | 0,096      | 8.832,90             |
| BA-10   | 20   | 10   | 0,3                  | 167718  | 0,0614     | 8.148,50             |
| BA-14   | 20   | 10   | 0,33                 | 134093  | 0,0658     | 8.559,10             |
| BA-16   | 20   | 10   | 0,33                 | 94974   | 0,0603     | 9.122,60             |

Ermüdungsfunktion:

a1            1,02125698  
a2            -4,23161379  
R<sup>2</sup>            0,976

## SMA 11 B S: 5,17 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B1-1-01 | 20   | 10   | 0,85                 | 2953    | 0,1891     | 8.368                |
| B1-1-06 | 20   | 10   | 0,85                 | 2754    | 0,1641     | 9.649                |
| B1-1-14 | 20   | 10   | 0,85                 | 1543    | 0,2079     | 7.598                |
| B1-1-05 | 20   | 10   | 0,55                 | 17161   | 0,1018     | 9.848                |
| B1-1-08 | 20   | 10   | 0,55                 | 21048   | 0,0926     | 10.834               |
| B1-1-12 | 20   | 10   | 0,55                 | 16133   | 0,0971     | 10.322               |
| B1-1-02 | 20   | 10   | 0,305                | 451229  | 0,0503     | 10.042               |
| B1-1-03 | 20   | 10   | 0,32                 | 367042  | 0,0512     | 9.990                |
| B1-1-07 | 20   | 10   | 0,34                 | 222577  | 0,0561     | 9.718                |

Ermüdungsfunktion:

a1            2,85125908  
a2            -3,8962901  
R<sup>2</sup>            0,98

## SMA 11 B S: 5,47 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B1-2-02 | 20   | 10   | 0,85                 | 1540    | 0,1833     | 8.616                |
| B1-2-09 | 20   | 10   | 0,85                 | 1375    | 0,2193     | 7.194                |
| B1-2-13 | 20   | 10   | 0,85                 | 2592    | 0,1887     | 8.362                |
| B1-2-12 | 20   | 10   | 0,5                  | 24334   | 0,1051     | 8.488                |
| B1-2-07 | 20   | 10   | 0,5                  | 15894   | 0,0966     | 9.281                |
| B1-2-14 | 20   | 10   | 0,5                  | 30028   | 0,0975     | 9.228                |
| B1-2-04 | 20   | 10   | 0,321                | 208935  | 0,06       | 8.969                |
| B1-2-15 | 20   | 10   | 0,325                | 167902  | 0,0525     | 9.457                |
| B1-2-16 | 20   | 10   | 0,33                 | 379353  | 0,0501     | 10.007               |

Ermüdungsfunktion:

a1            3,94220721  
a2            -3,76045043  
R<sup>2</sup>            0,976

## SMA 11 B S: 6,03 M-%

| PK-Bez. | T    | f    | sigma_horiz          | N_Makro | eps_horiz  | E-Modul              |
|---------|------|------|----------------------|---------|------------|----------------------|
| [-]     | [°C] | [Hz] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]     | [promille] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| B1-3-01 | 20   | 10   | 0,8                  | 2196    | 0,1812     | 8.195                |
| B1-3-02 | 20   | 10   | 0,8                  | 3351    | 0,17       | 8.734                |
| B1-3-13 | 20   | 10   | 0,82                 | 1968    | 0,1882     | 8.087                |
| B1-3-05 | 20   | 10   | 0,5                  | 22019   | 0,099      | 9.118                |
| B1-3-08 | 20   | 10   | 0,5                  | 16583   | 0,1051     | 8.562                |
| B1-3-09 | 20   | 10   | 0,5                  | 20556   | 0,0978     | 9.204                |
| B1-3-07 | 20   | 10   | 0,33                 | 192463  | 0,0535     | 9.166                |
| B1-3-11 | 20   | 10   | 0,34                 | 156128  | 0,0545     | 9.468                |
| B1-3-14 | 20   | 10   | 0,34                 | 186830  | 0,0585     | 9.302                |

## Ermüdungsfunktion:

a1            4,62879279  
a2            -3,64513035  
R<sup>2</sup>            0,995

**Anlage 6: Ergebnisse der Tieftemperaturuntersuchungen**

SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,03 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 22   | 0,0005               | 0,0005               | 0,0002               | -0,0243              |
| 21   | 0,0185               | 0,0005               | 0,0012               | -0,0061              |
| 20   | 0,0094               | 0,0005               | 0,0012               | 0,0037               |
| 19   | 0,0082               | 0,0097               | 0,007                | 0,0083               |
| 18   | 0,0091               | 0,0016               | 0,0131               | 0,0079               |
| 17   | 0,0028               | 0,0002               | 0,0196               | 0,0076               |
| 16   | 0,0089               | 0,0109               | 0,0229               | 0,0142               |
| 15   | 0,0108               | 0,0173               | 0,0278               | 0,0186               |
| 14   | 0,0213               | 0,0258               | 0,036                | 0,0277               |
| 13   | 0,0297               | 0,0336               | 0,0496               | 0,0376               |
| 12   | 0,0327               | 0,0407               | 0,0554               | 0,043                |
| 11   | 0,05                 | 0,0469               | 0,0592               | 0,052                |
| 10   | 0,0603               | 0,0786               | 0,0694               | 0,0694               |
| 9    | 0,0839               | 0,0772               | 0,0935               | 0,0849               |
| 8    | 0,1096               | 0,0916               | 0,1158               | 0,1057               |
| 7    | 0,1154               | 0,1146               | 0,1312               | 0,1204               |
| 6    | 0,0928               | 0,1378               | 0,1539               | 0,1282               |
| 5    | 0,1809               | 0,1584               | 0,1864               | 0,1752               |
| 4    | 0,2059               | 0,1788               | 0,2166               | 0,2004               |
| 3    | 0,2594               | 0,1579               | 0,2544               | 0,2239               |
| 2    | 0,3145               | 0,2131               | 0,3014               | 0,2764               |
| 1    | 0,3598               | 0,2586               | 0,3468               | 0,3217               |
| 0    | 0,4148               | 0,3426               | 0,3964               | 0,3846               |
| -1   | 0,479                | 0,3736               | 0,4511               | 0,4346               |
| -2   | 0,5599               | 0,4875               | 0,5119               | 0,5198               |
| -3   | 0,6243               | 0,5758               | 0,5926               | 0,5976               |
| -4   | 0,7087               | 0,7612               | 0,6576               | 0,7092               |
| -5   | 0,7999               | 0,6779               | 0,7175               | 0,7317               |
| -6   | 0,905                | 0,8306               | 0,7381               | 0,8246               |
| -7   | 1,0286               | 1,06                 | 0,9507               | 1,0131               |
| -8   | 1,1559               | 1,1223               | 1,1915               | 1,1566               |
| -9   | 1,3004               | 1,2757               | 1,2367               | 1,2709               |
| -10  | 1,2709               | 1,4488               | 1,4413               | 1,387                |
| -11  | 1,4069               | 1,5158               | 1,7119               | 1,5449               |
| -12  | 1,6226               | 1,7459               | 1,9207               | 1,7631               |
| -13  | 1,8523               | 1,9683               | 2,0316               | 1,9507               |
| -14  | 2,0574               | 2,197                | 2,3599               | 2,2048               |
| -15  | 2,0418               | 2,4212               | 2,543                | 2,3353               |
| -16  | 2,4077               | 2,6866               | 2,7762               | 2,6235               |
| -17  | 2,7257               | 2,9629               | 3,1897               | 2,9594               |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| -18  | 2,9984               | 3,3079               | 3,3319               | 3,2127               |
| -19  | 3,2889               | 3,6382               | 3,6782               | 3,5351               |
| -20  | 3,5851               | 4,0047               | 4,0992               | 3,8963               |
| -21  | 3,8999               | 4,3085               | 4,1565               | 4,1216               |
| -22  | 4,1663               | 4,6572               | 0,0000               | 4,4117               |
| -23  | 4,3985               | 0,0000               | 0,0000               | 4,3985               |

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,50 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 22   | 0,0005               | 0,0004               | 0,0002               | 0,0079               |
| 21   | 0,0005               | 0,0004               | 0,0207               | 0,0092               |
| 20   | 0,0042               | 0,0134               | 0,0276               | 0,0151               |
| 19   | 0,0049               | 0,0157               | 0,0325               | 0,0177               |
| 18   | 0,0244               | 0,0254               | 0,0399               | 0,0299               |
| 17   | 0,0269               | 0,0374               | 0,0451               | 0,0365               |
| 16   | 0,0386               | 0,0413               | 0,0507               | 0,0435               |
| 15   | 0,0436               | 0,0585               | 0,0547               | 0,0523               |
| 14   | 0,0594               | 0,0735               | 0,0672               | 0,0667               |
| 13   | 0,0711               | 0,0851               | 0,0755               | 0,0772               |
| 12   | 0,0957               | 0,0985               | 0,0804               | 0,0915               |
| 11   | 0,1096               | 0,1135               | 0,1031               | 0,1087               |
| 10   | 0,1237               | 0,1436               | 0,1045               | 0,124                |
| 9    | 0,1604               | 0,1682               | 0,1265               | 0,1517               |
| 8    | 0,1583               | 0,2022               | 0,1583               | 0,1729               |
| 7    | 0,1927               | 0,2335               | 0,1659               | 0,1973               |
| 6    | 0,2129               | 0,2693               | 0,2072               | 0,2298               |
| 5    | 0,2458               | 0,3011               | 0,2348               | 0,2606               |
| 4    | 0,3204               | 0,3352               | 0,2655               | 0,307                |
| 3    | 0,2927               | 0,3894               | 0,3051               | 0,3291               |
| 2    | 0,4397               | 0,4432               | 0,3568               | 0,4132               |
| 1    | 0,4039               | 0,504                | 0,4056               | 0,4378               |
| 0    | 0,491                | 0,5695               | 0,4555               | 0,5053               |
| -1   | 0,6324               | 0,6184               | 0,5241               | 0,5916               |
| -2   | 0,5876               | 0,72                 | 0,5956               | 0,6344               |
| -3   | 0,728                | 0,8117               | 0,682                | 0,7406               |
| -4   | 0,8179               | 0,9247               | 0,7675               | 0,8367               |
| -5   | 0,9235               | 1,0356               | 0,867                | 0,942                |
| -6   | 1,044                | 1,1493               | 0,9959               | 1,0631               |
| -7   | 1,1487               | 1,2768               | 1,1056               | 1,177                |
| -8   | 1,3629               | 1,4137               | 1,2753               | 1,3506               |
| -9   | 1,4632               | 1,5514               | 1,2019               | 1,4055               |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| -10  | 1,6352               | 1,7411               | 1,4412               | 1,6059               |
| -11  | 1,8994               | 1,8954               | 1,5625               | 1,7858               |
| -12  | 2,1297               | 2,1203               | 1,7848               | 2,0116               |
| -13  | 2,2811               | 2,3374               | 1,9687               | 2,1957               |
| -14  | 2,5258               | 2,5691               | 2,2009               | 2,4319               |
| -15  | 2,7922               | 2,8015               | 2,4414               | 2,6784               |
| -16  | 3,0657               | 3,0735               | 2,6929               | 2,9441               |
| -17  | 3,3083               | 3,3379               | 2,9252               | 3,1905               |
| -18  | 3,6222               | 3,6358               | 3,1368               | 3,465                |
| -19  | 3,8759               | 3,9615               | 3,4168               | 3,7514               |
| -20  | 4,2784               | 4,3406               | 3,7049               | 4,108                |
| -21  | 4,5162               | 4,6458               | 3,9669               | 4,3763               |
| -22  | 4,8307               | 4,9138               | 4,2609               | 4,6685               |
| -23  | 0,0000               | 4,5564               | 4,5564               |                      |
| -24  | 0,0000               | 0,0000               | 4,7447               | 4,7447               |

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,79 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 22   | 0,0007               | 0,0002               | 0,0005               | -0,0537              |
| 21   | 0,0007               | 0,005                | 0,0005               | -0,0417              |
| 20   | 0,0007               | 0,0026               | 0,0005               | -0,0318              |
| 19   | 0,0107               | 0,005                | 0,0005               | -0,017               |
| 18   | 0,0197               | 0,0155               | 0,0005               | 0,0003               |
| 17   | 0,0227               | 0,0225               | 0,0005               | 0,0147               |
| 16   | 0,0303               | 0,0323               | 0,0286               | 0,0304               |
| 15   | 0,0371               | 0,039                | 0,0382               | 0,0381               |
| 14   | 0,0466               | 0,0456               | 0,0453               | 0,0458               |
| 13   | 0,0632               | 0,0676               | 0,0521               | 0,061                |
| 12   | 0,0748               | 0,0784               | 0,0611               | 0,0714               |
| 11   | 0,0947               | 0,0932               | 0,0715               | 0,0865               |
| 10   | 0,1072               | 0,1078               | 0,084                | 0,0997               |
| 9    | 0,1184               | 0,1262               | 0,1142               | 0,1196               |
| 8    | 0,1357               | 0,1561               | 0,136                | 0,1426               |
| 7    | 0,1668               | 0,1775               | 0,1572               | 0,1672               |
| 6    | 0,1936               | 0,21                 | 0,1709               | 0,1915               |
| 5    | 0,227                | 0,2418               | 0,1758               | 0,2149               |
| 4    | 0,271                | 0,2875               | 0,2556               | 0,2714               |
| 3    | 0,3115               | 0,3352               | 0,3047               | 0,3172               |
| 2    | 0,3599               | 0,4026               | 0,3462               | 0,3696               |
| 1    | 0,4183               | 0,4631               | 0,379                | 0,4201               |
| 0    | 0,4762               | 0,5176               | 0,4626               | 0,4855               |

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| -1   | 0,5394  | 0,5742  | 0,5336  | 0,5491           |
| -2   | 0,6073  | 0,6492  | 0,5969  | 0,6178           |
| -3   | 0,6853  | 0,7365  | 0,6996  | 0,7071           |
| -4   | 0,7792  | 0,8306  | 0,8011  | 0,8036           |
| -5   | 0,8699  | 0,9281  | 0,9238  | 0,9073           |
| -6   | 0,9769  | 1,0428  | 1,0423  | 1,0207           |
| -7   | 1,1085  | 1,1561  | 1,1487  | 1,1377           |
| -8   | 1,0244  | 1,2877  | 1,2882  | 1,2001           |
| -9   | 1,2347  | 1,4383  | 1,439   | 1,3707           |
| -10  | 1,4529  | 1,6153  | 1,6415  | 1,5699           |
| -11  | 1,6356  | 1,7871  | 1,7895  | 1,7374           |
| -12  | 1,8054  | 1,9773  | 1,98    | 1,9209           |
| -13  | 1,9615  | 2,2617  | 2,1915  | 2,1382           |
| -14  | 2,2114  | 2,4055  | 2,3881  | 2,335            |
| -15  | 2,4319  | 2,6058  | 2,6389  | 2,5589           |
| -16  | 2,5936  | 2,8046  | 2,8672  | 2,7551           |
| -17  | 2,8889  | 3,0172  | 3,1395  | 3,0152           |
| -18  | 3,1052  | 3,0664  | 3,3397  | 3,1705           |
| -19  | 3,4179  | 3,32    | 3,5165  | 3,4181           |
| -20  | 3,8049  | 3,5945  | 3,5691  | 3,6562           |
| -21  | 3,8668  | 3,9355  | 3,9333  | 3,9119           |
| -22  | 4,0335  | 4,2297  | 0,0000  | 4,1316           |

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 7,52 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 21   | 0,0227  | 0,0004  | 0,0004  | -0,0026          |
| 20   | 0,0202  | 0,013   | 0,0224  | 0,0185           |
| 19   | 0,0172  | 0,0191  | 0,0271  | 0,0211           |
| 18   | 0,0145  | 0,0207  | 0,031   | 0,022            |
| 17   | 0,0094  | 0,0301  | 0,0341  | 0,0245           |
| 16   | 0,0057  | 0,0335  | 0,0414  | 0,0269           |
| 15   | 0,0053  | 0,0344  | 0,0456  | 0,0284           |
| 14   | 0,0076  | 0,0407  | 0,049   | 0,0325           |
| 13   | 0,0114  | 0,0467  | 0,0529  | 0,037            |
| 12   | 0,0211  | 0,0542  | 0,0603  | 0,0452           |
| 11   | 0,0328  | 0,0696  | 0,064   | 0,0555           |
| 10   | 0,0433  | 0,079   | 0,0741  | 0,0655           |
| 9    | 0,0534  | 0,0838  | 0,0854  | 0,0742           |
| 8    | 0,0699  | 0,1027  | 0,0922  | 0,0883           |
| 7    | 0,0871  | 0,1213  | 0,1218  | 0,1101           |
| 6    | 0,1059  | 0,1338  | 0,1338  | 0,1245           |



| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 5    | 0,1124  | 0,1532  | 0,1553  | 0,1403           |
| 4    | 0,1543  | 0,1748  | 0,177   | 0,1687           |
| 3    | 0,1878  | 0,2014  | 0,2043  | 0,1979           |
| 2    | 0,2254  | 0,2406  | 0,2486  | 0,2382           |
| 1    | 0,2584  | 0,2713  | 0,2861  | 0,272            |
| 0    | 0,2958  | 0,3187  | 0,3347  | 0,3164           |
| -1   | 0,3442  | 0,3662  | 0,391   | 0,3671           |
| -2   | 0,4325  | 0,4414  | 0,438   | 0,4373           |
| -3   | 0,4916  | 0,4892  | 0,5022  | 0,4943           |
| -4   | 0,555   | 0,5618  | 0,5399  | 0,5522           |
| -5   | 0,6708  | 0,6902  | 0,638   | 0,6663           |
| -6   | 0,7389  | 0,7735  | 0,7327  | 0,7483           |
| -7   | 0,8251  | 0,7573  | 0,8452  | 0,8092           |
| -8   | 0,9739  | 0,9726  | 0,9616  | 0,9694           |
| -9   | 1,1035  | 1,0985  | 1,094   | 1,0987           |
| -10  | 1,2518  | 1,2478  | 1,254   | 1,2512           |
| -11  | 1,3807  | 1,2656  | 1,398   | 1,3481           |
| -12  | 1,7561  | 1,5155  | 1,5566  | 1,6094           |
| -13  | 1,8892  | 1,6755  | 1,7336  | 1,7661           |
| -14  | 2,0669  | 1,8765  | 1,906   | 1,9498           |
| -15  | 2,2535  | 2,0944  | 2,1499  | 2,1659           |
| -16  | 2,4466  | 2,3261  | 2,3652  | 2,3793           |
| -17  | 2,6069  | 2,5487  | 2,6208  | 2,5921           |
| -18  | 2,9002  | 2,7183  | 2,8992  | 2,8392           |
| -19  | 3,1078  | 2,9928  | 3,1569  | 3,0858           |
| -20  | 3,4272  | 3,3058  | 3,3806  | 3,3712           |
| -21  | 3,7535  | 3,6222  | 3,6521  | 3,6759           |
| -22  | 4,098   | 3,9404  | 3,9422  | 3,9935           |
| -23  | 4,2525  | 4,2891  | 4,2191  | 4,2536           |
| -24  | 0,0000  | 4,5789  | 0,0000  | 4,5789           |

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 8,02 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 22   | 0,0007  | 0,0002  | 0,0009  | 0,0006           |
| 21   | 0,0073  | 0,0046  | 0,0146  | 0,0088           |
| 20   | 0,0058  | 0,0069  | 0,0128  | 0,0085           |
| 19   | 0,0007  | 0,009   | 0,008   | 0,0059           |
| 18   | 0,003   | 0,0161  | 0,0075  | 0,0089           |
| 17   | 0,0048  | 0,0187  | 0,0016  | 0,0083           |
| 16   | 0,0085  | 0,0196  | 0,002   | 0,01             |
| 15   | 0,0138  | 0,0239  | 0,0071  | 0,0149           |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 14   | 0,0191               | 0,0233               | 0,0157               | 0,0194               |
| 13   | 0,02                 | 0,0318               | 0,0201               | 0,024                |
| 12   | 0,0265               | 0,0392               | 0,0184               | 0,028                |
| 11   | 0,0439               | 0,0426               | 0,0279               | 0,0382               |
| 10   | 0,0479               | 0,0452               | 0,0467               | 0,0466               |
| 9    | 0,0509               | 0,0735               | 0,0533               | 0,0592               |
| 8    | 0,0734               | 0,0691               | 0,0666               | 0,0697               |
| 7    | 0,0805               | 0,0846               | 0,0834               | 0,0828               |
| 6    | 0,0948               | 0,0996               | 0,1011               | 0,0985               |
| 5    | 0,1167               | 0,1215               | 0,1155               | 0,1179               |
| 4    | 0,1429               | 0,1279               | 0,1432               | 0,138                |
| 3    | 0,1799               | 0,1662               | 0,1697               | 0,172                |
| 2    | 0,2099               | 0,1892               | 0,2054               | 0,2015               |
| 1    | 0,2607               | 0,2268               | 0,2425               | 0,2434               |
| 0    | 0,2904               | 0,2683               | 0,2797               | 0,2795               |
| -1   | 0,3199               | 0,3112               | 0,3266               | 0,3192               |
| -2   | 0,3774               | 0,3683               | 0,3735               | 0,3731               |
| -3   | 0,4091               | 0,4216               | 0,4351               | 0,4219               |
| -4   | 0,4736               | 0,4972               | 0,5075               | 0,4927               |
| -5   | 0,5806               | 0,5557               | 0,5867               | 0,5743               |
| -6   | 0,6284               | 0,6592               | 0,6677               | 0,6518               |
| -7   | 0,7198               | 0,7655               | 0,7409               | 0,7421               |
| -8   | 1,0778               | 0,9123               | 0,8626               | 0,9509               |
| -9   | 1,0504               | 1,0078               | 0,9773               | 1,0118               |
| -10  | 1,1634               | 1,1613               | 1,1618               | 1,1622               |
| -11  | 1,3077               | 1,2846               | 1,2568               | 1,283                |
| -12  | 1,4207               | 1,4365               | 1,4008               | 1,4193               |
| -13  | 1,5841               | 1,5898               | 1,6243               | 1,5994               |
| -14  | 1,7357               | 1,7309               | 1,7513               | 1,7393               |
| -15  | 1,8738               | 1,8178               | 1,885                | 1,8589               |
| -16  | 2,0922               | 2,1204               | 2,3642               | 2,1922               |
| -17  | 2,3607               | 2,4002               | 2,3695               | 2,3768               |
| -18  | 2,5963               | 2,6529               | 2,691                | 2,6467               |
| -19  | 2,9507               | 2,9541               | 2,9311               | 2,9453               |
| -20  | 2,9477               | 3,1785               | 3,2646               | 3,1303               |
| -21  | 3,2075               | 3,4896               | 3,6092               | 3,4354               |
| -22  | 3,6947               | 3,7655               | 3,5963               | 3,6855               |
| -23  | 4,0463               | 3,9767               | 0,0000               | 4,0115               |

## SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A; 7,01 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 20   | 0,0016  | 0,008   | 0,0005  | 0,0034           |
| 19   | 0,0048  | 0,0021  | 0,0072  | 0,0047           |
| 18   | 0,0005  | 0,0005  | 0,0123  | 0,0045           |
| 17   | 0,0032  | 0,0038  | 0,018   | 0,0083           |
| 16   | 0,0101  | 0,0139  | 0,0205  | 0,0148           |
| 15   | 0,0181  | 0,0171  | 0,0287  | 0,0213           |
| 14   | 0,0228  | 0,0305  | 0,0359  | 0,0297           |
| 13   | 0,0361  | 0,0369  | 0,042   | 0,0384           |
| 12   | 0,0388  | 0,047   | 0,0405  | 0,0421           |
| 11   | 0,06    | 0,062   | 0,0405  | 0,0542           |
| 10   | 0,0707  | 0,07    | 0,0605  | 0,0671           |
| 9    | 0,0845  | 0,0829  | 0,0692  | 0,0789           |
| 8    | 0,1089  | 0,1058  | 0,0369  | 0,0839           |
| 7    | 0,1195  | 0,1213  | 0,0349  | 0,0919           |
| 6    | 0,1424  | 0,1534  | 0,04    | 0,1119           |
| 5    | 0,17    | 0,1812  | 0,041   | 0,1307           |
| 4    | 0,2035  | 0,2025  | 0,042   | 0,1494           |
| 3    | 0,2354  | 0,2458  | 0,041   | 0,1741           |
| 2    | 0,2779  | 0,2784  | 0,041   | 0,1991           |
| 1    | 0,331   | 0,3404  | 0,0405  | 0,2373           |
| 0    | 0,3815  | 0,3805  | 0,0759  | 0,2793           |
| -1   | 0,4373  | 0,4489  | 0,2251  | 0,3704           |
| -2   | 0,5091  | 0,5152  | 0,3025  | 0,4423           |
| -3   | 0,6137  | 0,5942  | 0,3871  | 0,5317           |
| -4   | 0,6807  | 0,6824  | 0,4707  | 0,6113           |
| -5   | 0,7795  | 0,777   | 0,5527  | 0,7031           |
| -6   | 0,8916  | 0,8726  | 0,6435  | 0,8026           |
| -7   | 1,0096  | 0,8561  | 0,6773  | 0,8477           |
| -8   | 1,1398  | 1,135   | 0,5625  | 0,9458           |
| -9   | 1,2992  | 1,2793  | 0,844   | 1,1408           |
| -10  | 1,4166  | 1,4135  | 1,0193  | 1,2831           |
| -11  | 1,5797  | 1,5561  | 1,1439  | 1,4266           |
| -12  | 1,7556  | 1,702   | 1,3182  | 1,592            |
| -13  | 1,9698  | 1,8832  | 1,5039  | 1,7856           |
| -14  | 2,1876  | 2,1172  | 1,7064  | 2,0037           |
| -15  | 2,364   | 2,308   | 1,69    | 2,1207           |
| -16  | 2,6079  | 2,533   | 1,9653  | 2,3688           |
| -17  | 2,8449  | 2,736   | 2,2453  | 2,6087           |
| -18  | 3,1749  | 3,0305  | 2,5242  | 2,9099           |
| -19  | 3,372   | 3,2758  | 2,8093  | 3,1524           |
| -20  | 3,7036  | 3,5291  | 3,0749  | 3,4358           |

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| -21  | 4,0378  | 3,831   | 3,3733  | 3,7474           |
| -22  | 4,3996  | 4,1297  | 3,7507  | 4,0933           |
| -23  | 4,5878  | 4,4241  | 4,0599  | 4,3573           |
| -24  | 4,778   | 0,0000  | 4,3357  | 4,5569           |
| -25  | 0,0000  | 0,0000  | 4,5634  | 4,5634           |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 19   | 0,0053  | 0       | 0,0043  | -0,0167          |
| 20   | 0,0032  | 0       | 0,0032  | -0,0543          |
| 19   | 0,0053  | 0       | 0,0038  | -0,0195          |
| 18   | 0,0075  | 0       | 0,0016  | 0,003            |
| 17   | 0,0086  | 0,0038  | 0       | 0,0041           |
| 16   | 0,0112  | 0,0038  | 0,0021  | 0,0057           |
| 15   | 0,0134  | 0,0054  | 0,0048  | 0,0079           |
| 14   | 0,0145  | 0,0092  | 0,007   | 0,0102           |
| 13   | 0,0166  | 0,0097  | 0,0102  | 0,0122           |
| 12   | 0,0193  | 0,0162  | 0,014   | 0,0165           |
| 11   | 0,023   | 0,02    | 0,0189  | 0,0206           |
| 10   | 0,0257  | 0,0238  | 0,0216  | 0,0237           |
| 9    | 0,0316  | 0,033   | 0,0302  | 0,0316           |
| 8    | 0,0348  | 0,0357  | 0,0362  | 0,0356           |
| 7    | 0,0439  | 0,0384  | 0,0475  | 0,0433           |
| 6    | 0,0551  | 0,0525  | 0,0556  | 0,0544           |
| 5    | 0,0701  | 0,0752  | 0,0686  | 0,0713           |
| 4    | 0,0782  | 0,0693  | 0,0821  | 0,0765           |
| 3    | 0,0905  | 0,1001  | 0,0956  | 0,0954           |
| 2    | 0,098   | 0,1158  | 0,1404  | 0,1181           |
| 1    | 0,1408  | 0,1326  | 0,1436  | 0,139            |
| 0    | 0,159   | 0,1624  | 0,1733  | 0,1649           |
| -1   | 0,1853  | 0,2003  | 0,1981  | 0,1945           |
| -2   | 0,2265  | 0,2203  | 0,2386  | 0,2285           |
| -3   | 0,2575  | 0,2533  | 0,2775  | 0,2628           |
| -4   | 0,302   | 0,3117  | 0,3282  | 0,314            |
| -5   | 0,3587  | 0,3496  | 0,3655  | 0,3579           |
| -6   | 0,4209  | 0,4016  | 0,4259  | 0,4161           |
| -7   | 0,4931  | 0,4622  | 0,4885  | 0,4813           |
| -8   | 0,5526  | 0,5125  | 0,5636  | 0,5429           |
| -9   | 0,6307  | 0,5931  | 0,6499  | 0,6246           |
| -10  | 0,7212  | 0,7019  | 0,7212  | 0,7148           |
| -11  | 0,8278  | 0,7426  | 0,834   | 0,8015           |

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| -12  | 0,9531  | 0,8638  | 0,922   | 0,913            |
| -13  | 1,08    | 0,9282  | 1,0392  | 1,0158           |
| -14  | 1,1828  | 1,0575  | 1,172   | 1,1374           |
| -15  | 1,3327  | 1,2329  | 1,2945  | 1,2867           |
| -16  | 1,4837  | 1,294   | 1,4424  | 1,4067           |
| -17  | 1,6309  | 1,4548  | 1,5984  | 1,5614           |
| -18  | 1,8023  | 1,5885  | 1,7766  | 1,7224           |
| -19  | 1,9715  | 1,7362  | 1,9315  | 1,8797           |
| -20  | 2,1905  | 1,957   | 2,1296  | 2,0924           |
| -21  | 2,4084  | 2,0533  | 2,3213  | 2,261            |
| -22  | 2,5674  | 2,2249  | 2,4973  | 2,4299           |
| -23  | 0,0000  | 2,4901  | 0,0000  | 2,4901           |
| -24  | 0,0000  | 2,633   | 0,0000  | 2,633            |
| -25  | 0,0000  | 2,6811  | 0,0000  | 2,6811           |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 20   | 0,0016  | 0,0026  | 0,0042  | 0,0028           |
| 19   | 0       | 0,0074  | 0,0078  | 0,0051           |
| 18   | 0,0005  | 0,0084  | 0,0052  | 0,0047           |
| 17   | 0,0064  | 0,0126  | 0,0016  | 0,0069           |
| 16   | 0,008   | 0,0158  | 0,0021  | 0,0086           |
| 15   | 0,0112  | 0,0174  | 0,0047  | 0,0111           |
| 14   | 0,015   | 0,0222  | 0,012   | 0,0164           |
| 13   | 0,0182  | 0,0253  | 0,0162  | 0,0199           |
| 12   | 0,0219  | 0,0311  | 0,0125  | 0,0218           |
| 11   | 0,0272  | 0,0369  | 0,0318  | 0,032            |
| 10   | 0,031   | 0,0406  | 0,0365  | 0,036            |
| 9    | 0,0513  | 0,0485  | 0,0443  | 0,048            |
| 8    | 0,0443  | 0,0601  | 0,0547  | 0,0531           |
| 7    | 0,0598  | 0,0659  | 0,0667  | 0,0642           |
| 6    | 0,0753  | 0,0828  | 0,0808  | 0,0796           |
| 5    | 0,0806  | 0,0939  | 0,1064  | 0,0936           |
| 4    | 0,1015  | 0,1171  | 0,1158  | 0,1114           |
| 3    | 0,11    | 0,1319  | 0,1356  | 0,1258           |
| 2    | 0,1447  | 0,1556  | 0,1658  | 0,1554           |
| 1    | 0,1645  | 0,1804  | 0,1883  | 0,1777           |
| 0    | 0,1955  | 0,2068  | 0,2268  | 0,2097           |
| -1   | 0,22    | 0,2426  | 0,2597  | 0,2408           |
| -2   | 0,259   | 0,2838  | 0,3051  | 0,2826           |
| -3   | 0,2916  | 0,3218  | 0,3484  | 0,3206           |

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| -4   | 0,3471  | 0,3719  | 0,4037  | 0,3742           |
| -5   | 0,3845  | 0,4241  | 0,4558  | 0,4215           |
| -6   | 0,447   | 0,4869  | 0,522   | 0,4853           |
| -7   | 0,4918  | 0,5549  | 0,5883  | 0,545            |
| -8   | 0,5709  | 0,6272  | 0,6712  | 0,6231           |
| -9   | 0,6242  | 0,7073  | 0,7468  | 0,6928           |
| -10  | 0,722   | 0,8223  | 0,823   | 0,7891           |
| -11  | 0,8128  | 0,9041  | 0,9393  | 0,8854           |
| -12  | 0,9697  | 1,0106  | 1,0415  | 1,0073           |
| -13  | 1,0717  | 1,1272  | 1,151   | 1,1167           |
| -14  | 1,1807  | 1,2327  | 1,2626  | 1,2253           |
| -15  | 1,3195  | 1,3698  | 1,404   | 1,3644           |
| -16  | 1,4471  | 1,5038  | 1,5453  | 1,4987           |
| -17  | 1,6175  | 1,6684  | 1,7169  | 1,6676           |
| -18  | 1,8343  | 1,8256  | 1,8786  | 1,8462           |
| -19  | 1,9624  | 1,9796  | 2,0449  | 1,9957           |
| -20  | 2,1317  | 2,1721  | 2,228   | 2,1773           |
| -21  | 2,3597  | 2,3779  | 2,4356  | 2,3911           |
| -22  | 2,5418  | 2,5677  | 2,6187  | 2,5761           |
| -23  | 2,7052  | 0,0000  | 2,7908  | 2,748            |
| -24  | 0,0000  | 0,0000  | 2,8872  | 2,8872           |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 20   | 0,0053  | 0,0027  | 0,0057  | 0,0266           |
| 19   | 0,0026  | 0,0043  | 0,0078  | 0,0049           |
| 18   | 0,0005  | 0,0027  | 0,0036  | 0,0023           |
| 17   | 0,0047  | 0       | 0,001   | 0,0019           |
| 16   | 0,0073  | 0,0043  | 0,0104  | 0,0074           |
| 15   | 0,012   | 0,0103  | 0,0099  | 0,0107           |
| 14   | 0,0194  | 0,0157  | 0,0109  | 0,0153           |
| 13   | 0,0299  | 0,0173  | 0,0203  | 0,0225           |
| 12   | 0,0325  | 0,0281  | 0,0297  | 0,0301           |
| 11   | 0,0419  | 0,0368  | 0,0406  | 0,0398           |
| 10   | 0,0571  | 0,0503  | 0,0447  | 0,0507           |
| 9    | 0,065   | 0,0557  | 0,0546  | 0,0584           |
| 8    | 0,0797  | 0,0633  | 0,0691  | 0,0707           |
| 7    | 0,0944  | 0,0822  | 0,0816  | 0,0861           |
| 6    | 0,1111  | 0,0984  | 0,1029  | 0,1042           |
| 5    | 0,1326  | 0,1114  | 0,1232  | 0,1224           |
| 4    | 0,1494  | 0,1455  | 0,145   | 0,1467           |

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 3    | 0,1762  | 0,1688  | 0,1705  | 0,1718           |
| 2    | 0,2066  | 0,191   | 0,1975  | 0,1984           |
| 1    | 0,2391  | 0,225   | 0,2308  | 0,2316           |
| 0    | 0,2758  | 0,2591  | 0,2667  | 0,2672           |
| -1   | 0,323   | 0,2932  | 0,3072  | 0,3078           |
| -2   | 0,3717  | 0,3435  | 0,3519  | 0,3557           |
| -3   | 0,4373  | 0,3971  | 0,4117  | 0,4153           |
| -4   | 0,4955  | 0,4376  | 0,4621  | 0,4651           |
| -5   | 0,5657  | 0,5096  | 0,5229  | 0,5327           |
| -6   | 0,6381  | 0,5848  | 0,5895  | 0,6041           |
| -7   | 0,7236  | 0,6632  | 0,6695  | 0,6854           |
| -8   | 0,8143  | 0,7465  | 0,748   | 0,7696           |
| -9   | 0,9086  | 0,8347  | 0,8597  | 0,8677           |
| -10  | 1,0114  | 0,9229  | 0,9444  | 0,9596           |
| -11  | 1,1325  | 1,0386  | 1,0557  | 1,0756           |
| -12  | 1,2484  | 1,1523  | 1,157   | 1,1859           |
| -13  | 1,3837  | 1,2837  | 1,2875  | 1,3183           |
| -14  | 1,532   | 1,4298  | 1,4174  | 1,4597           |
| -15  | 1,6694  | 1,5509  | 1,5469  | 1,5891           |
| -16  | 1,8157  | 1,7056  | 1,6903  | 1,7372           |
| -17  | 1,9929  | 1,8604  | 1,8676  | 1,907            |
| -18  | 2,1775  | 2,0335  | 2,035   | 2,082            |
| -19  | 2,3668  | 2,2022  | 2,1758  | 2,2483           |
| -20  | 2,5587  | 2,3932  | 2,3764  | 2,4428           |
| -21  | 2,749   | 2,5793  | 2,5209  | 2,6164           |
| -22  | 2,9446  | 2,7784  | 0,0000  | 2,8615           |
| -23  | 0,0000  | 3,0072  | 0,0000  | 3,0072           |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 20   | 0,0096  | 0,006   | 0,0035  | 0,0064           |
| 19   | 0,0127  | 0,0005  | 0,002   | 0,0051           |
| 18   | 0,0178  | 0,0045  | 0,0025  | 0,0083           |
| 17   | 0,0203  | 0,0085  | 0,006   | 0,0116           |
| 16   | 0,0219  | 0,0105  | 0,012   | 0,0148           |
| 15   | 0,0254  | 0,0145  | 0,0206  | 0,0202           |
| 14   | 0,0285  | 0,0145  | 0,0216  | 0,0215           |
| 13   | 0,0336  | 0,0385  | 0,0307  | 0,0342           |
| 12   | 0,0396  | 0,032   | 0,0362  | 0,0359           |
| 11   | 0,0401  | 0,0355  | 0,0437  | 0,0398           |
| 10   | 0,0508  | 0,052   | 0,0543  | 0,0524           |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 9    | 0,0574               | 0,051                | 0,0619               | 0,0568               |
| 8    | 0,061                | 0,074                | 0,0804               | 0,0718               |
| 7    | 0,0767               | 0,076                | 0,091                | 0,0812               |
| 6    | 0,0844               | 0,0845               | 0,1056               | 0,0915               |
| 5    | 0,1225               | 0,1125               | 0,1272               | 0,1207               |
| 4    | 0,124                | 0,1435               | 0,1478               | 0,1384               |
| 3    | 0,1459               | 0,166                | 0,171                | 0,1609               |
| 2    | 0,1728               | 0,1875               | 0,2047               | 0,1883               |
| 1    | 0,2007               | 0,2204               | 0,2303               | 0,2172               |
| 0    | 0,2272               | 0,2464               | 0,2696               | 0,2477               |
| -1   | 0,2678               | 0,2824               | 0,3123               | 0,2875               |
| -2   | 0,3115               | 0,3234               | 0,3586               | 0,3312               |
| -3   | 0,3598               | 0,3919               | 0,4119               | 0,3879               |
| -4   | 0,4041               | 0,4519               | 0,4707               | 0,4422               |
| -5   | 0,4666               | 0,5099               | 0,5301               | 0,5022               |
| -6   | 0,5321               | 0,5739               | 0,609                | 0,5717               |
| -7   | 0,6028               | 0,6369               | 0,6789               | 0,6395               |
| -8   | 0,676                | 0,7188               | 0,7639               | 0,7196               |
| -9   | 0,7553               | 0,8188               | 0,8726               | 0,8155               |
| -10  | 0,86                 | 0,9243               | 0,9827               | 0,9223               |
| -11  | 0,9718               | 1,0463               | 1,1019               | 1,04                 |
| -12  | 1,0765               | 1,1422               | 1,1944               | 1,1377               |
| -13  | 1,2101               | 1,2687               | 1,3393               | 1,2727               |
| -14  | 1,3301               | 1,4047               | 1,5017               | 1,4122               |
| -15  | 1,4846               | 1,5546               | 1,6727               | 1,5706               |
| -16  | 1,634                | 1,7086               | 1,8075               | 1,7167               |
| -17  | 1,8053               | 1,8595               | 1,9941               | 1,8863               |
| -18  | 1,9872               | 2,0435               | 2,1731               | 2,068                |
| -19  | 2,1733               | 2,22                 | 2,315                | 2,2361               |
| -20  | 2,3745               | 2,3814               | 2,6268               | 2,4609               |
| -21  | 2,586                | 0,0000               | 2,8365               | 2,7112               |
| -22  | 2,7832               | 0,0000               | 2,8722               | 2,8277               |

## AC 16 B S SG: 4,75 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 15   | 0,2221               | 0                    | 0,142                | 0,1196               |
| 16   | 0,1964               | 0                    | 0,1172               | 0,0983               |
| 17   | 0,1896               | 0                    | 0,0935               | 0,0837               |
| 18   | 0,1692               | 0                    | 0,0697               | 0,0646               |
| 19   | 0,0003               | 0                    | 0,0543               | -0,0021              |
| 20   | 0,0003               | 0                    | 0,0445               | -0,0115              |



| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 19   | 0,0003  | 0       | 0,0536  | -0,0027          |
| 18   | 0,1666  | 0       | 0,0718  | 0,0641           |
| 17   | 0,1855  | 0       | 0,0907  | 0,0811           |
| 16   | 0,1944  | 0       | 0,1138  | 0,0962           |
| 15   | 0,2291  | 0       | 0,1393  | 0,1207           |
| 14   | 0,2546  | 0,183   | 0,1387  | 0,1921           |
| 13   | 0,2904  | 0,2084  | 0,1864  | 0,2284           |
| 12   | 0,3169  | 0,2395  | 0,2206  | 0,259            |
| 11   | 0,3579  | 0,278   | 0,2623  | 0,2994           |
| 10   | 0,3304  | 0,3353  | 0,2924  | 0,3194           |
| 9    | 0,3475  | 0,3797  | 0,3391  | 0,3554           |
| 8    | 0,4334  | 0,4176  | 0,3876  | 0,4129           |
| 7    | 0,4957  | 0,4695  | 0,4281  | 0,4644           |
| 6    | 0,5635  | 0,528   | 0,4759  | 0,5225           |
| 5    | 0,6315  | 0,5882  | 0,5405  | 0,5867           |
| 4    | 0,7014  | 0,6503  | 0,6094  | 0,6537           |
| 3    | 0,7784  | 0,7114  | 0,6668  | 0,7188           |
| 2    | 0,8657  | 0,7961  | 0,7411  | 0,801            |
| 1    | 0,9313  | 0,8881  | 0,8065  | 0,8753           |
| 0    | 1,0258  | 0,9622  | 0,8951  | 0,961            |
| -1   | 1,1124  | 1,073   | 0,9818  | 1,0557           |
| -2   | 1,2035  | 1,1672  | 1,0752  | 1,1486           |
| -3   | 1,2885  | 1,264   | 1,163   | 1,2385           |
| -4   | 1,3907  | 1,3643  | 1,2588  | 1,3379           |
| -5   | 1,4965  | 1,4739  | 1,3719  | 1,4474           |
| -6   | 1,5726  | 1,5881  | 1,4914  | 1,5507           |
| -7   | 1,5716  | 1,7107  | 1,6107  | 1,631            |
| -8   | 1,4729  | 1,8289  | 1,7354  | 1,6791           |
| -9   | 1,6401  | 1,9536  | 1,852   | 1,8153           |
| -10  | 1,9498  | 2,0696  | 1,9836  | 2,001            |
| -11  | 2,1972  | 2,1404  | 2,127   | 2,1549           |
| -12  | 2,468   | 2,2923  | 2,2268  | 2,329            |
| -13  | 2,5287  | 2,4577  | 2,3504  | 2,4456           |
| -14  | 0,0000  | 2,5523  | 0,0000  | 2,5523           |
| -15  | 0,0000  | 2,6249  | 0,0000  | 2,6249           |
| -16  | 0,0000  | 2,6452  | 0,0000  | 2,6452           |

## AC 16 B S SG: 5,00 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 20   | 0,0027  | 0,002   | 0,004   | 0,0029           |
| 19   | 0,0208  | 0,0137  | 0,0204  | 0,0183           |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 18   | 0,0305               | 0,0556               | 0,0678               | 0,0513               |
| 17   | 0,0653               | 0,0736               | 0,0889               | 0,0759               |
| 16   | 0,088                | 0,1033               | 0,1029               | 0,0981               |
| 15   | 0,1151               | 0,1306               | 0,1326               | 0,1261               |
| 14   | 0,1443               | 0,1643               | 0,1604               | 0,1563               |
| 13   | 0,1757               | 0,1976               | 0,1984               | 0,1906               |
| 12   | 0,2082               | 0,2333               | 0,2312               | 0,2242               |
| 11   | 0,2433               | 0,2742               | 0,2656               | 0,261                |
| 10   | 0,2781               | 0,3219               | 0,2966               | 0,2989               |
| 9    | 0,3183               | 0,3659               | 0,3377               | 0,3406               |
| 8    | 0,3645               | 0,4165               | 0,3882               | 0,3897               |
| 7    | 0,4097               | 0,4702               | 0,4386               | 0,4395               |
| 6    | 0,4643               | 0,5271               | 0,5004               | 0,4973               |
| 5    | 0,5188               | 0,5941               | 0,5689               | 0,5606               |
| 4    | 0,577                | 0,6641               | 0,6304               | 0,6238               |
| 3    | 0,6366               | 0,7354               | 0,6975               | 0,6898               |
| 2    | 0,7043               | 0,815                | 0,7687               | 0,7626               |
| 1    | 0,7752               | 0,8983               | 0,8448               | 0,8394               |
| 0    | 0,8529               | 0,9926               | 0,93                 | 0,9252               |
| -1   | 0,9392               | 1,0886               | 1,0265               | 1,0181               |
| -2   | 1,0303               | 1,1942               | 1,1238               | 1,1161               |
| -3   | 1,1327               | 1,2965               | 1,232                | 1,2204               |
| -4   | 1,2411               | 1,4105               | 1,3529               | 1,3348               |
| -5   | 1,3248               | 1,5284               | 1,4551               | 1,4361               |
| -6   | 1,4296               | 1,6464               | 1,5657               | 1,5472               |
| -7   | 1,5427               | 1,7707               | 1,668                | 1,6604               |
| -8   | 1,6602               | 1,8956               | 1,7822               | 1,7793               |
| -9   | 1,7827               | 2,0349               | 1,9128               | 1,9101               |
| -10  | 1,9243               | 2,1822               | 2,0671               | 2,0579               |
| -11  | 2,0257               | 2,2958               | 2,174                | 2,1652               |
| -12  | 2,1452               | 2,4361               | 2,2739               | 2,2851               |
| -13  | 2,262                | 2,5584               | 2,438                | 2,4195               |
| -14  | 2,3648               | 2,6837               | 2,619                | 2,5558               |
| -15  | 2,4334               | 2,775                | 2,7413               | 2,6499               |
| -16  | 0,0000               | 0,0000               | 2,8271               | 2,8271               |

## AC 16 B S SG: 5,68 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 22   | 0,005   | 0,0009  | 0       | 0,009            |
| 21   | 0,003   | 0,0009  | 0,0002  | 0,0061           |
| 20   | 0,0054  | 0,0009  | 0,0072  | 0,0068           |
| 19   | 0,0179  | 0,0274  | 0,0166  | 0,0207           |
| 18   | 0,0223  | 0,0327  | 0,0235  | 0,0262           |
| 17   | 0,029   | 0,0399  | 0,0308  | 0,0332           |
| 16   | 0,0417  | 0,07    | 0,0396  | 0,0504           |
| 15   | 0,0603  | 0,0747  | 0,0558  | 0,0636           |
| 14   | 0,0739  | 0,0873  | 0,069   | 0,0767           |
| 13   | 0,1017  | 0,1023  | 0,0832  | 0,0957           |
| 12   | 0,1205  | 0,121   | 0,0955  | 0,1124           |
| 11   | 0,136   | 0,1438  | 0,1142  | 0,1313           |
| 10   | 0,1575  | 0,1656  | 0,1359  | 0,153            |
| 9    | 0,1656  | 0,195   | 0,159   | 0,1732           |
| 8    | 0,1733  | 0,2243  | 0,1872  | 0,195            |
| 7    | 0,2336  | 0,2582  | 0,2162  | 0,236            |
| 6    | 0,284   | 0,3131  | 0,2465  | 0,2812           |
| 5    | 0,3306  | 0,3243  | 0,2878  | 0,3142           |
| 4    | 0,3827  | 0,4105  | 0,335   | 0,3761           |
| 3    | 0,4334  | 0,4344  | 0,3974  | 0,4217           |
| 2    | 0,4758  | 0,4733  | 0,4444  | 0,4645           |
| 1    | 0,5123  | 0,5413  | 0,5215  | 0,525            |
| 0    | 0,5752  | 0,6019  | 0,635   | 0,604            |
| -1   | 0,6653  | 0,8098  | 0,7006  | 0,7252           |
| -2   | 0,758   | 0,8604  | 0,7317  | 0,7833           |
| -3   | 0,9306  | 0,9238  | 0,842   | 0,8988           |
| -4   | 1,0061  | 0,987   | 0,9361  | 0,9764           |
| -5   | 1,1278  | 1,162   | 1,0275  | 1,1058           |
| -6   | 1,2178  | 1,3469  | 1,1497  | 1,2381           |
| -7   | 1,4186  | 1,3732  | 1,2845  | 1,3588           |
| -8   | 1,5173  | 1,628   | 1,3874  | 1,5109           |
| -9   | 1,7301  | 1,685   | 1,6167  | 1,6773           |
| -10  | 1,9854  | 1,8958  | 1,9037  | 1,9283           |
| -11  | 2,2291  | 2,0704  | 2,0973  | 2,1322           |
| -12  | 2,364   | 2,2971  | 2,4875  | 2,3828           |
| -13  | 2,4008  | 2,5301  | 2,6152  | 2,5154           |
| -14  | 2,8276  | 2,7422  | 2,7846  | 2,7848           |
| -15  | 2,9723  | 2,973   | 3,1038  | 3,0163           |
| -16  | 3,1959  | 3,2531  | 3,2071  | 3,2187           |
| -17  | 3,5133  | 3,5043  | 3,2972  | 3,4383           |
| -18  | 3,7585  | 3,7367  | 3,4346  | 3,6433           |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| -19  | 3,91                 | 4,0109               | 0.0000               | 3,9604               |

## AC 16 B S SG: 5,98 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 20   | 0,0209               | 0,0001               | 0                    | 0,007                |
| 19   | 0,0296               | 0,0239               | 0,0267               | 0,0267               |
| 18   | 0,0381               | 0,0376               | 0,032                | 0,0359               |
| 17   | 0,0504               | 0,0421               | 0,0421               | 0,0449               |
| 16   | 0,064                | 0,0685               | 0,0548               | 0,0624               |
| 15   | 0,0761               | 0,0807               | 0,0682               | 0,075                |
| 14   | 0,0912               | 0,1047               | 0,1006               | 0,0989               |
| 13   | 0,1105               | 0,1101               | 0,126                | 0,1155               |
| 12   | 0,128                | 0,1393               | 0,1577               | 0,1416               |
| 11   | 0,1465               | 0,1556               | 0,1261               | 0,1427               |
| 10   | 0,1714               | 0,1751               | 0,1753               | 0,1739               |
| 9    | 0,198                | 0,2309               | 0,1891               | 0,206                |
| 8    | 0,2269               | 0,2507               | 0,1949               | 0,2242               |
| 7    | 0,2584               | 0,2692               | 0,2128               | 0,2468               |
| 6    | 0,2974               | 0,3134               | 0,2803               | 0,297                |
| 5    | 0,3338               | 0,3502               | 0,3227               | 0,3356               |
| 4    | 0,3834               | 0,3984               | 0,3658               | 0,3826               |
| 3    | 0,4366               | 0,4729               | 0,4305               | 0,4466               |
| 2    | 0,4873               | 0,5266               | 0,4877               | 0,5005               |
| 1    | 0,5419               | 0,5915               | 0,557                | 0,5635               |
| 0    | 0,6012               | 0,6438               | 0,6245               | 0,6231               |
| -1   | 0,6053               | 0,7307               | 0,705                | 0,6803               |
| -2   | 0,6946               | 0,8104               | 0,7808               | 0,762                |
| -3   | 0,7869               | 0,8927               | 0,9755               | 0,885                |
| -4   | 0,891                | 1,0105               | 1,0582               | 0,9865               |
| -5   | 1,0006               | 1,1296               | 0,9985               | 1,0429               |
| -6   | 1,1377               | 1,2393               | 1,1603               | 1,1791               |
| -7   | 1,2626               | 1,3631               | 1,2908               | 1,3055               |
| -8   | 1,3908               | 1,4919               | 1,4198               | 1,4342               |
| -9   | 1,5114               | 1,648                | 1,5788               | 1,5794               |
| -10  | 1,655                | 1,7396               | 1,7267               | 1,7071               |
| -11  | 1,8108               | 1,9159               | 1,9219               | 1,8829               |
| -12  | 1,9674               | 2,0719               | 2,1037               | 2,0477               |
| -13  | 2,1473               | 2,2208               | 2,2745               | 2,2142               |
| -14  | 2,3314               | 2,5038               | 2,4543               | 2,4298               |
| -15  | 2,46                 | 2,6667               | 2,6797               | 2,6021               |
| -16  | 2,6766               | 3,0401               | 2,8542               | 2,857                |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| -17  | 2,8619               | 3,2296               | 3,0214               | 3,0377               |
| -18  | 3,0358               | 3,405                | 3,2273               | 3,2227               |
| -19  | 3,1014               | 3,4737               | 3,3895               | 3,3215               |
| -20  | 0,0000               | 3,6375               | 0,0000               | 3,6375               |

## AC 16 B S SG: 6,55 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 22   | 0,0027               | 0                    | 0,0038               | -1,782               |
| 21   | 0,0118               | 0                    | 0,0201               | -0,9648              |
| 20   | 0,0322               | 0                    | 0,021                | -0,139               |
| 19   | 0,0537               | 0,0061               | 0,0346               | 0,0315               |
| 18   | 0,0691               | 0,0277               | 0,0608               | 0,0525               |
| 17   | 0,0836               | 0,048                | 0,0656               | 0,0658               |
| 16   | 0,1238               | 0,0633               | 0,0893               | 0,0921               |
| 15   | 0,1023               | 0,0833               | 0,1093               | 0,0983               |
| 14   | 0,1388               | 0,1042               | 0,1228               | 0,1219               |
| 13   | 0,1863               | 0,129                | 0,1079               | 0,1411               |
| 12   | 0,1809               | 0,1535               | 0,1603               | 0,1649               |
| 11   | 0,2133               | 0,175                | 0,1696               | 0,186                |
| 10   | 0,2371               | 0,205                | 0,2338               | 0,2253               |
| 9    | 0,2838               | 0,2387               | 0,2611               | 0,2612               |
| 8    | 0,2886               | 0,2767               | 0,2978               | 0,2877               |
| 7    | 0,3307               | 0,316                | 0,3305               | 0,3258               |
| 6    | 0,3775               | 0,3607               | 0,3738               | 0,3707               |
| 5    | 0,3992               | 0,4118               | 0,4223               | 0,4111               |
| 4    | 0,5408               | 0,4556               | 0,4733               | 0,4899               |
| 3    | 0,5764               | 0,5167               | 0,5357               | 0,5429               |
| 2    | 0,5665               | 0,5751               | 0,5979               | 0,5798               |
| 1    | 0,661                | 0,6544               | 0,6056               | 0,6404               |
| 0    | 0,7433               | 0,7331               | 0,6962               | 0,7242               |
| -1   | 0,9418               | 0,8151               | 0,7838               | 0,8469               |
| -2   | 1,0662               | 0,8988               | 0,8696               | 0,9449               |
| -3   | 1,175                | 1,003                | 1,0624               | 1,0801               |
| -4   | 1,2555               | 1,1066               | 1,089                | 1,1504               |
| -5   | 1,515                | 1,224                | 1,1844               | 1,3078               |
| -6   | 1,648                | 1,345                | 1,2888               | 1,4273               |
| -7   | 1,4081               | 1,4633               | 1,3816               | 1,4177               |
| -8   | 1,587                | 1,5876               | 1,5571               | 1,5772               |
| -9   | 1,7315               | 1,7204               | 1,6812               | 1,711                |
| -10  | 1,9032               | 1,9069               | 1,8423               | 1,8841               |
| -11  | 1,9889               | 1,9674               | 2,0085               | 1,9882               |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| -12  | 2,2366               | 1,931                | 2,152                | 2,1065               |
| -13  | 2,3817               | 2,2621               | 2,3383               | 2,3274               |
| -14  | 2,5801               | 2,4626               | 2,4957               | 2,5128               |
| -15  | 2,6999               | 2,6617               | 2,6821               | 2,6812               |
| -16  | 2,974                | 2,8853               | 2,8553               | 2,9049               |
| -17  | 3,2362               | 3,0046               | 3,0098               | 3,0835               |
| -18  | 3,1762               | 3,144                | 2,6188               | 2,9797               |
| -19  | 0,0000               | 0,0000               | 3,0696               | 3,0696               |

## AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 22   | 0,0101               | 0,0004               | 0,0114               | -0,0079              |
| 21   | 0,0153               | 0,0025               | 0,0074               | 0,0084               |
| 20   | 0,0231               | 0,0183               | 0,0244               | 0,0219               |
| 19   | 0,0332               | 0,041                | 0,0248               | 0,033                |
| 18   | 0,0363               | 0,0216               | 0,0285               | 0,0288               |
| 17   | 0,0569               | 0,0424               | 0,0592               | 0,0529               |
| 16   | 0,086                | 0,1224               | 0,0826               | 0,097                |
| 15   | 0,1144               | 0,1505               | 0,1124               | 0,1258               |
| 14   | 0,1312               | 0,1337               | 0,1235               | 0,1295               |
| 13   | 0,1594               | 0,1783               | 0,1371               | 0,1583               |
| 12   | 0,1561               | 0,1873               | 0,1529               | 0,1654               |
| 11   | 0,1989               | 0,1621               | 0,1925               | 0,1845               |
| 10   | 0,2543               | 0,3308               | 0,215                | 0,2667               |
| 9    | 0,2742               | 0,254                | 0,2735               | 0,2672               |
| 8    | 0,307                | 0,3231               | 0,3102               | 0,3134               |
| 7    | 0,3467               | 0,4137               | 0,3589               | 0,3731               |
| 6    | 0,4294               | 0,4594               | 0,4072               | 0,432                |
| 5    | 0,4483               | 0,5088               | 0,4492               | 0,4688               |
| 4    | 0,5479               | 0,5818               | 0,5349               | 0,5549               |
| 3    | 0,6421               | 0,4925               | 0,5936               | 0,576                |
| 2    | 0,7496               | 0,5465               | 0,6663               | 0,6541               |
| 1    | 0,8015               | 0,6272               | 0,6932               | 0,7073               |
| 0    | 0,8419               | 1,0331               | 0,7682               | 0,8811               |
| -1   | 0,9873               | 1,0934               | 0,9034               | 0,9947               |
| -2   | 1,1486               | 1,453                | 0,92                 | 1,1739               |
| -3   | 1,1954               | 1,2311               | 1,0733               | 1,1666               |
| -4   | 1,4172               | 1,5845               | 1,206                | 1,4026               |
| -5   | 1,3897               | 1,7762               | 1,4488               | 1,5382               |
| -6   | 1,6562               | 1,5342               | 1,5196               | 1,57                 |
| -7   | 1,5955               | 1,6556               | 1,6379               | 1,6297               |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| -8   | 1,9675               | 1,5873               | 1,8365               | 1,7971               |
| -9   | 2,1638               | 2,2387               | 2,0382               | 2,1469               |
| -10  | 2,3846               | 2,1438               | 2,1996               | 2,2427               |
| -11  | 2,5444               | 3,1657               | 2,4022               | 2,7041               |
| -12  | 2,8241               | 2,1562               | 2,6468               | 2,5424               |
| -13  | 2,9689               | 2,6232               | 2,8352               | 2,8091               |
| -14  | 3,3828               | 2,9517               | 3,0681               | 3,1342               |
| -15  | 3,4907               | 3,5686               | 3,4161               | 3,4918               |
| -16  | 3,6918               | 3,0577               | 3,6154               | 3,455                |
| -17  | 4,0198               | 3,966                | 3,9174               | 3,9678               |
| -18  | 4,2418               | 4,3184               | 4,2128               | 4,2577               |
| -19  | 4,4114               | 4,5482               | 4,4504               | 4,47                 |

## SMA 16 B S: 5,17 M-%

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 20   | 0,0024               | 0,0003               | 0,0034               | 0,0757               |
| 19   | 0,0024               | 0,0066               | 0,002                | 0,0534               |
| 18   | 0,0024               | 0,0202               | 0,0262               | 0,0416               |
| 17   | 0,0024               | 0,0279               | 0,0293               | 0,0214               |
| 16   | 0,0237               | 0,0544               | 0,0425               | 0,0402               |
| 15   | 0,0418               | 0,0586               | 0,064                | 0,0548               |
| 14   | 0,0605               | 0,0743               | 0,0786               | 0,0711               |
| 13   | 0,0832               | 0,0928               | 0,0959               | 0,0906               |
| 12   | 0,1053               | 0,1161               | 0,1143               | 0,1119               |
| 11   | 0,1324               | 0,1273               | 0,1398               | 0,1332               |
| 10   | 0,1648               | 0,1513               | 0,1684               | 0,1615               |
| 9    | 0,1952               | 0,1698               | 0,198                | 0,1877               |
| 8    | 0,2273               | 0,2019               | 0,2296               | 0,2196               |
| 7    | 0,2591               | 0,2323               | 0,2654               | 0,2522               |
| 6    | 0,3035               | 0,2668               | 0,2984               | 0,2896               |
| 5    | 0,3523               | 0,3083               | 0,3365               | 0,3324               |
| 4    | 0,4586               | 0,3522               | 0,3841               | 0,3983               |
| 3    | 0,484                | 0,399                | 0,4351               | 0,4394               |
| 2    | 0,5375               | 0,4551               | 0,4964               | 0,4963               |
| 1    | 0,6017               | 0,5133               | 0,5715               | 0,5622               |
| 0    | 0,6879               | 0,5789               | 0,6508               | 0,6392               |
| -1   | 0,7815               | 0,6539               | 0,7216               | 0,719                |
| -2   | 0,8671               | 0,7327               | 0,8008               | 0,8002               |
| -3   | 0,967                | 0,8328               | 0,8985               | 0,8994               |
| -4   | 1,0753               | 0,9126               | 1,0104               | 0,9995               |
| -5   | 1,2037               | 1,0343               | 1,122                | 1,12                 |

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| -6   | 1,3103  | 1,1124  | 1,2234  | 1,2154           |
| -7   | 1,4297  | 1,2237  | 1,3353  | 1,3296           |
| -8   | 1,5791  | 1,3572  | 1,4687  | 1,4683           |
| -9   | 1,7459  | 1,4915  | 1,6218  | 1,6197           |
| -10  | 1,8816  | 1,6247  | 1,7816  | 1,7627           |
| -11  | 2,0534  | 1,7845  | 1,9426  | 1,9268           |
| -12  | 2,2359  | 1,9208  | 2,0939  | 2,0836           |
| -13  | 2,4171  | 2,1157  | 2,2838  | 2,2722           |
| -14  | 2,619   | 2,2695  | 2,4672  | 2,4519           |
| -15  | 2,8627  | 2,461   | 2,6934  | 2,6723           |
| -16  | 3,08    | 2,6824  | 2,9033  | 2,8886           |
| -17  | 3,2869  | 2,8878  | 3,1363  | 3,1037           |
| -18  | 3,56    | 3,134   | 3,3758  | 3,3566           |
| -19  | 3,7906  | 3,3122  | 3,6323  | 3,5784           |
| -20  | 4,0253  | 3,542   | 3,8439  | 3,8038           |
| -21  | 4,1881  | 3,7363  | 4,0504  | 3,9916           |
| -22  | 0,0000  | 0,0000  | 4,1906  | 4,1906           |

## SMA 16 B S: 5,47 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 20   | 0,0024  | 0,0031  | 0,0017  | 0,0024           |
| 19   | 0,0007  | 0,0127  | 0,001   | 0,0048           |
| 18   | 0,0221  | 0,027   | 0,0229  | 0,024            |
| 17   | 0,0404  | 0,0376  | 0,0323  | 0,0368           |
| 16   | 0,051   | 0,064   | 0,0427  | 0,0526           |
| 15   | 0,0642  | 0,0732  | 0,0609  | 0,0661           |
| 14   | 0,0802  | 0,091   | 0,0777  | 0,083            |
| 13   | 0,0985  | 0,1139  | 0,0952  | 0,1025           |
| 12   | 0,1172  | 0,1376  | 0,1076  | 0,1208           |
| 11   | 0,1308  | 0,1619  | 0,1298  | 0,1408           |
| 10   | 0,1505  | 0,1855  | 0,1506  | 0,1622           |
| 9    | 0,178   | 0,2084  | 0,1728  | 0,1864           |
| 8    | 0,1984  | 0,2385  | 0,194   | 0,2103           |
| 7    | 0,229   | 0,2806  | 0,2246  | 0,2447           |
| 6    | 0,2643  | 0,3254  | 0,2576  | 0,2824           |
| 5    | 0,3034  | 0,3703  | 0,2935  | 0,3224           |
| 4    | 0,3482  | 0,4192  | 0,3372  | 0,3682           |
| 3    | 0,4131  | 0,4719  | 0,385   | 0,4233           |
| 2    | 0,4512  | 0,5318  | 0,4378  | 0,4736           |
| 1    | 0,5096  | 0,5934  | 0,4943  | 0,5324           |
| 0    | 0,5762  | 0,6704  | 0,5713  | 0,6059           |



| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| -1   | 0,6526  | 0,7528  | 0,6442  | 0,6832           |
| -2   | 0,7284  | 0,8469  | 0,7249  | 0,7668           |
| -3   | 0,8154  | 0,9486  | 0,8305  | 0,8648           |
| -4   | 0,9143  | 1,0536  | 0,9196  | 0,9625           |
| -5   | 1,0006  | 1,1621  | 1,0366  | 1,0664           |
| -6   | 1,1106  | 1,2822  | 1,165   | 1,186            |
| -7   | 1,2262  | 1,3855  | 1,2921  | 1,3013           |
| -8   | 1,3495  | 1,5159  | 1,4263  | 1,4306           |
| -9   | 1,4833  | 1,6662  | 1,5658  | 1,5718           |
| -10  | 1,6325  | 1,8147  | 1,6966  | 1,7146           |
| -11  | 1,7708  | 1,9676  | 1,8456  | 1,8613           |
| -12  | 1,9189  | 2,1415  | 1,9716  | 2,0107           |
| -13  | 2,0728  | 2,3191  | 2,12    | 2,1706           |
| -14  | 2,2624  | 2,5254  | 2,2901  | 2,3593           |
| -15  | 2,4523  | 2,7112  | 2,4797  | 2,5477           |
| -16  | 2,6123  | 2,8915  | 2,6522  | 2,7187           |
| -17  | 2,8084  | 3,09    | 2,8143  | 2,9042           |
| -18  | 3,0098  | 3,3015  | 2,9834  | 3,0982           |
| -19  | 3,2476  | 3,5209  | 3,2197  | 3,3294           |
| -20  | 3,3812  | 3,6721  | 3,3257  | 3,4596           |
| -21  | 3,5449  | 0,0000  | 3,4531  | 3,499            |
| -22  | 3,6669  | 0,0000  | 3,4541  | 3,5605           |

## SMA 16 B S: 6,03 M-%

| T    | sigma_1 | sigma_2 | sigma_3 | sigma_Mittelwert |
|------|---------|---------|---------|------------------|
| [°C] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²] | [N/mm²]          |
| 20   | 0,0017  | 0,0003  | 0,0015  | 0,0012           |
| 19   | 0       | 0,0126  | 0,0011  | 0,0046           |
| 18   | 0,0099  | 0,016   | 0,0182  | 0,0147           |
| 17   | 0,0187  | 0,0334  | 0,0253  | 0,0258           |
| 16   | 0,0283  | 0,0437  | 0,0319  | 0,0346           |
| 15   | 0,0364  | 0,0529  | 0,0501  | 0,0465           |
| 14   | 0,0507  | 0,0798  | 0,0624  | 0,0643           |
| 13   | 0,0627  | 0,0778  | 0,0728  | 0,0711           |
| 12   | 0,078   | 0,0887  | 0,0876  | 0,0848           |
| 11   | 0,094   | 0,1033  | 0,1118  | 0,103            |
| 10   | 0,113   | 0,1211  | 0,1274  | 0,1205           |
| 9    | 0,1314  | 0,1531  | 0,1459  | 0,1435           |
| 8    | 0,1542  | 0,1777  | 0,1764  | 0,1694           |
| 7    | 0,1774  | 0,2125  | 0,2057  | 0,1985           |
| 6    | 0,2063  | 0,2435  | 0,2321  | 0,2273           |
| 5    | 0,2414  | 0,2828  | 0,2707  | 0,265            |

| T    | sigma_1              | sigma_2              | sigma_3              | sigma_Mittelwert     |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [°C] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| 4    | 0,2816               | 0,3271               | 0,3123               | 0,307                |
| 3    | 0,3221               | 0,3742               | 0,3688               | 0,355                |
| 2    | 0,3731               | 0,4284               | 0,4274               | 0,4097               |
| 1    | 0,4276               | 0,4888               | 0,4802               | 0,4655               |
| 0    | 0,4876               | 0,5577               | 0,5574               | 0,5342               |
| -1   | 0,5512               | 0,6409               | 0,6198               | 0,604                |
| -2   | 0,6316               | 0,7262               | 0,6985               | 0,6854               |
| -3   | 0,7068               | 0,8183               | 0,7806               | 0,7686               |
| -4   | 0,7967               | 0,9182               | 0,8939               | 0,8696               |
| -5   | 0,8907               | 1,0369               | 0,9927               | 0,9734               |
| -6   | 0,9948               | 1,1419               | 1,0721               | 1,0696               |
| -7   | 1,1143               | 1,2712               | 1,2044               | 1,1966               |
| -8   | 1,2407               | 1,3994               | 1,3611               | 1,3337               |
| -9   | 1,3823               | 1,5536               | 1,5104               | 1,4821               |
| -10  | 1,5328               | 1,7139               | 1,6548               | 1,6338               |
| -11  | 1,6792               | 1,8637               | 1,832                | 1,7916               |
| -12  | 1,8538               | 2,0526               | 2,0147               | 1,9737               |
| -13  | 2,0523               | 2,2354               | 2,1907               | 2,1595               |
| -14  | 2,2416               | 2,4381               | 2,3905               | 2,3567               |
| -15  | 2,45                 | 2,6481               | 2,1376               | 2,4119               |
| -16  | 2,6587               | 2,8719               | 2,4711               | 2,6672               |
| -17  | 2,8807               | 3,1137               | 2,7396               | 2,9113               |
| -18  | 3,1261               | 3,3583               | 2,9661               | 3,1502               |
| -19  | 3,3526               | 3,627                | 2,9643               | 3,3146               |
| -20  | 3,5306               | 3,8522               | 3,3134               | 3,5654               |
| -21  | 3,6433               | 0,0000               | 3,586                | 3,6146               |

**Anlage 7: Ergebnisse der Versuche zum Verformungsverhalten***Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1*

SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,03 M-%

|                                  | D2-1-01    | D2-1-04    | D2-1-13    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9244       | 9898       | 9898       | 9680       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/00      | 323        | 486        | 1772       | 860,333333 |
| Dehnung (MW) bei 40 o/00         | 40,022805  | 40,0065585 | 40,0163265 | 40,01523   |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/00        | 40,4042983 | 39,9521244 | 39,4270731 | 39,9278319 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/00    | 372,210458 | 213,969503 | 31,0204082 | 205,733456 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/00   | 327,124718 | 194,247901 | 35,7584772 | 185,710365 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | -          | 68,6178062 | 50,3673469 | 59,4925766 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | -          | 68,7036188 | 50,8124165 | 59,7580177 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | -          | 11,4772914 | 8,16326531 | 9,82027833 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | -          | 9,87530752 | 6,98697933 | 8,43114342 |

SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,50 M-%

|                                  | D2-2-04 | D2-2-07    | D2-2-13    | Mittelwert |
|----------------------------------|---------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |         |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898    | 9898       | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -       | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -       | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -       | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -       | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |         |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/00      | -       | 672        | 695        | 683,5      |
| Dehnung (MW) bei 40 o/00         | -       | 40         | 40         | 40         |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/00        | -       | 39,4372127 | 39,9391163 | 39,6881645 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/00    | -       | 129,005059 | 135,204082 | 132,10457  |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/00   | -       | 111,263413 | 120,897977 | 116,080695 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |         |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | -       | 58,7183811 | 62,2108844 | 60,4646327 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | -       | 59,6308762 | 63,1080545 | 61,3694654 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | -       | 5,90219224 | 7,65306122 | 6,77762673 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | -       | 7,6719027  | 9,20367167 | 8,43778718 |

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,79 M-%

|                                  | D2-3-05    | D2-3-12 | D2-3-13    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|---------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |         |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898       | 9898    | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |         |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | 400        |         | 458        | 429        |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | 40,0127734 |         | 40         | 40,0063867 |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | 39,9464548 |         | 39,8967639 | 39,9216093 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | 245,888552 |         | 199,033038 | 222,460795 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | 223,501482 |         | 187,585363 | 205,543422 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |         |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 69,9824365 |         | 67,3489122 | 68,6656743 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 70,3053735 |         | 67,6438147 | 68,9745941 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 6,38671563 |         | 10,475423  | 8,43106934 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 10,3011159 |         | 9,71994733 | 10,0105316 |

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 7,52 M-%

|                                  | D2-4-05    | D2-4-10 | D2-4-13    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|---------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |         |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 2138       | 664     | 3363       | 2055       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |         |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | 180        |         | 169        | 174,5      |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | 40,0717703 |         | 40,0552964 | 40,0635333 |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | 40,5752264 |         | 40,4120339 | 40,4936302 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | 956,937799 |         | 942,630033 | 949,783916 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | 905,186079 |         | 779,962268 | 842,574174 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |         |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | -          | 0       | -          | 0          |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | -          | 0       | -          | 0          |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | -          | 0       | -          | 0          |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | -          | 0       | -          | 0          |

## SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 8,02 M-%

|                                  | D2-5-08    | D2-5-13    | D2-5-14    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 353        | 253        | 589        | 398,333333 |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/00      | 102        | 102        | 102        | 102        |
| Dehnung (MW) bei 40 o/00         | 44,2496381 | 48,615435  | 41,5809769 | 44,81535   |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/00        | 44,0502522 | 48,3090215 | 41,8185661 | 44,7259466 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/00    | 2814,05823 | 3034,57316 | 2646,20823 | 2831,6132  |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/00   | 2796,31711 | 3019,43352 | 2623,24107 | 2812,99724 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |

## SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A; 7,01 M-%

|                                  | DA-02      | DA-09      | DA-15      | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 3160       | 4970       | 4631       | 4253,66667 |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/00      | 252        | 301        | 310        | 287,666667 |
| Dehnung (MW) bei 40 o/00         | 40,0704462 | 40,040309  | 40         | 40,0369184 |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/00        | 40,3516786 | 40,5153634 | 40,2970223 | 40,3880215 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/00    | 633,176786 | 487,907289 | 449,503311 | 523,529129 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/00   | 568,203225 | 456,874797 | 421,992363 | 482,356795 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | -          | 0          | -          | 0          |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | -          | 0          | -          | 0          |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | -          | 0          | -          | 0          |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | -          | 0          | -          | 0          |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

|                                  | D1-1-03    | D1-1-13    | D1-1-15    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 1564       | 3852       | 2766       | 2727,33333 |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | 35,4537744 | 31,2804981 | 47,2306143 | 37,9882956 |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | 35,317295  | 31,3652268 | 47,0147748 | 37,8990989 |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | 141,645462 | 48,7969039 | 88,9560255 | 93,1327972 |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | 139,170925 | 42,4102798 | 83,5436442 | 88,3749497 |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | 1879       | 5709       | 1941       | 3176,33333 |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | 40         | 40,0134612 | 40,0134273 | 40,0089628 |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | 39,7225435 | 39,5117991 | 40,0615448 | 39,7652958 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | 145,886344 | 44,5902743 | 81,4031554 | 90,6265914 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | 141,381838 | 46,7224739 | 86,0014294 | 91,3685806 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | -          | 66,515228  | -          | 66,515228  |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | -          | 66,5313744 | -          | 66,5313744 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | -          | 84,9739189 | -          | 84,9739189 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | -          | 92,5185929 | -          | 92,5185929 |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

|                                  | D1-2-10    | D1-2-11    | D1-2-13    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 5102       | 7009       | 5934       | 6015       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | 24,0529668 | 41,2984823 | 48,4732188 | 37,941556  |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | 24,1123577 | 41,251719  | 48,4526425 | 37,9389064 |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | 19,2758967 | 18,549747  | 29,2007342 | 22,342126  |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | 22,6469036 | 19,7691494 | 27,4827164 | 23,2995898 |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | 6317       | 2993       | 4655       |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | 40         | 40,030035  | 40,0150175 |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | 39,8816451 | 39,9413008 | 39,9114729 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | 24,4519393 | 27,5321208 | 25,99203   |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | 19,8617448 | 32,6596436 | 26,2606942 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 35,4341267 | 47,0489039 | 59,7029868 | 47,3953391 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 35,4792558 | 47,0828746 | 59,9007688 | 47,487633  |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 25,142474  | 23,608769  | 29,2007342 | 25,9839924 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 25,4923756 | 20,9547681 | 31,4172431 | 25,9547956 |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

|                                  | D1-3-01    | D1-3-05    | D1-3-15    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 5744       | 6278       | 7195       | 6405,66667 |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | 26,3754585 | 31,6547954 | 35,4228856 | 31,1510465 |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | 26,4078665 | 31,6481004 | 35,3860022 | 31,147323  |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | 13,3377793 | 22,3621004 | 14,0961857 | 16,5986885 |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | 14,0489807 | 18,8456406 | 17,8905376 | 16,9283863 |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/00      | -          | -          | 9766       | 9766       |
| Dehnung (MW) bei 40 o/00         | -          | -          | 40         | 40         |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/00        | -          | -          | 40,0462683 | 40,0462683 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/00    | -          | -          | 19,0713101 | 19,0713101 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/00   | -          | -          | 18,5639496 | 18,5639496 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 32,660887  | 38,6118933 | 40,2155887 | 37,1627897 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 32,7181184 | 38,6803454 | 40,2917294 | 37,2300644 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 16,6722241 | 21,5338744 | 18,2421227 | 18,8160737 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 17,320464  | 20,4722859 | 18,6279936 | 18,8069145 |

## SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

|                                  | D1-5-07    | D1-5-13    | D1-5-14    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 7556       | 9898       | 8964       | 8806       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | 37,9661574 | -          | 27,5562701 | 32,7612137 |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | 37,9548617 | -          | 27,5722048 | 32,7635332 |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | 22,178413  | -          | 19,2926045 | 20,7355088 |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | 22,2962224 | -          | 17,9181674 | 20,1071949 |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/00      | 8455       | -          | -          | 8455       |
| Dehnung (MW) bei 40 o/00         | 40,0032857 | -          | -          | 40,0032857 |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/00        | 39,9615576 | -          | -          | 39,9615576 |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/00    | 22,178413  | -          | -          | 22,178413  |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/00   | 22,3710131 | -          | -          | 22,3710131 |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 43,2725481 | 36,7884172 | 29,3569132 | 36,4726262 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 43,2132963 | 36,5893139 | 29,2465725 | 36,3497276 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 24,6426811 | 25,5018098 | 19,2926045 | 23,1456985 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 22,7433678 | 19,6829204 | 17,9439235 | 20,1234039 |

AC 16 B S SG: 4,75 M-%

|                                  | B2-1-03    | B2-1-05    | B2-1-13    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898       | 9898       | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 9,29449402 | 6,62681469 | 6,80538973 | 7,57556615 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 9,34096908 | 6,81812374 | 6,85790842 | 7,67233375 |
|                                  |            | -          |            |            |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 1,68378515 | 1,70794193 | 2,55841719 | 0,84475347 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 2,32428179 | 3,12886494 | 1,25148404 | 2,23487693 |

AC 16 B S SG: 5,00 M-%

|                                  | B2-2-07    | B2-2-12 | B2-2-13    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|---------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |         |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898       | 9898    | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |         |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -       | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |         |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 7,86928976 |         | 10,9657114 | 9,4175006  |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 8,04060728 |         | 11,3869887 | 9,71379798 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 6,66888963 |         | 8,2822594  | 7,47557452 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 3,07757893 |         | 3,90434133 | 3,49096013 |



AC 16 B S SG: 5,68 M-%

|                                  | B2-3-01    | B2-3-03    | B2-3-08    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898       | 9898       | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 18,5886691 | 15,8275804 | 11,2184376 | 15,2115624 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 18,5752404 | 15,8916442 | 11,1849261 | 15,2172702 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 5,86657727 | 7,57703317 | 5,08388409 | 6,17583151 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 2,59960104 | 5,49426774 | 1,59571864 | 3,22986247 |

AC 16 B S SG: 5,98 M-%

|                                  | B2-4-03    | B2-4-07    | B2-4-11    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 8970       | 9898       | 9898       | 9588,66667 |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 15,4609201 | 16,8321831 | 12,5021378 | 14,931747  |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 15,4823024 | 16,8631975 | 12,5475884 | 14,9643627 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 5,13083633 | 4,20804578 | 0,85513939 | 3,39800717 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 3,49988527 | 2,33936949 | 2,71994145 | 2,8530654  |

AC 16 B S SG: 6,55 M-%

|                                  | B2-5-03    | B2-5-07    | B2-5-12    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898       | 9898       | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 16,8634625 | 15,1613454 | 6,23441397 | 12,753074  |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 17,0372518 | 15,2879461 | 6,30161084 | 12,8756029 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 7,48378513 | 0          | 0,8312552  | 2,77168011 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 2,29770303 | 2,34365591 | 0,86144139 | 1,83426678 |

AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

|                                  | BA-03 | BA-06      | BA-11      | Mittelwert |
|----------------------------------|-------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |       |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898  | 9898       | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |       |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -     | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |       |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        |       | 12,150483  | 16,4835165 | 14,3169997 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       |       | 12,1252157 | 16,5831972 | 14,3542065 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   |       | 2,54194204 | 1,66500167 | 0,43847019 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  |       | 2,51602479 | 2,18018237 | 2,34810358 |

## SMA 16 B S: 5,17 M-%

|                                  | B1-1-05    | B1-1-06    | B1-1-09    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898       | 9898       | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 15,8458961 | 9,434279   | 18,3422104 | 14,5407952 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 16,0010808 | 9,63420962 | 18,4853559 | 14,7068821 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 0,83752094 | 1,67869733 | 0          | 0,83873942 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 2,49774273 | 1,30331526 | 2,96340303 | 2,25482034 |

## SMA 16 B S: 5,47 M-%

|                                  | B1-2-04    | B1-2-06    | B1-2-11    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 9898       | 9898       | 9898       | 9898       |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 8,39668863 | 7,64298094 | 14,114469  | 10,0513795 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 8,45189929 | 7,70337762 | 14,2518542 | 10,1357104 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 4,22368643 | 1,73310225 | 5,06500084 | 2,51852834 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 1,15828157 | 1,05381539 | 3,67139524 | 1,96116407 |

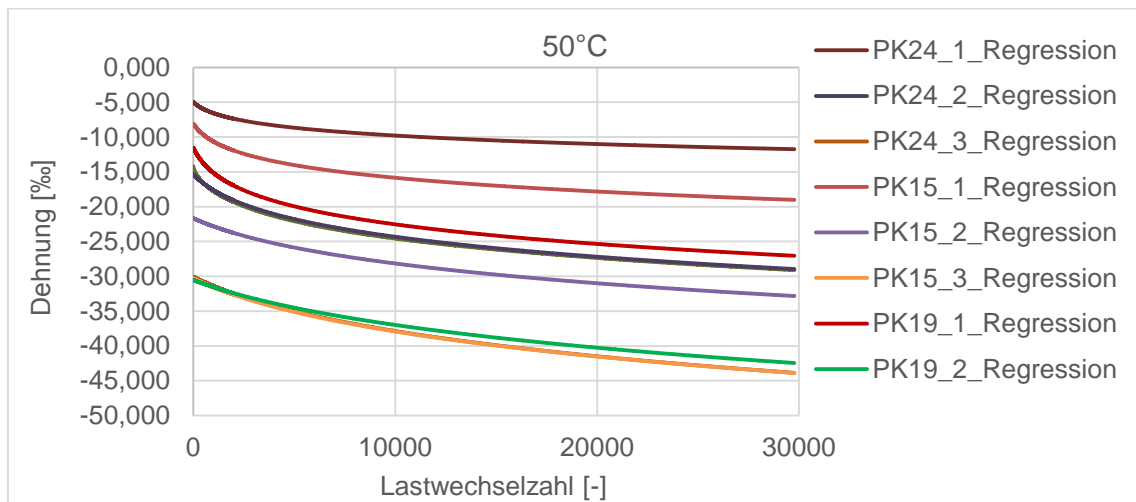
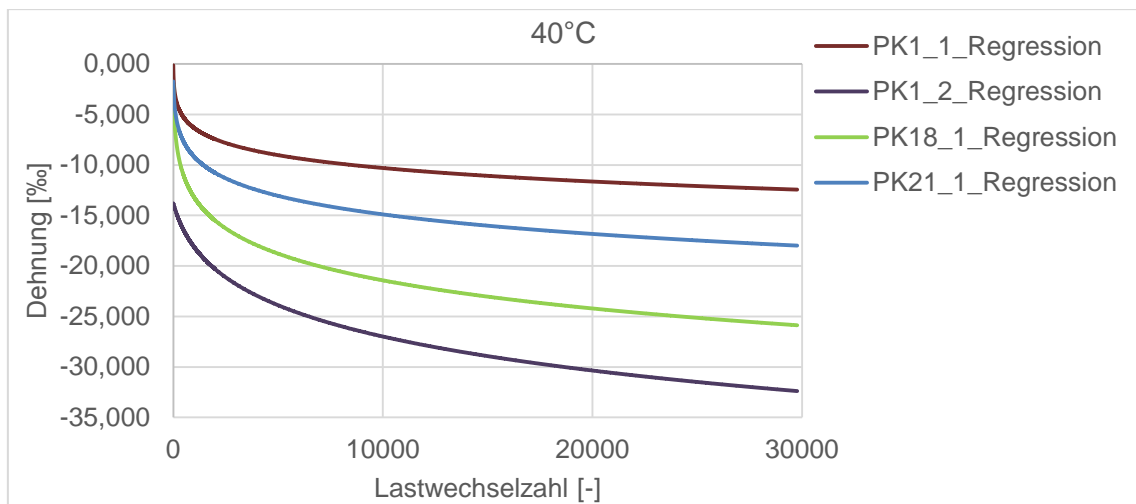
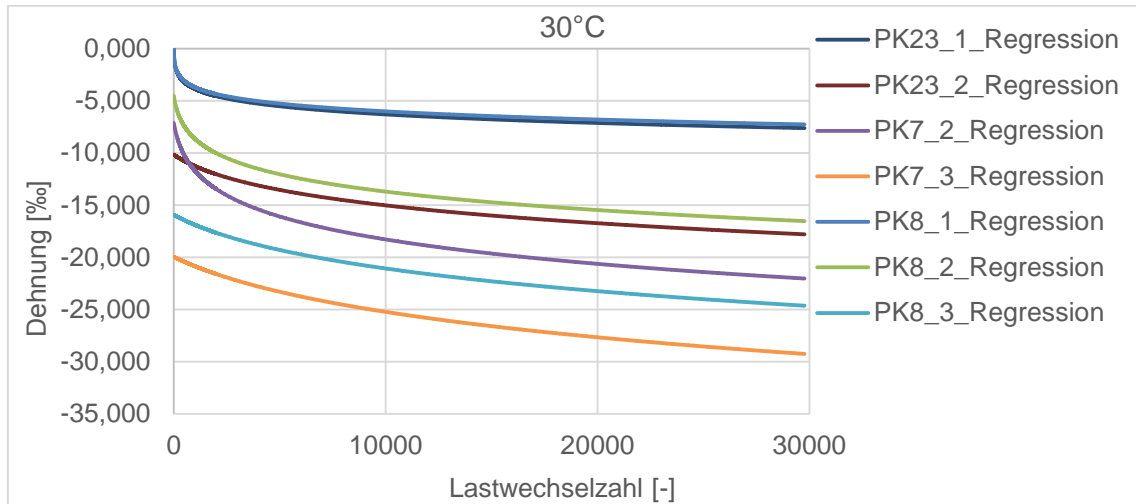
SMA 16 B S: 6,03 M-%

|                                  | B1-3-05    | B1-3-06    | B1-3-14    | Mittelwert |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ergebnisse im Wendepunkt</b>  |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl im Wendepunkt    | 8979       | 9898       | 9898       | 9591,66667 |
| Dehnung (MW) im Wendepunkt       | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) im Wendepunkt      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) im Wendepunkt  | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) im Wendepunkt | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 40 o/00</b>    |            |            |            |            |
| Lastwechselzahl bei 40 o/oo      | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (MW) bei 40 o/oo         | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnung (Reg) bei 40 o/oo        | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo    | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo   | -          | -          | -          | #DIV/0!    |
| <b>Ergebnisse bei 9.900 LW</b>   |            |            |            |            |
| Dehnung (MW) bei 9.900 LW        | 25,1598788 | 25,4411023 | 12,7695136 | 21,1234983 |
| Dehnung (Reg) bei 9.900 LW       | 25,2379078 | 25,555406  | 12,9839841 | 21,2590993 |
| Dehnungsrate (MW) bei 9.900 LW   | 3,36587008 | 0          | 1,67140231 | 1,67909079 |
| Dehnungsrate (Reg) bei 9.900 LW  | 5,35418785 | 3,14655023 | 1,51689169 | 3,33920993 |

*Druck-Schwellversuche am schlanken Probekörper*

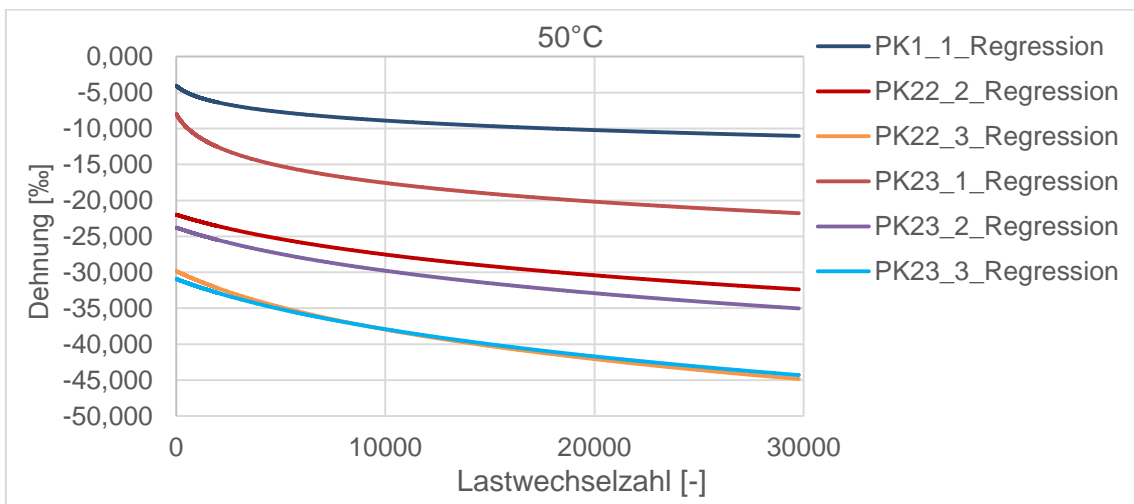
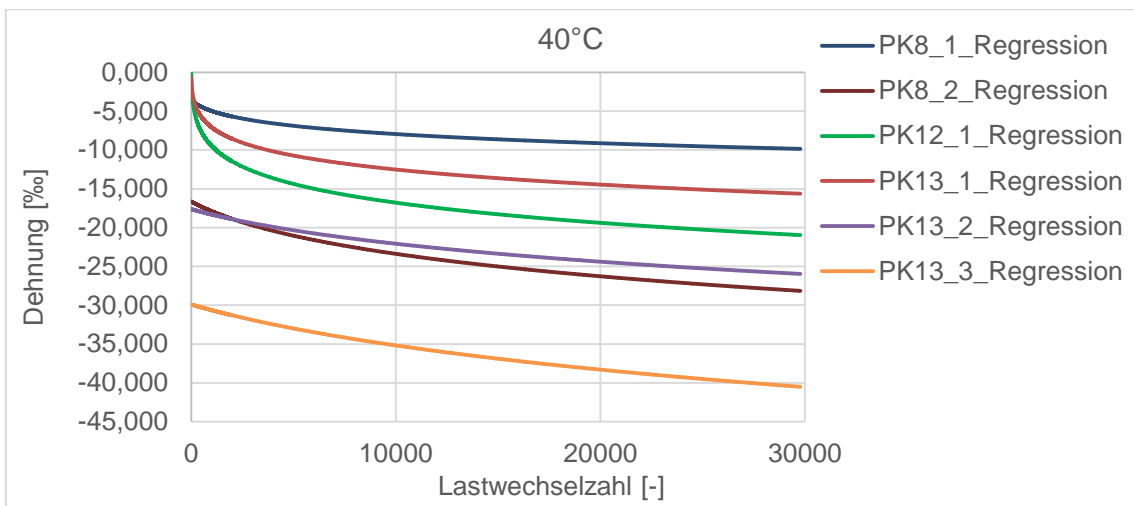
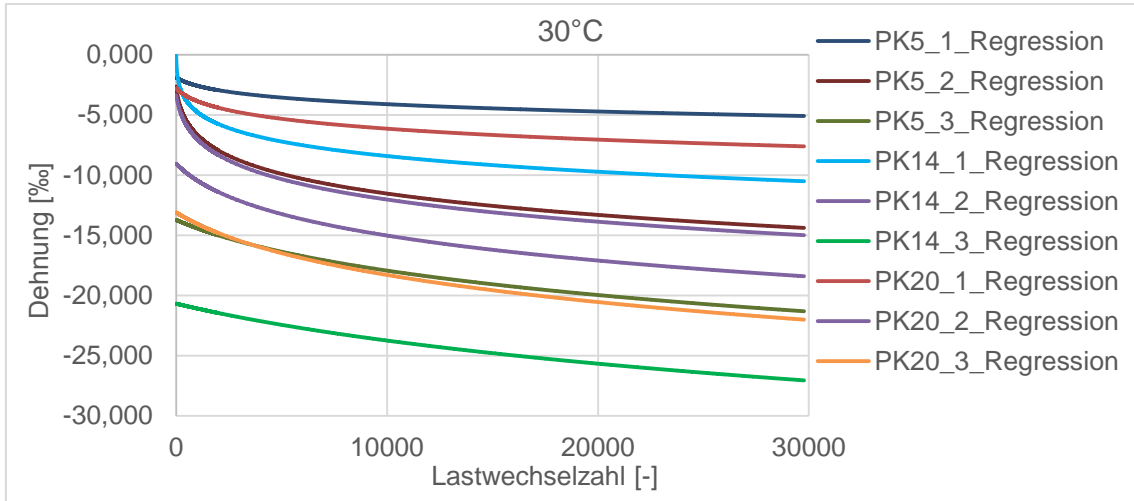
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,03 M-%

|           |           |                      |            |                      |            |
|-----------|-----------|----------------------|------------|----------------------|------------|
| <b>a1</b> | -0,035015 | <b>b</b>             | 1,68531429 |                      |            |
| <b>a2</b> | 0,599561  | <b>T<sub>0</sub></b> | -153,06706 | <b>R<sup>2</sup></b> | 0,97438212 |



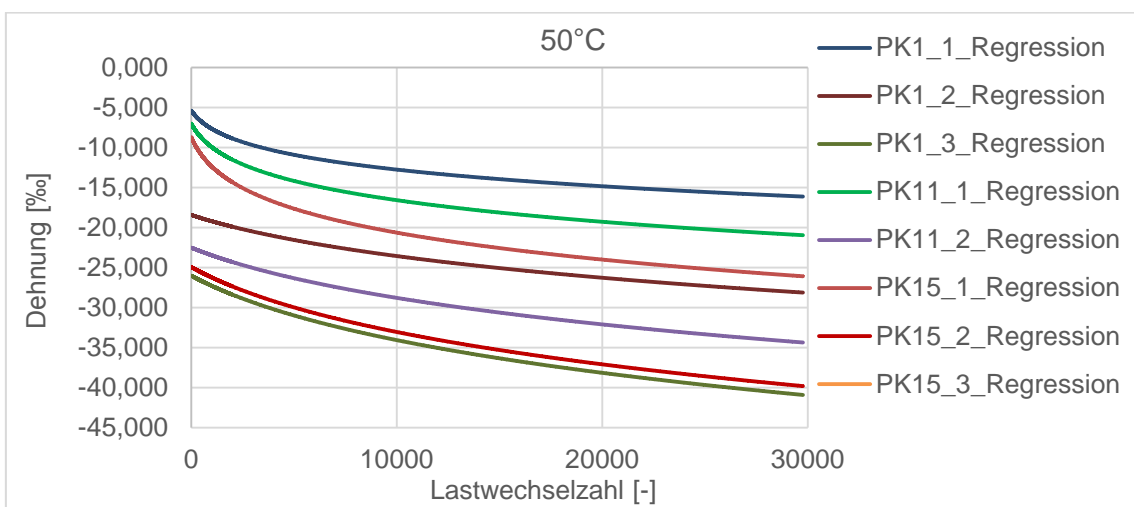
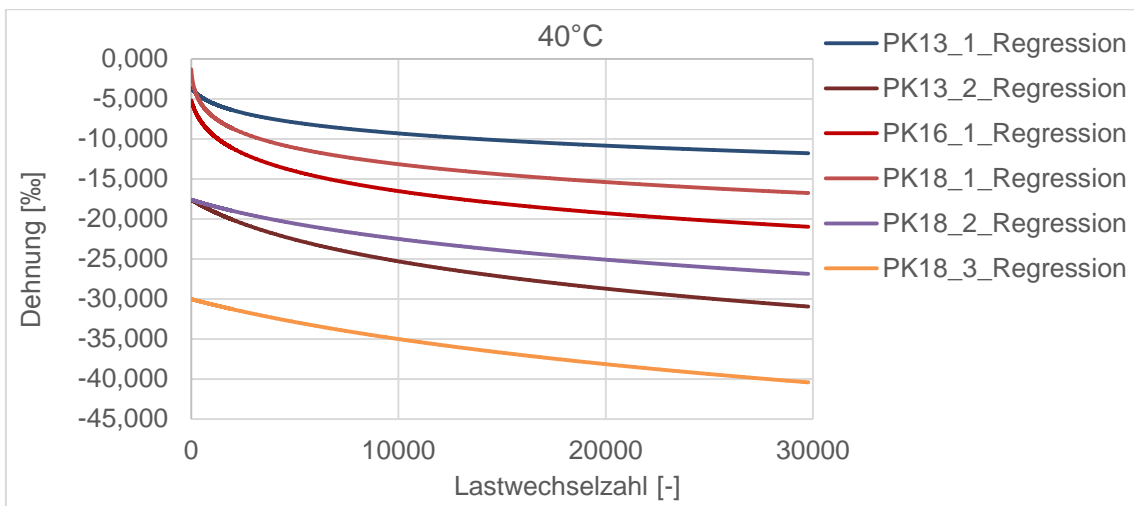
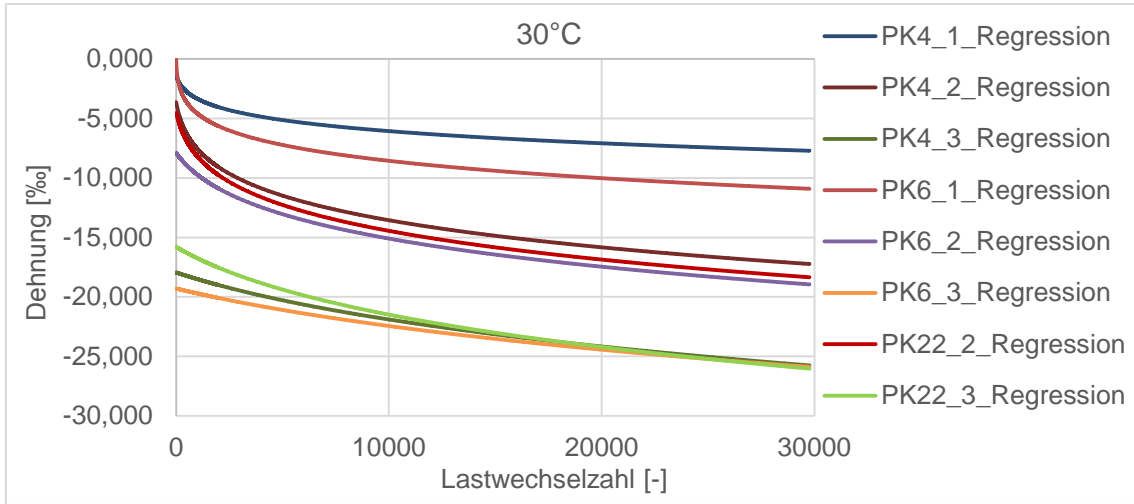
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,50 M-%

**a1** -0,0679695 **b** 1,98223503  
**a2** 0,71376929 **T<sub>0</sub>** -29,85778 **R<sup>2</sup>** 0,97699878



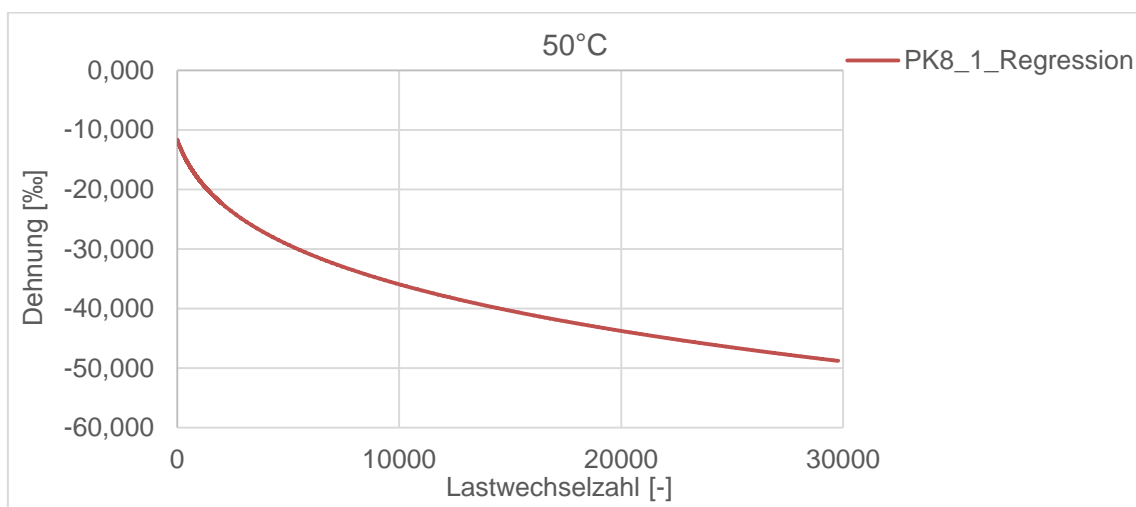
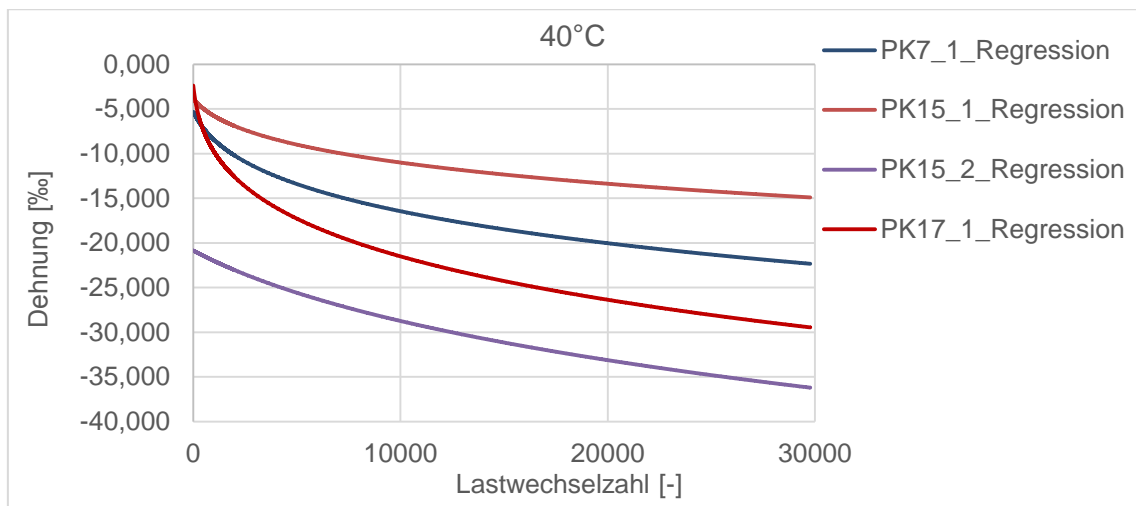
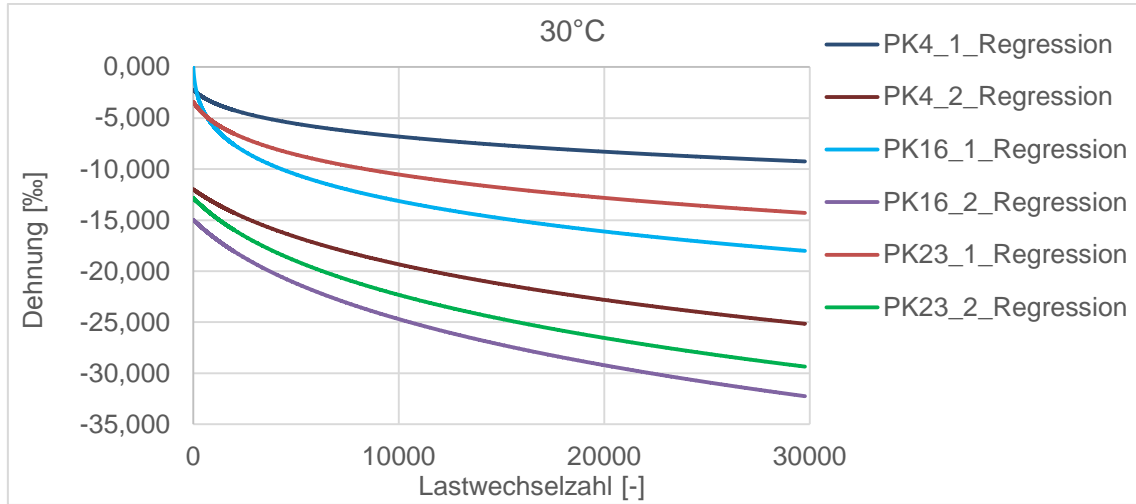
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,79 M-%

**a1** -0,0393830 **b** 2,16614504  
**a2** 0,67135199 **T<sub>0</sub>** -43,077685 **R<sup>2</sup>** 0,97458078



SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 7,52 M-%

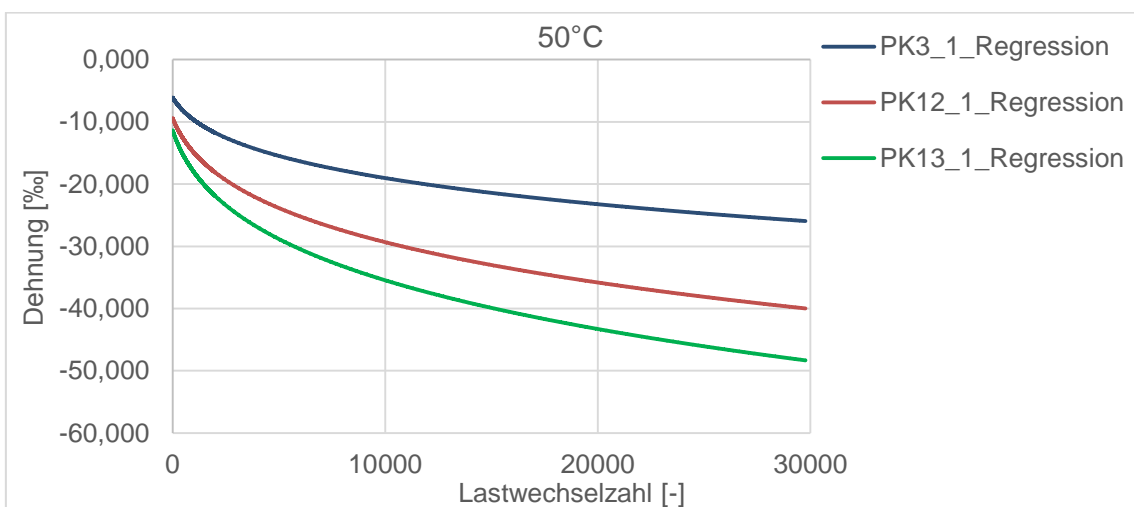
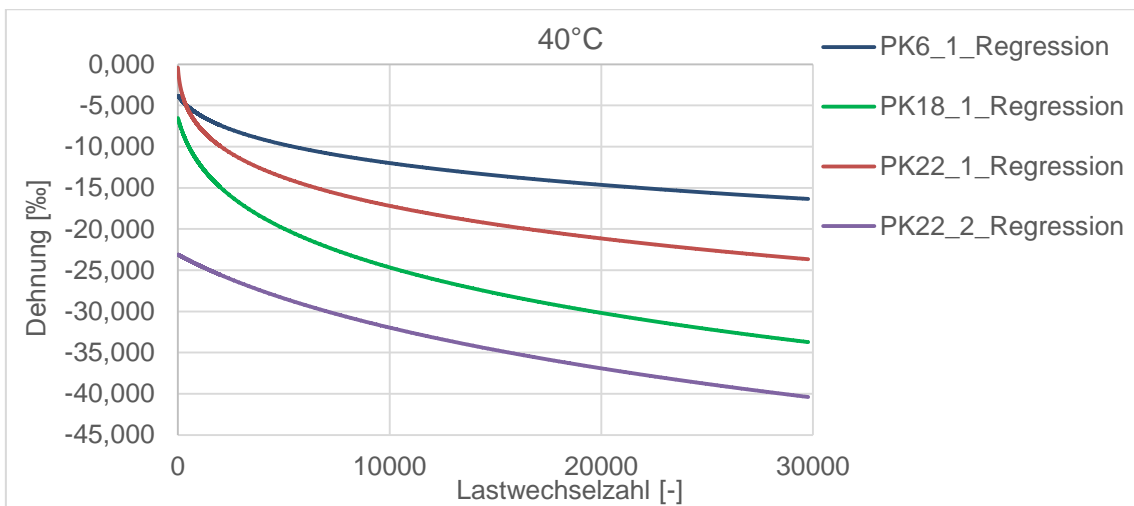
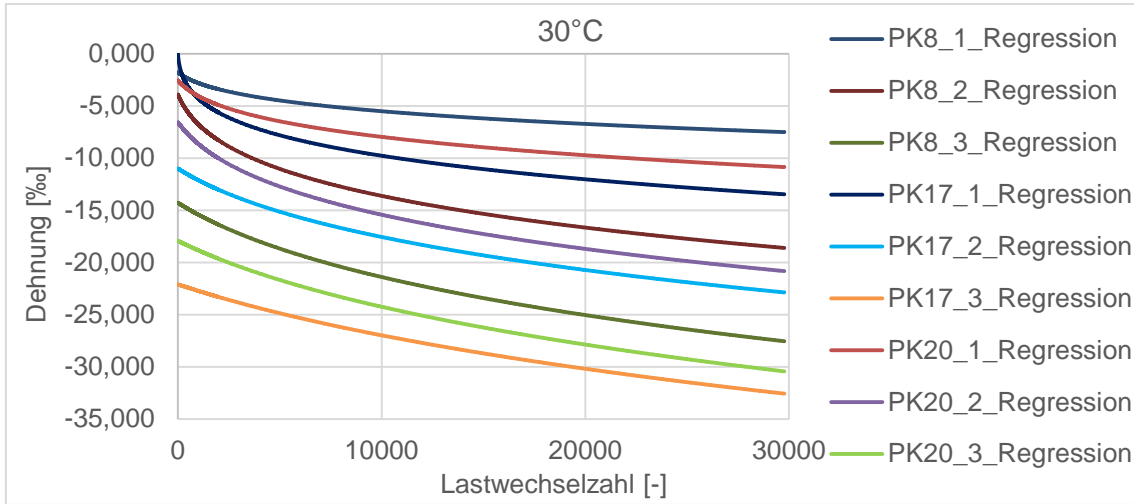
**a1** -0,1096052 **b** 2,82382103  
**a2** 0,79186817 **T<sub>0</sub>** 11,261532 **R<sup>2</sup>** 0,95904491





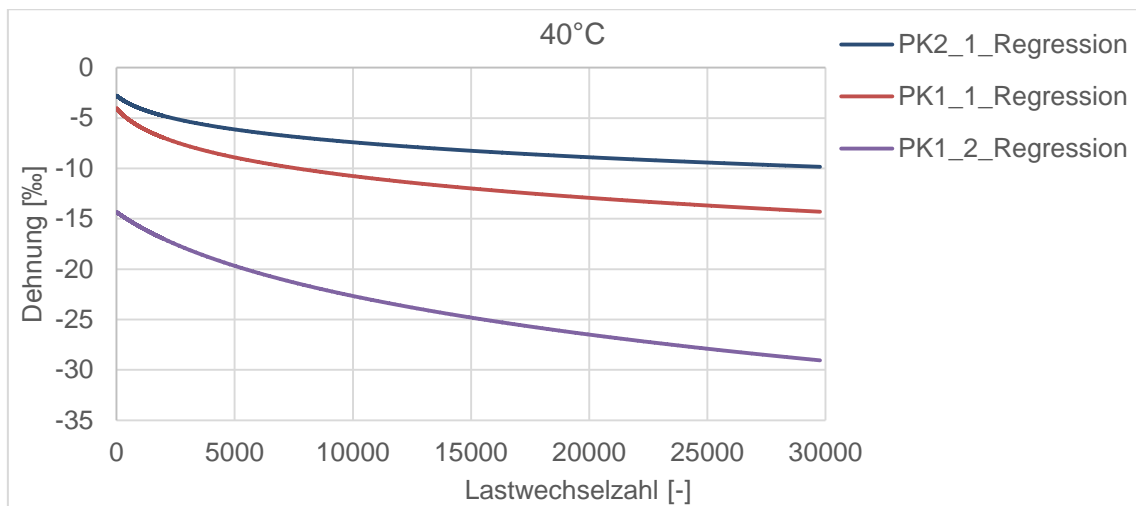
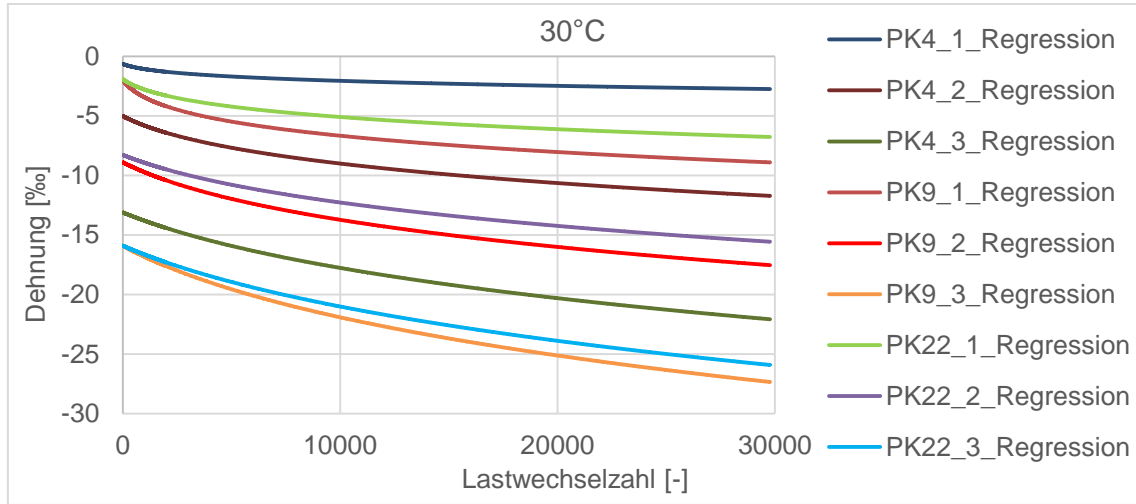
SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A; 7,01 M-%

**a1** -0,0893896 **b** 2,86031286  
**a2** 0,76490663 **T<sub>0</sub>** 12,4422899 **R<sup>2</sup>** 0,94275606



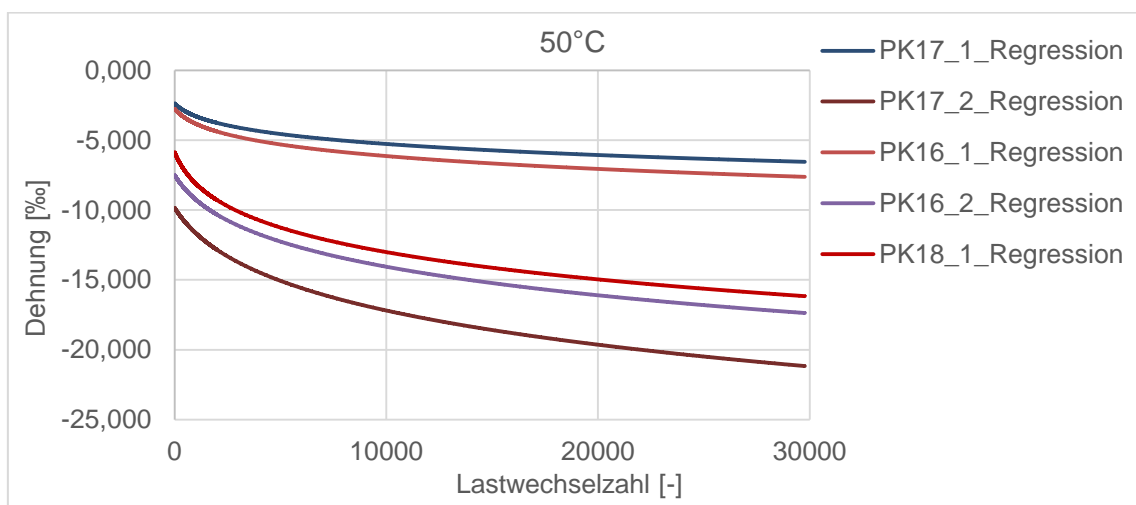
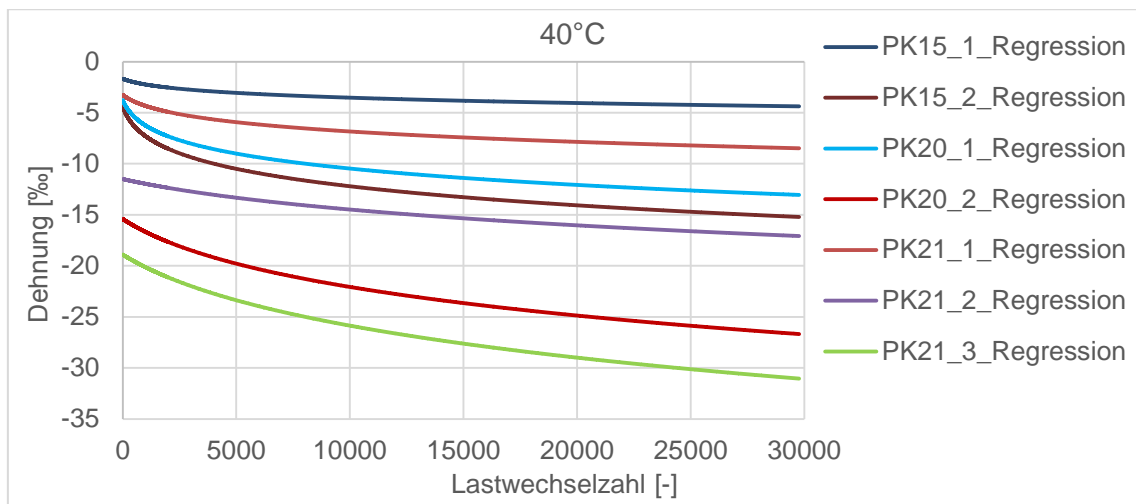
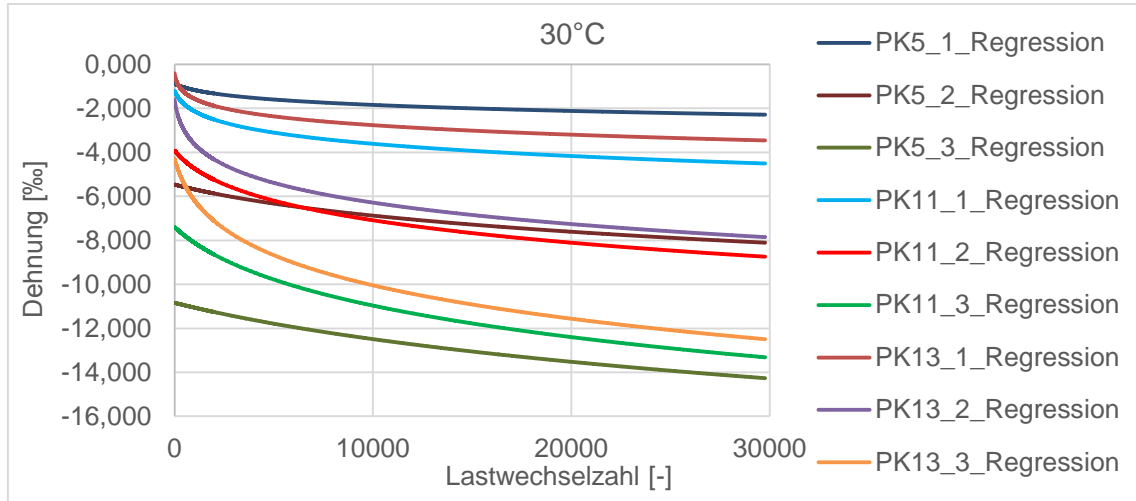
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

**a1** -0,0335639 **b** 2,64468838  
**a2** 0,88703426 **T<sub>0</sub>** -12,247871 **R<sup>2</sup>** 0,99299126



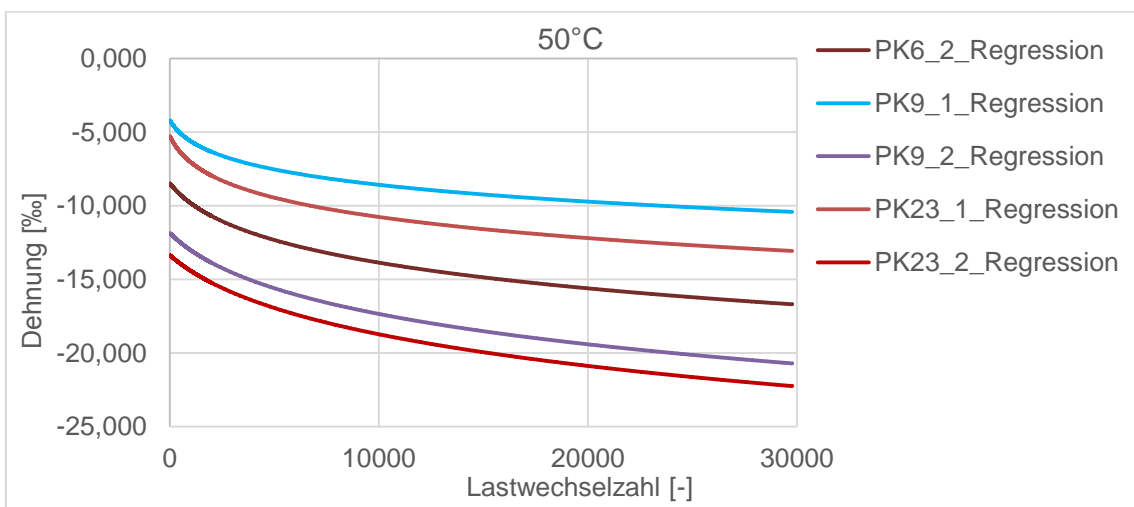
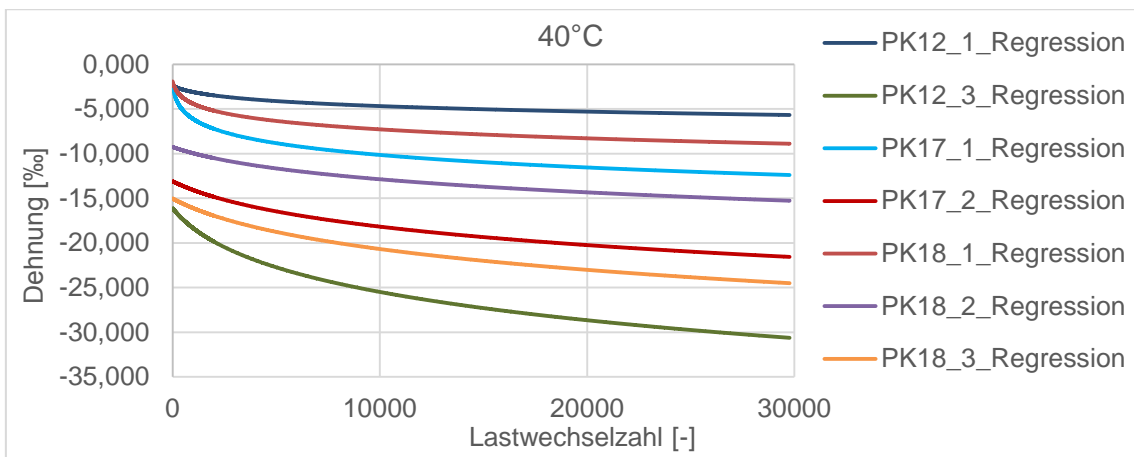
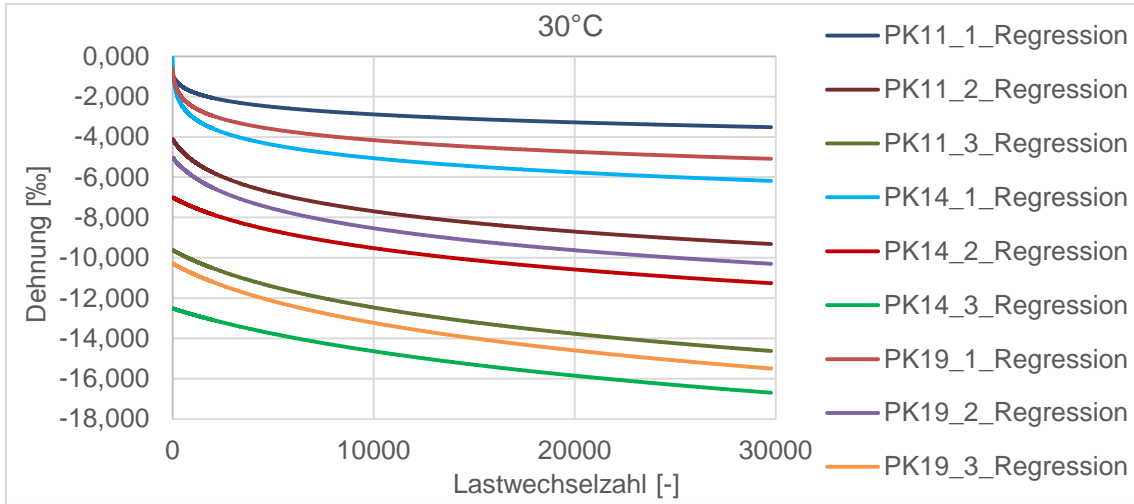
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

**a1** -0,1264568 **b** 2,0043024  
**a2** 0,96419076 **T<sub>0</sub>** 7,63614796 **R<sup>2</sup>** 0,96885756



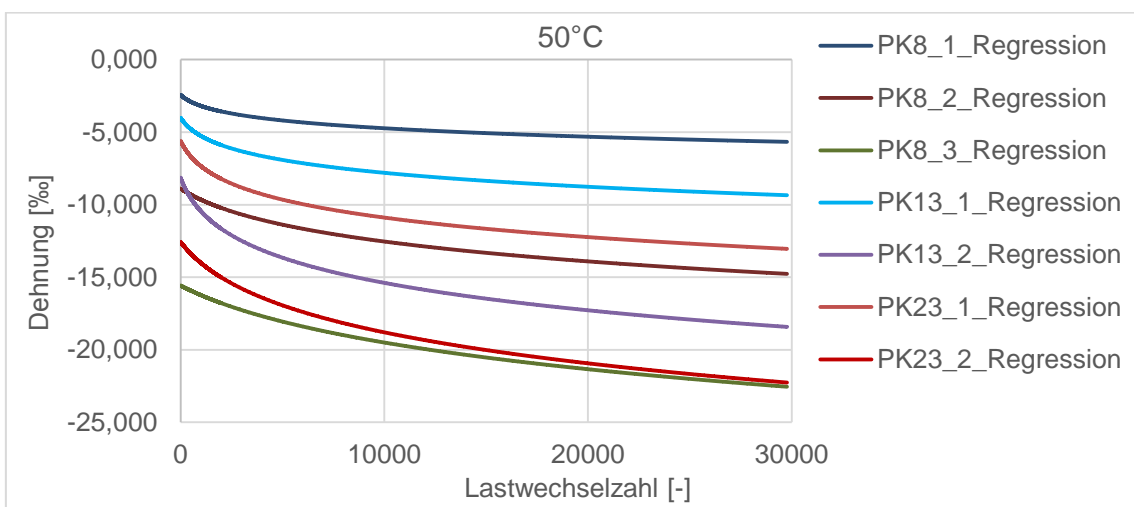
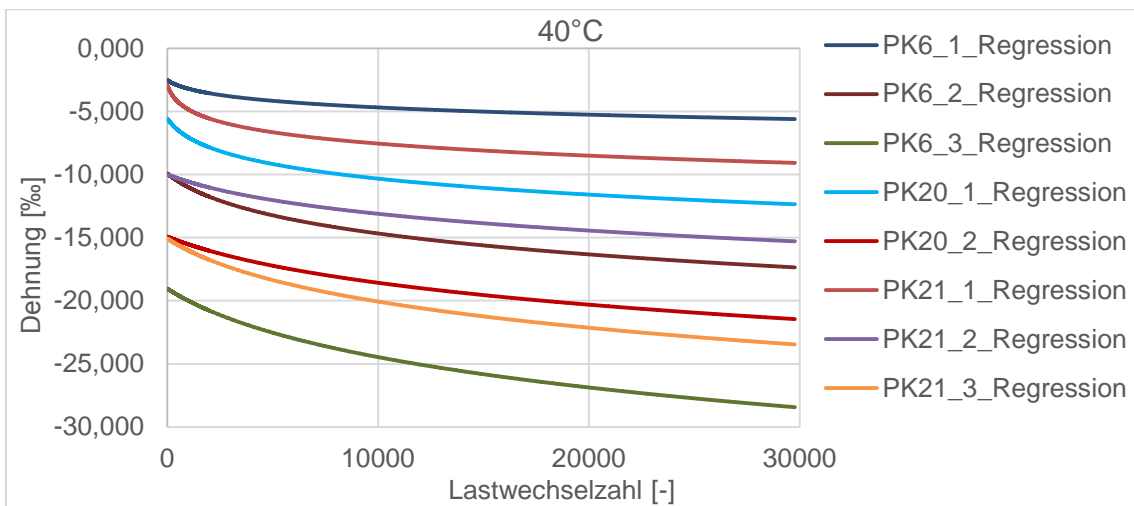
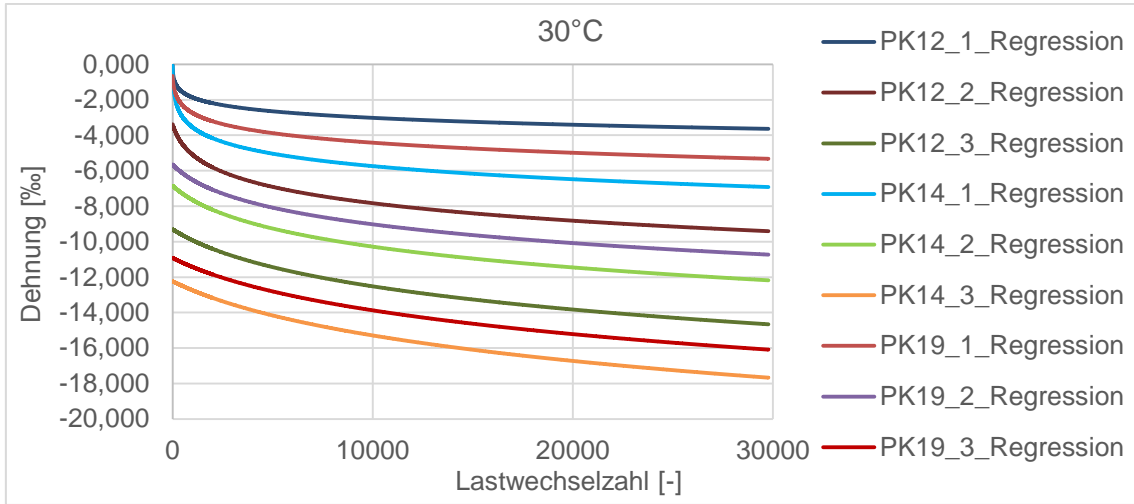
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

**a1** -0,0686584 **b** 1,79399616  
**a2** 0,77323955 **T<sub>0</sub>** -12,514904 **R<sup>2</sup>** 0,99591868



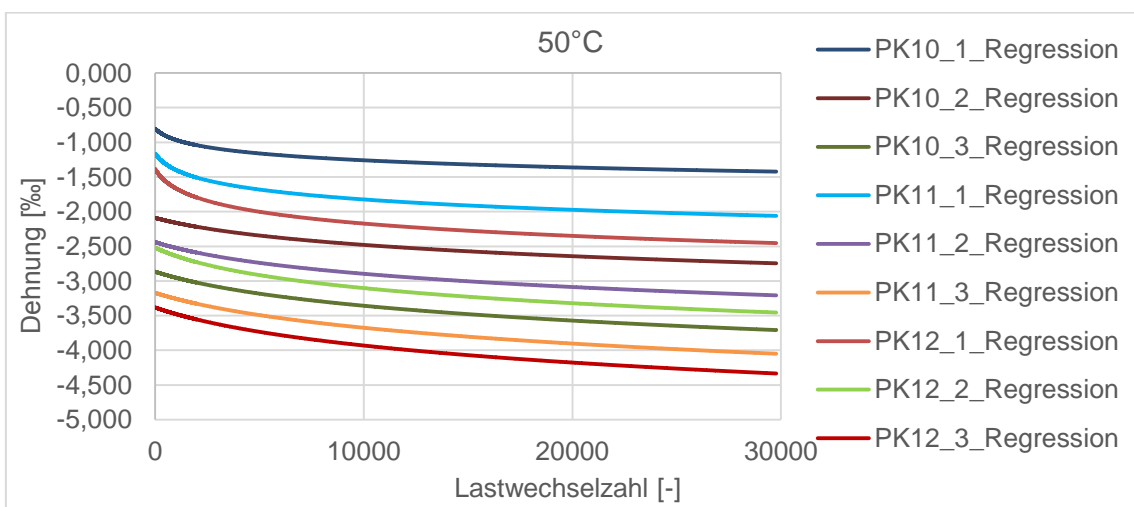
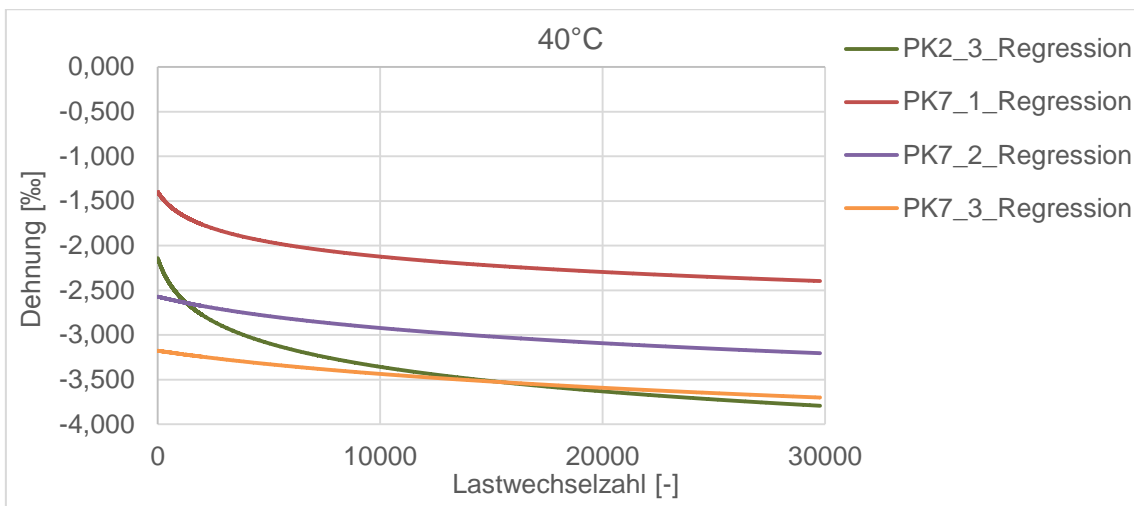
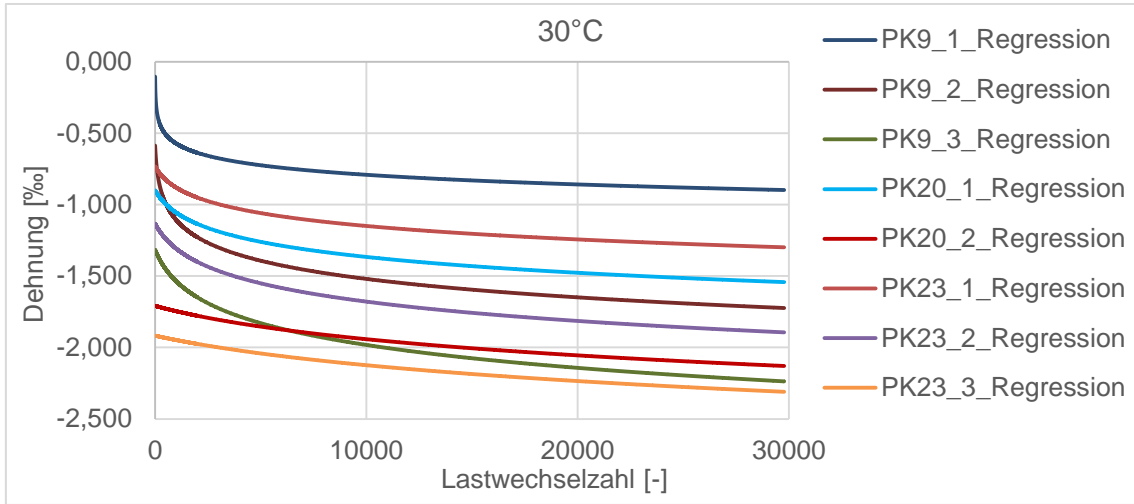
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

**a1** -0,0567393 **b** 1,66844244  
**a2** 0,76623611 **T<sub>0</sub>** -33,098747 **R<sup>2</sup>** 0,98428542



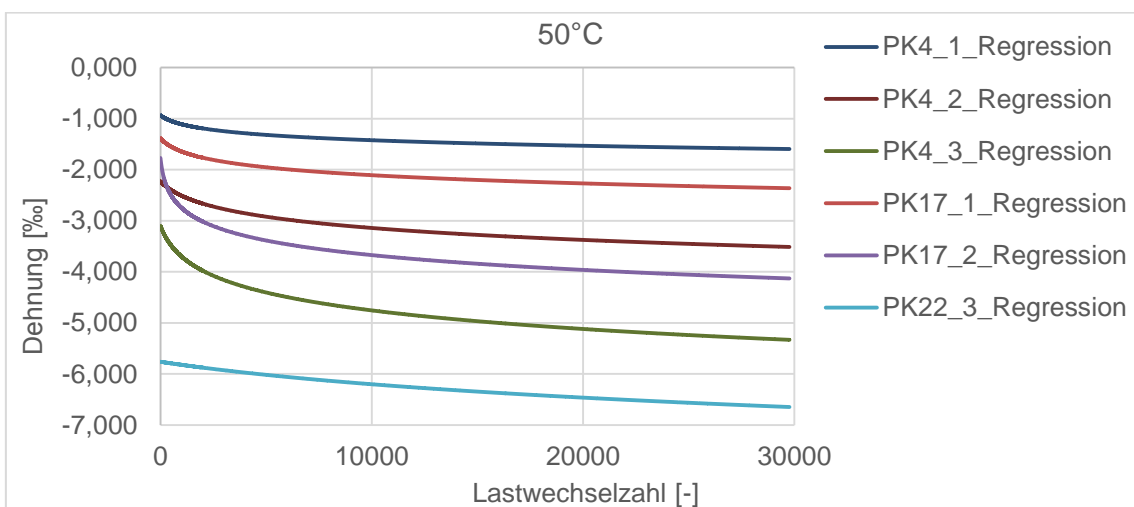
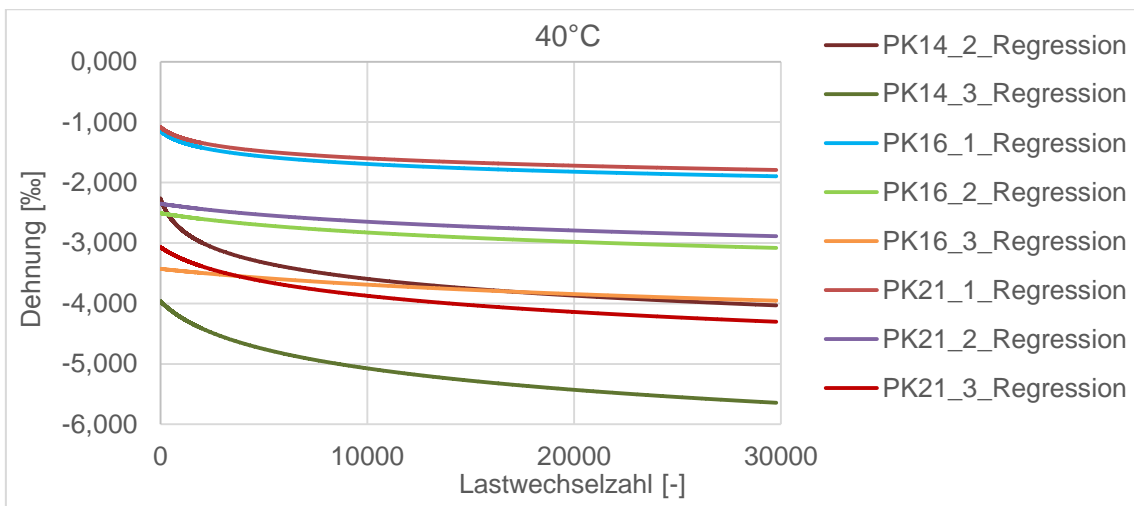
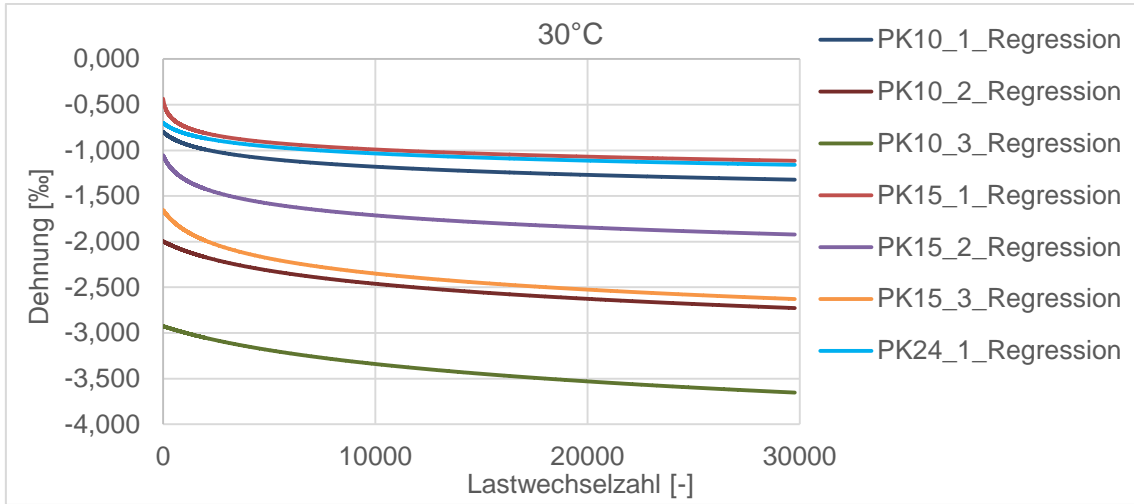
AC 16 B S SG: 4,75 M-%

**a1** -0,0490007 **b** 1,12666272  
**a2** 0,60130619 **T<sub>0</sub>** -4,6776168 **R<sup>2</sup>** 0,97082071



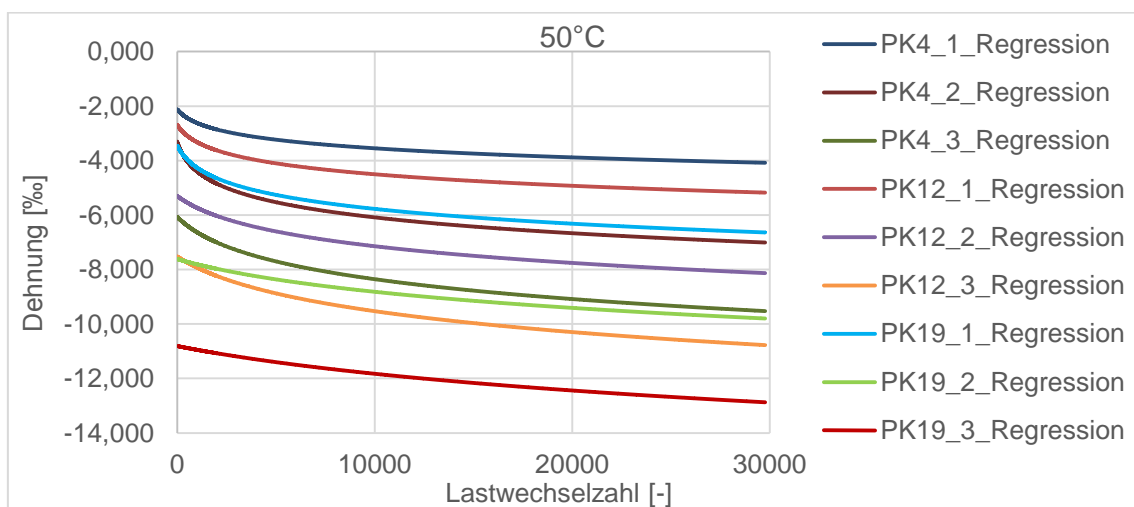
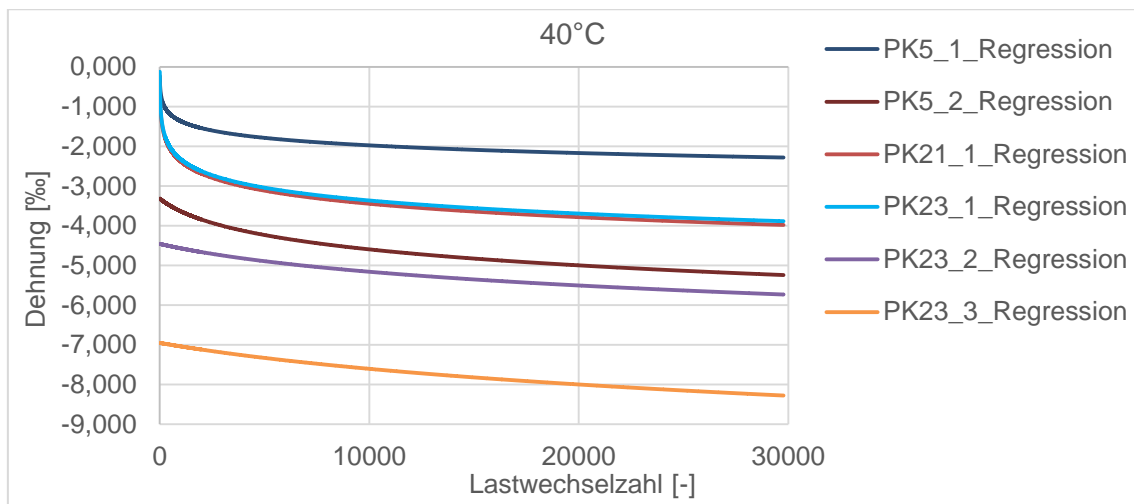
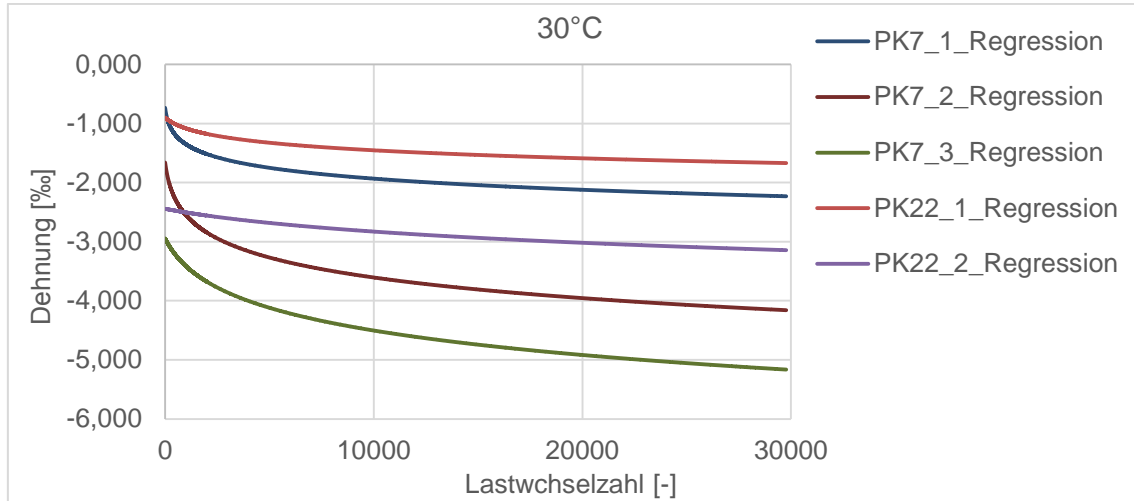
AC 16 B S SG: 5,00 M-%

**a1** -0,1244754 **b** 1,05528142  
**a2** 0,94924772 **T<sub>0</sub>** -8,9224660 **R<sup>2</sup>** 0,96581418



AC 16 B S SG: 5,68 M-%

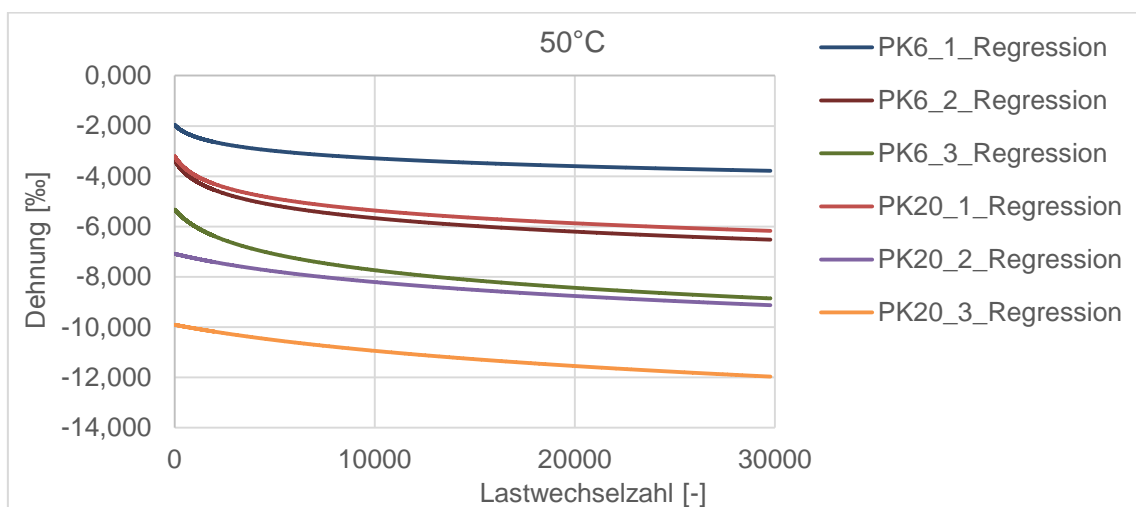
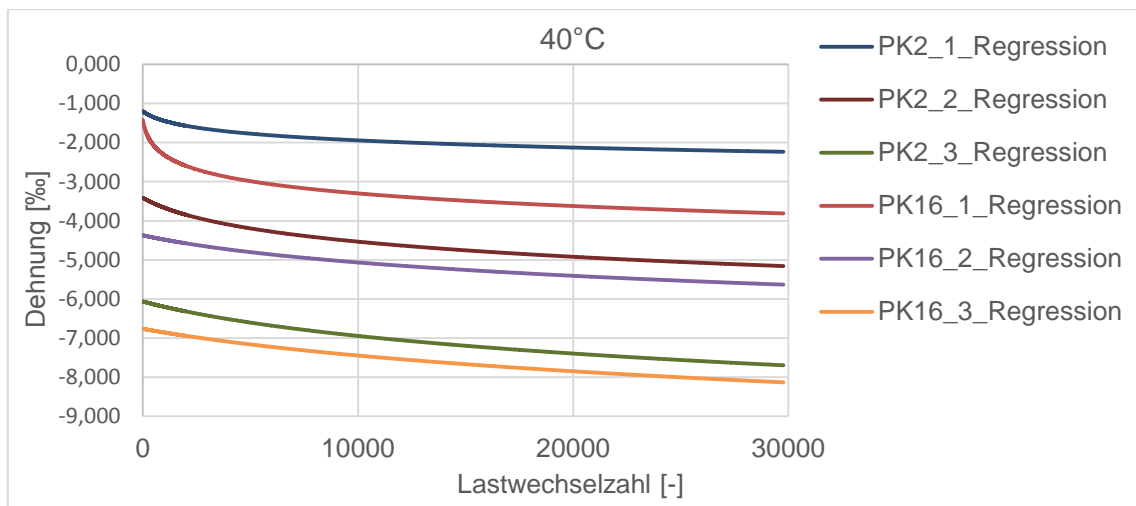
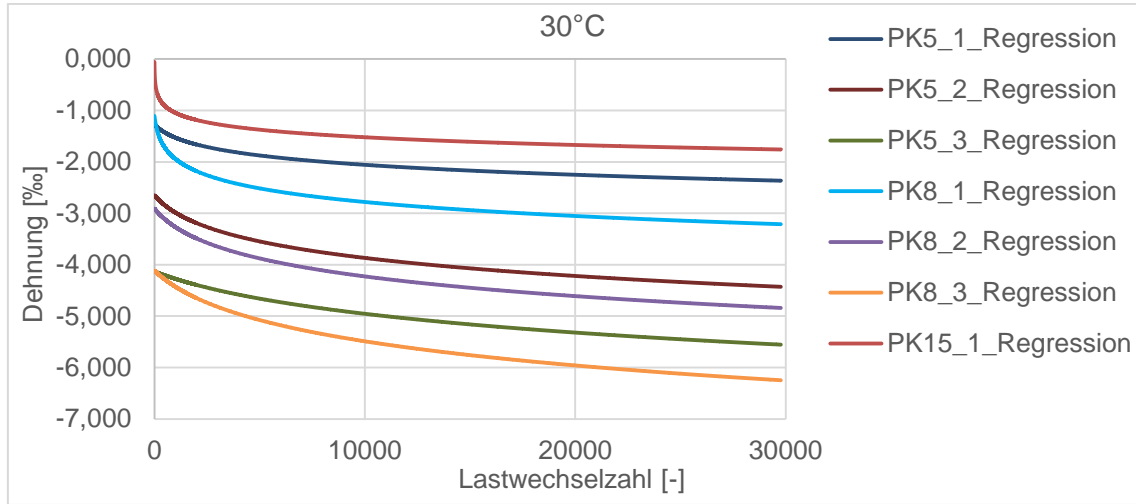
**a1** -0,0666928 **b** 1,28843783  
**a2** 0,63833092 **T<sub>0</sub>** -10,963202 **R<sup>2</sup>** 0,96782893





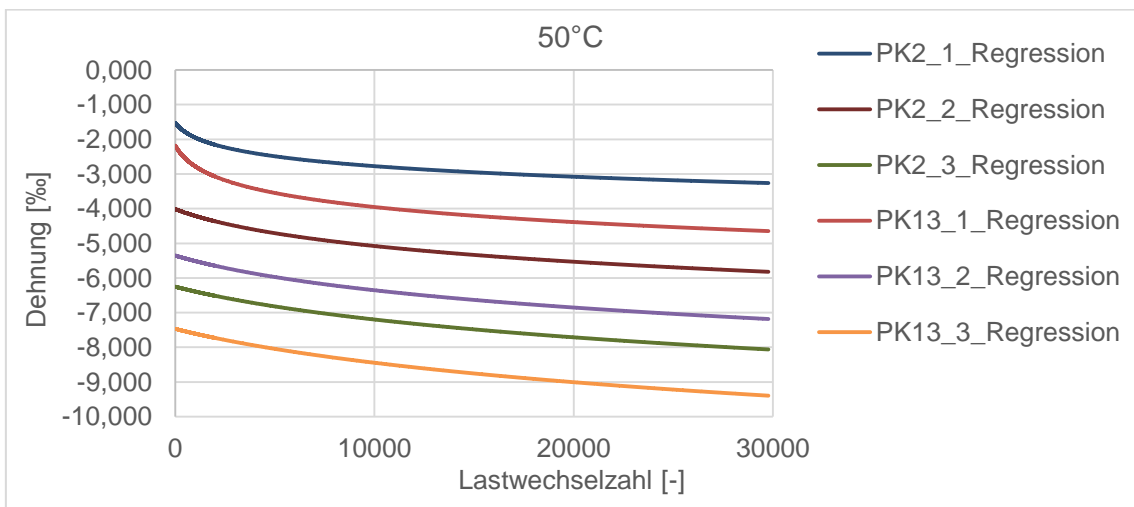
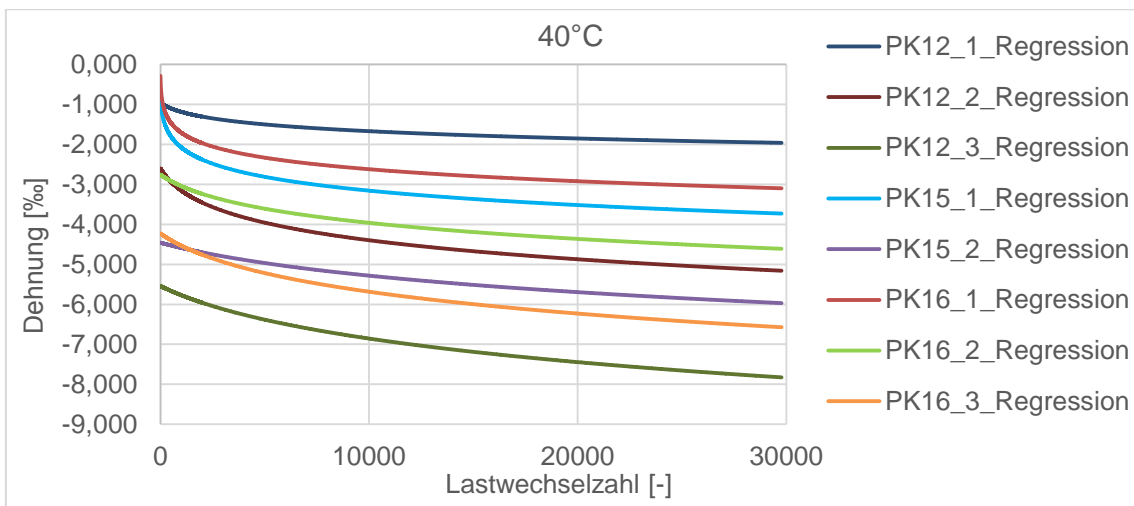
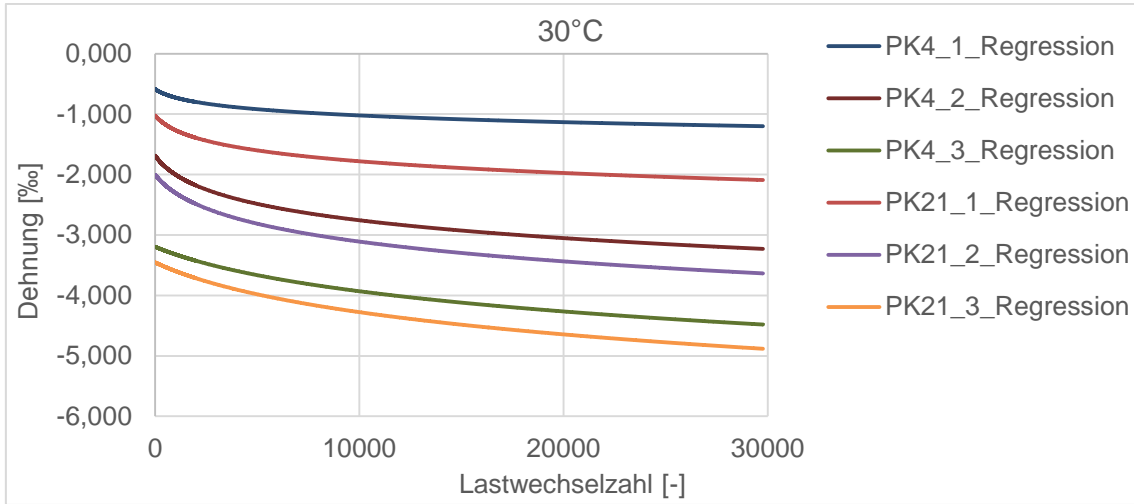
AC 16 B S SG: 5,98 M-%

**a1** -0,043793 **b** 1,29753287  
**a2** 0,6416424 **T<sub>0</sub>** -35,806308 **R<sup>2</sup>** 0,97897657



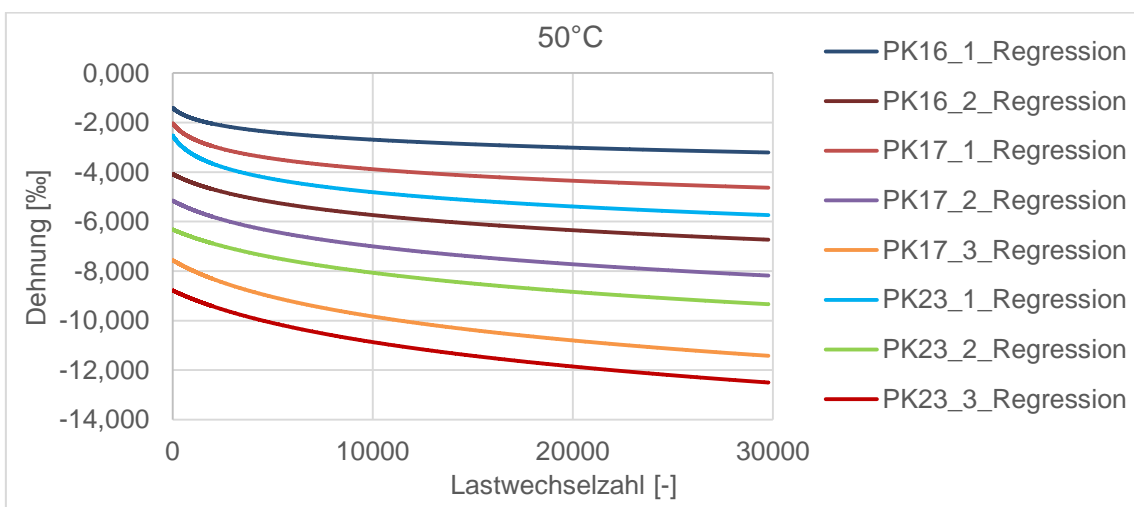
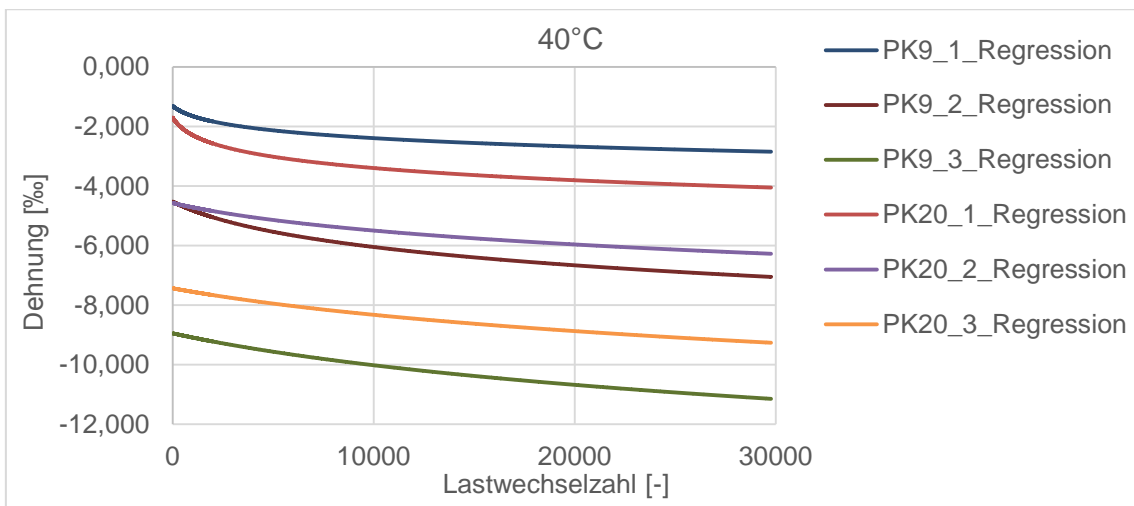
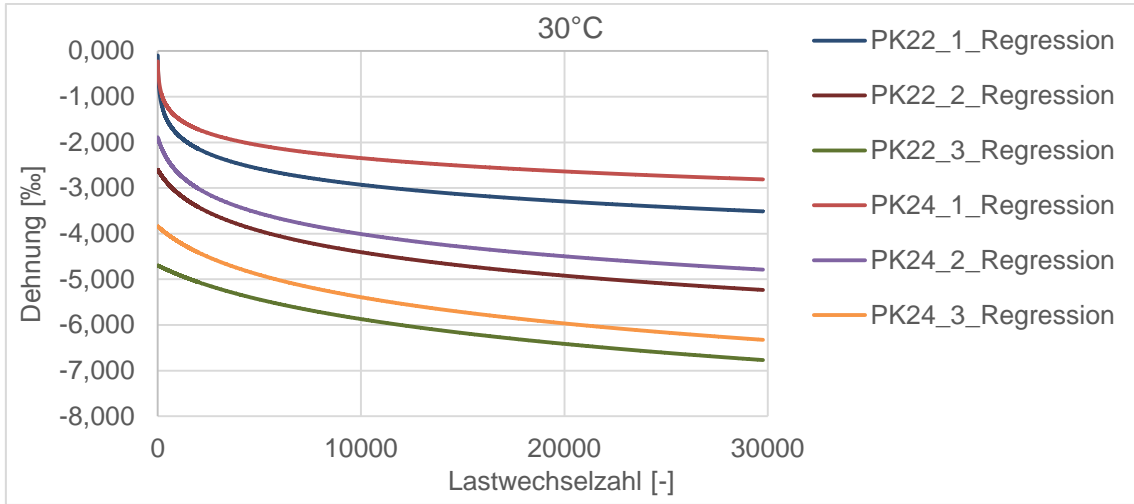
AC 16 B S SG: 6,55 M-%

**a1** -0,0418701 **b** 1,49380245  
**a2** 0,69602261 **T<sub>0</sub>** -17,917805 **R<sup>2</sup>** 0,99209992



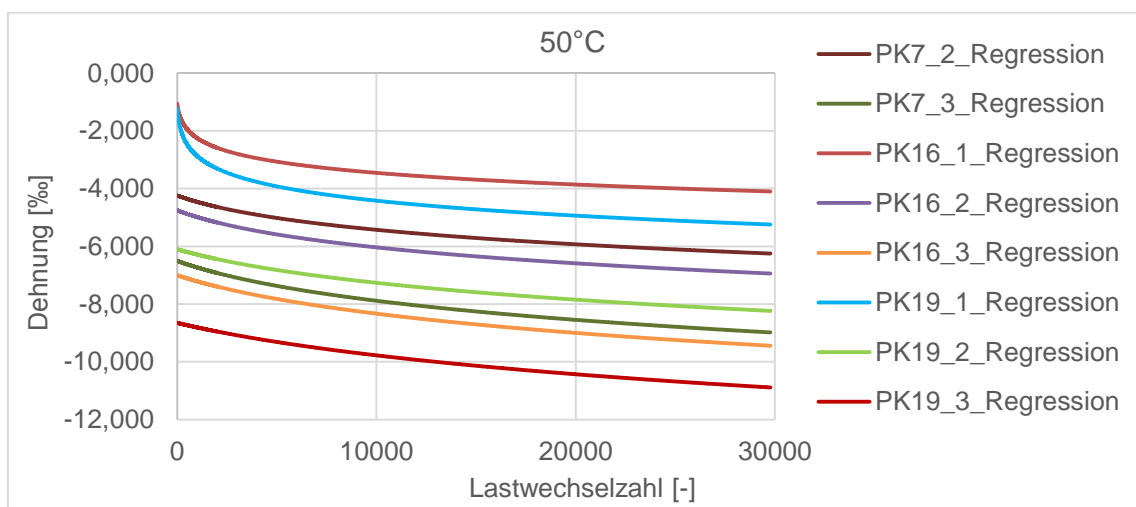
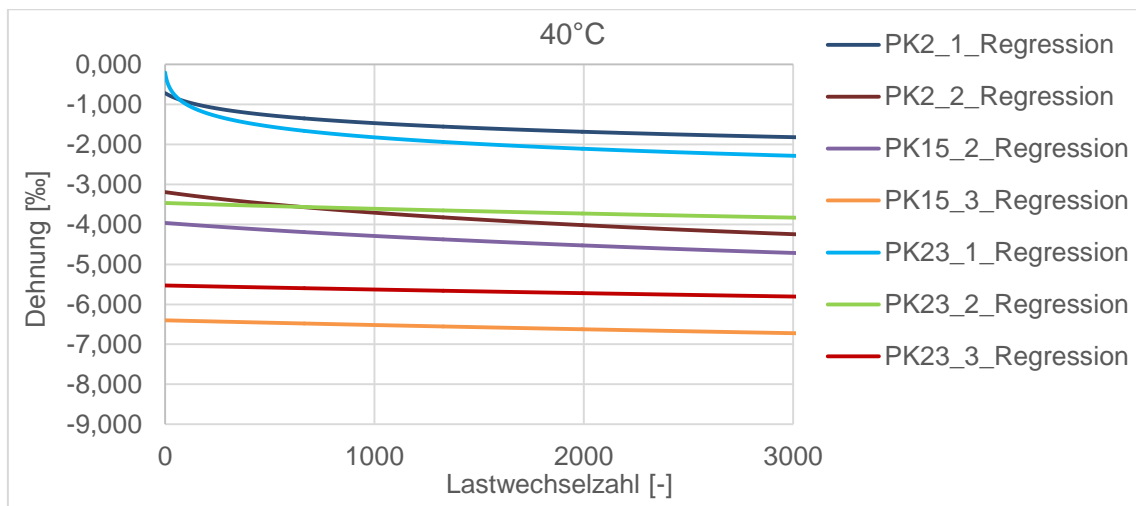
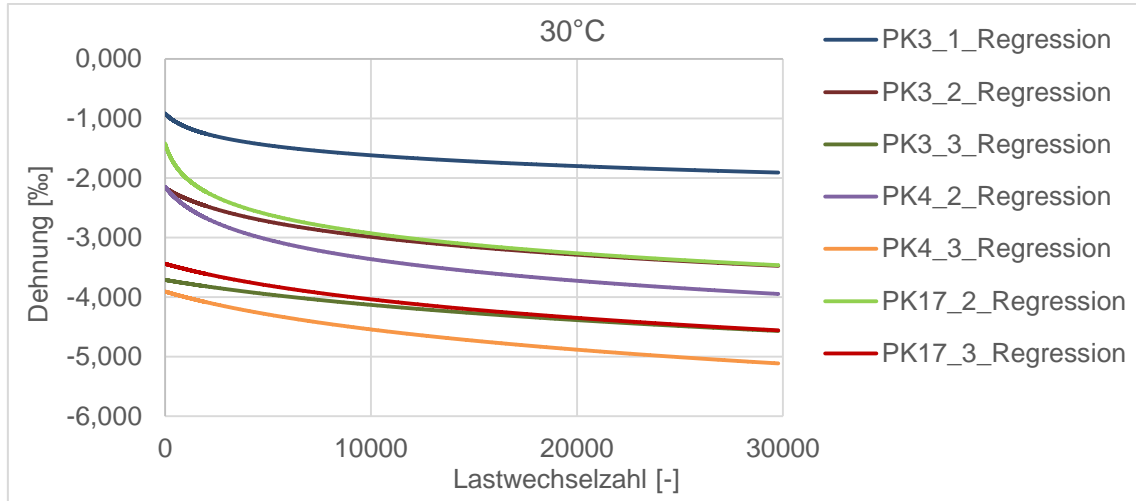
AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

**a1** -0,0379717 **b** 1,62269513  
**a2** 0,67532392 **T<sub>0</sub>** -24,683544 **R<sup>2</sup>** 0,97403418



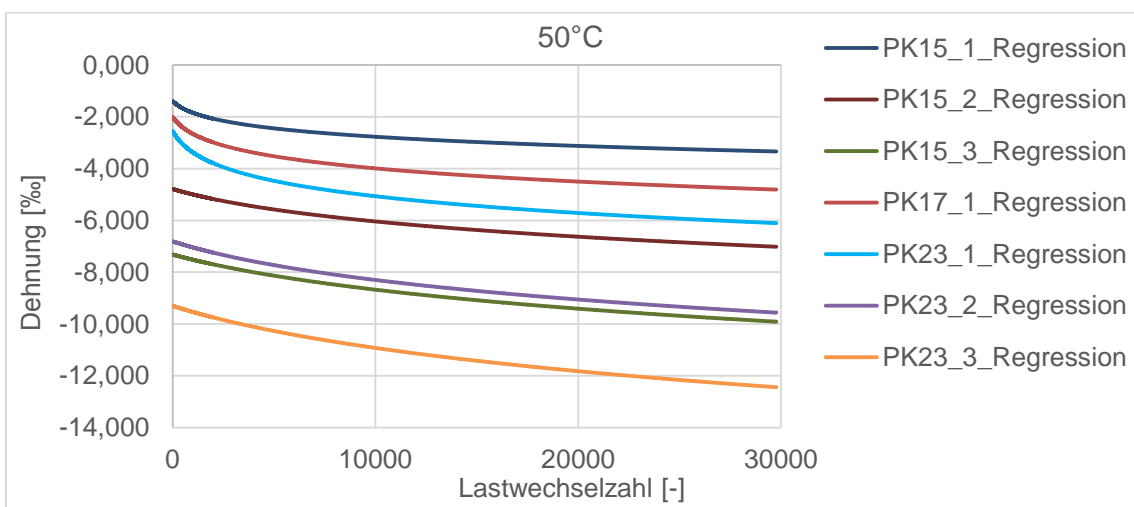
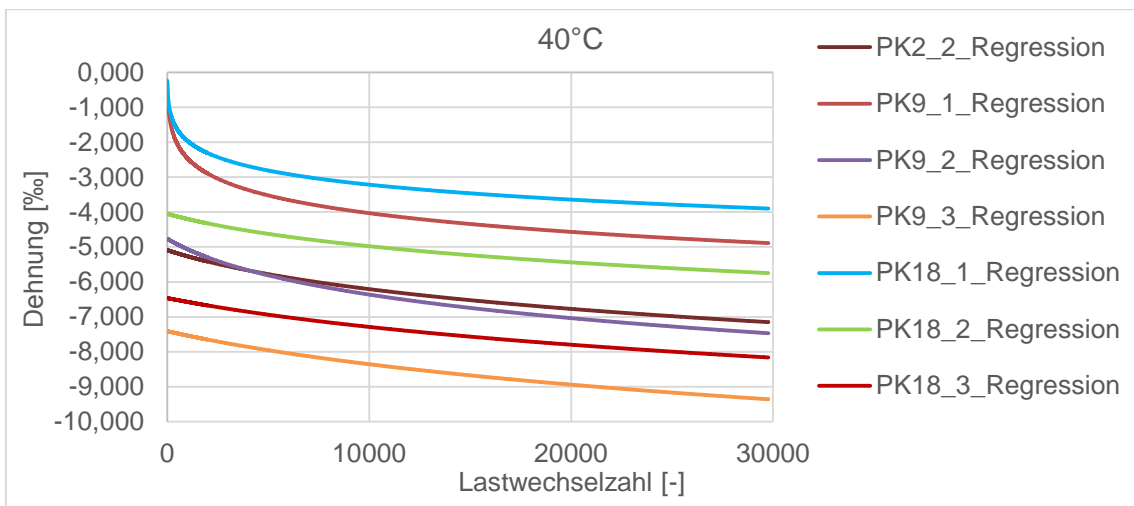
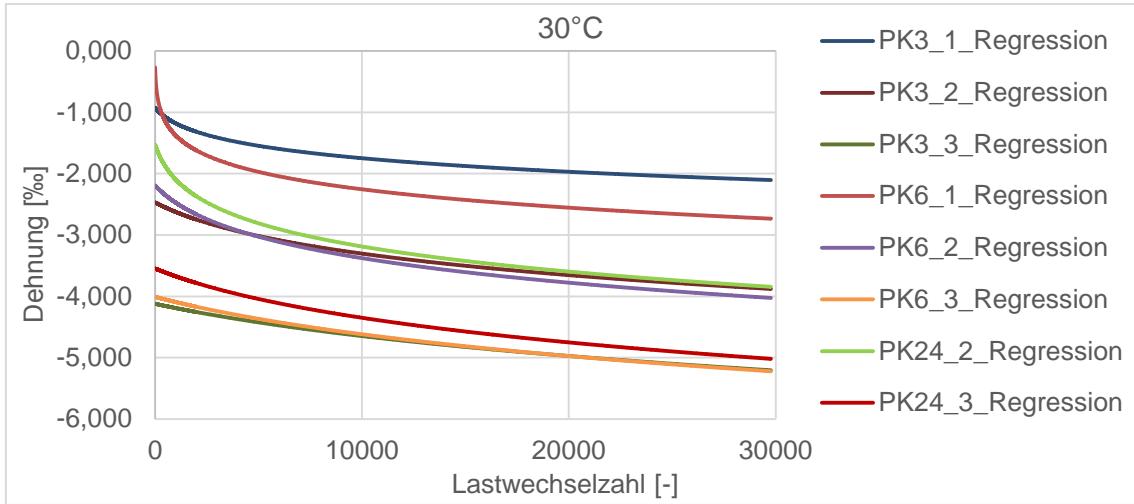
SMA 11 B S: 5,17 M-%

**a1** -0,0568499 **b** 1,53280404  
**a2** 0,62705811 **T<sub>0</sub>** 1,8552633 **R<sup>2</sup>** 0,9955173



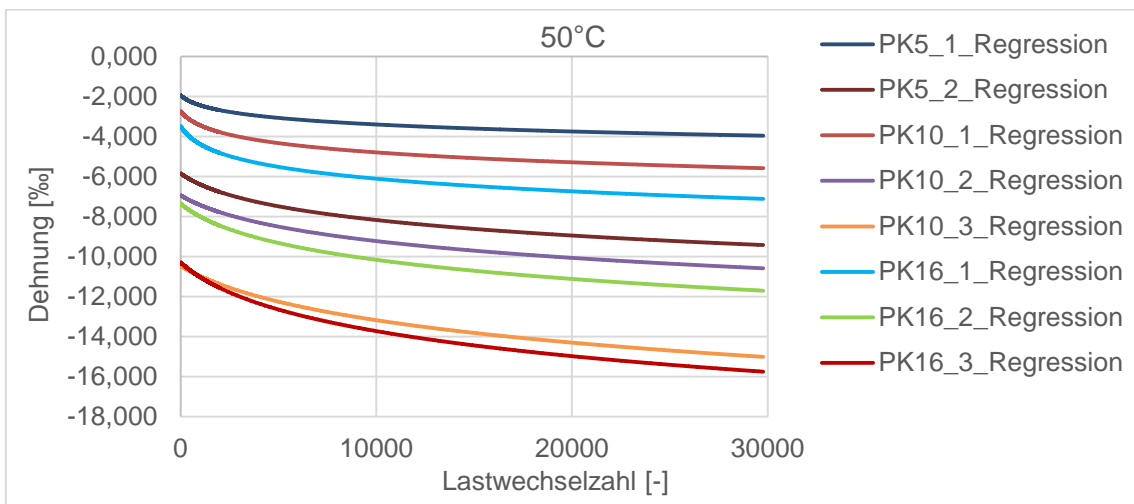
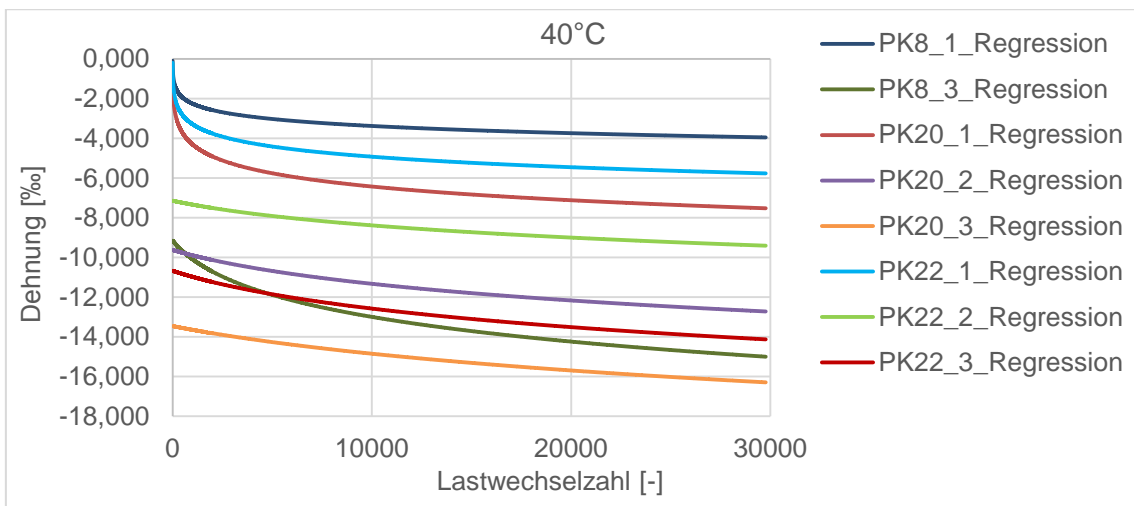
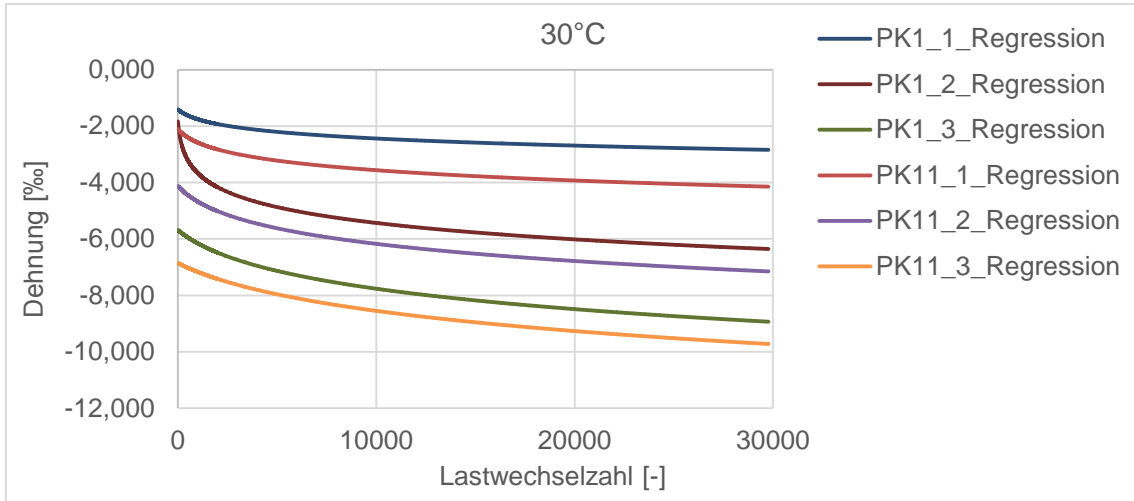
SMA 11 B S: 5,47 M-%

**a1** -0,0487477 **b** 1,72258234  
**a2** 0,60765498 **T<sub>0</sub>** 4,98431905 **R<sup>2</sup>** 0,98757276



SMA 11 B S: 6,03 M-%

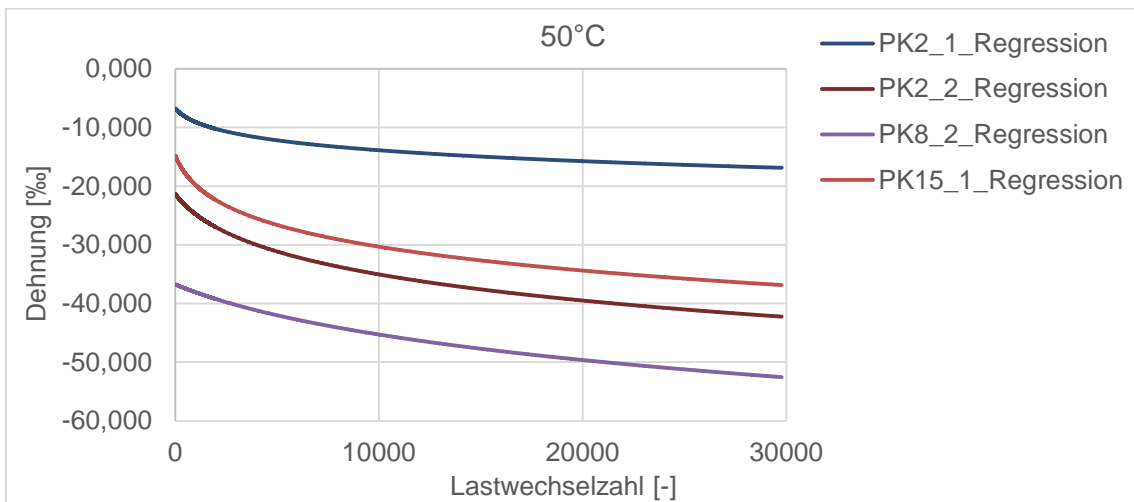
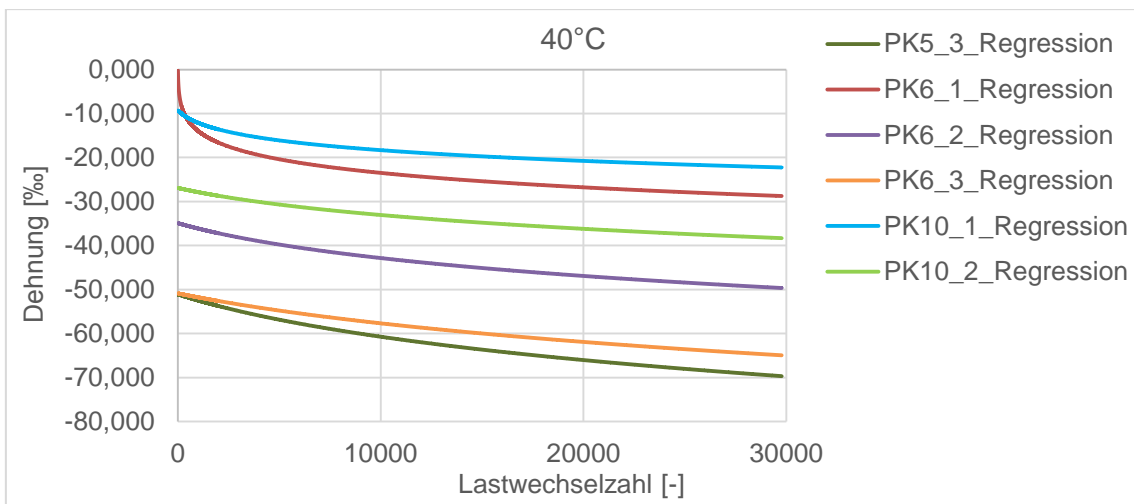
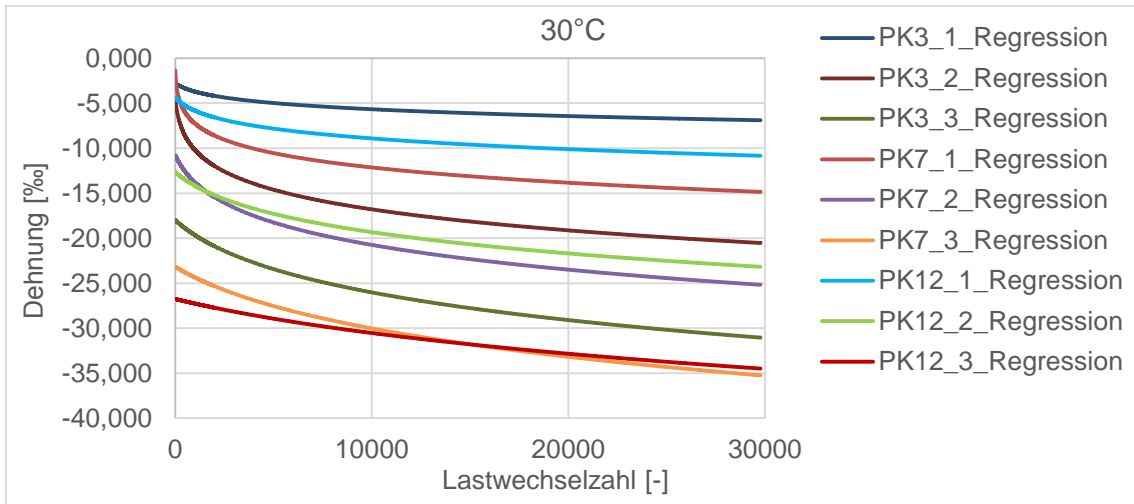
**a1** -0,0339579 **b** 1,40944704  
**a2** 0,70100884 **T<sub>0</sub>** -91,703786 **R<sup>2</sup>** 0,98508133



*Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper*

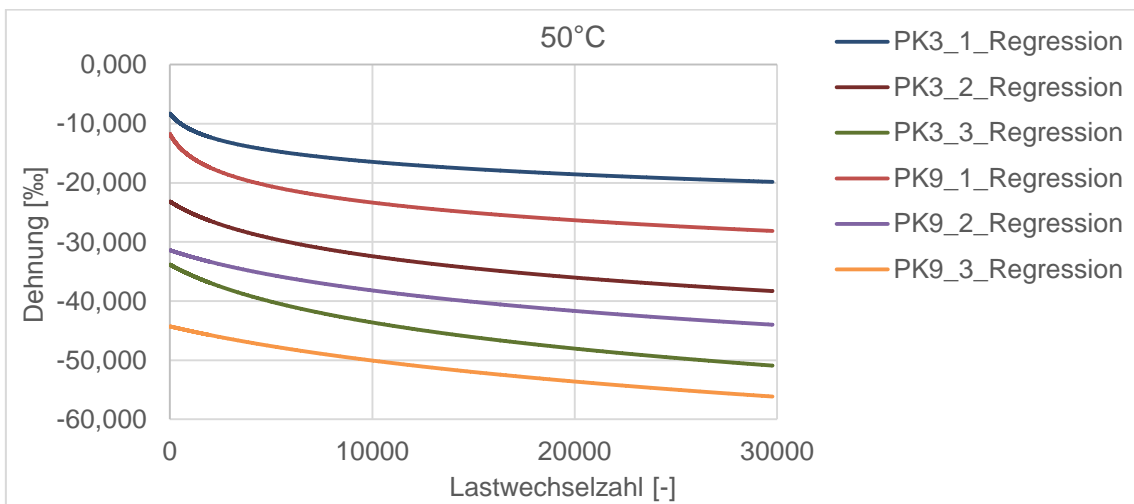
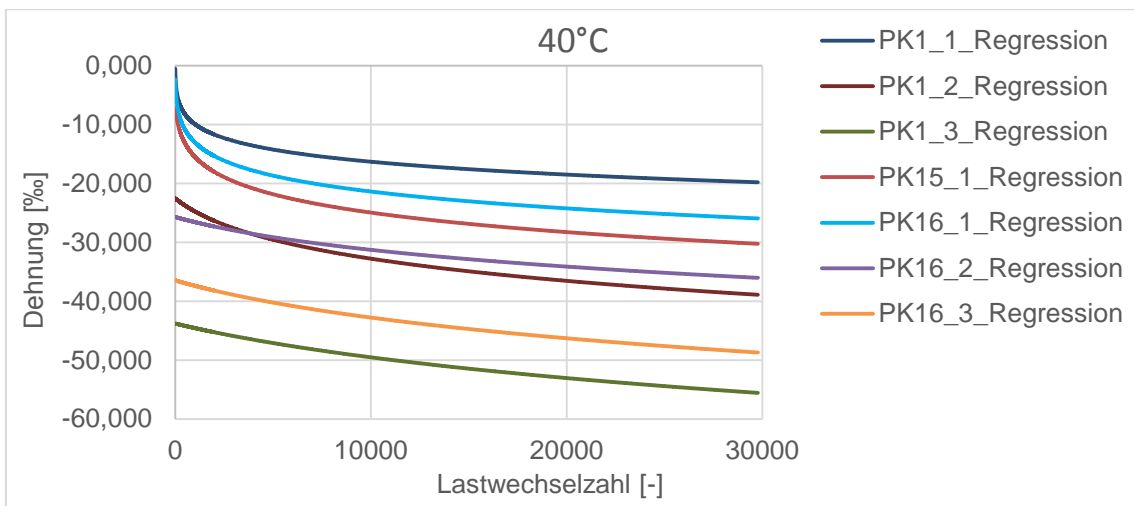
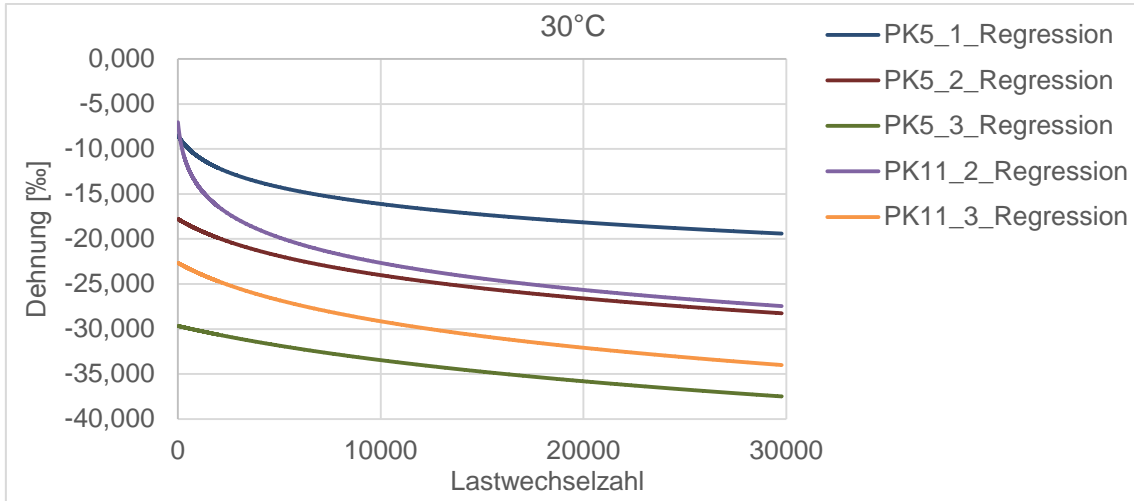
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,03 M-%

**a1** -0,1525935 **b** 1,8030236  
**a2** 0,80577651 **T<sub>0</sub>** -31,23339 **R<sup>2</sup>** 0,98835846



SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,50 M-%

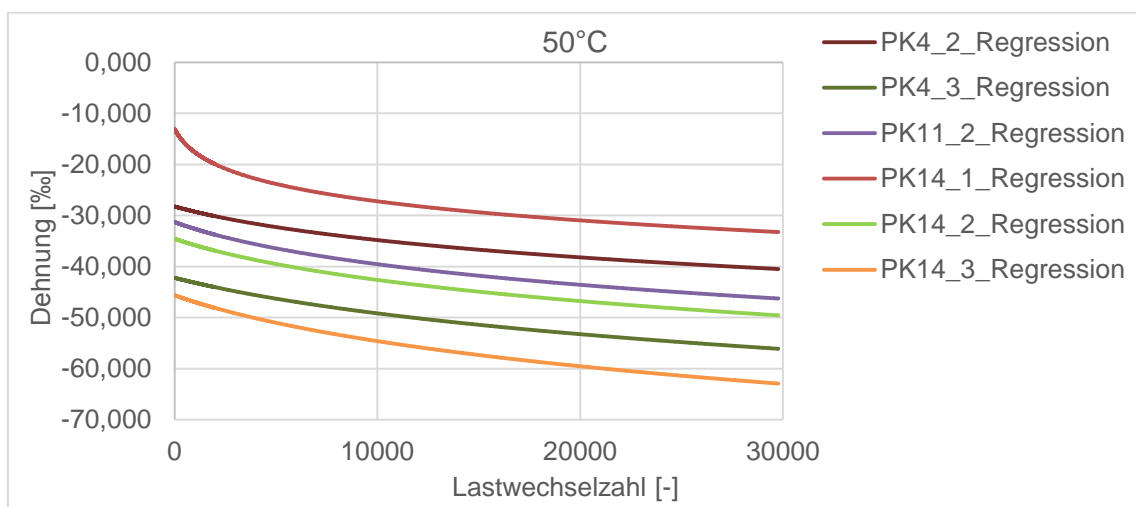
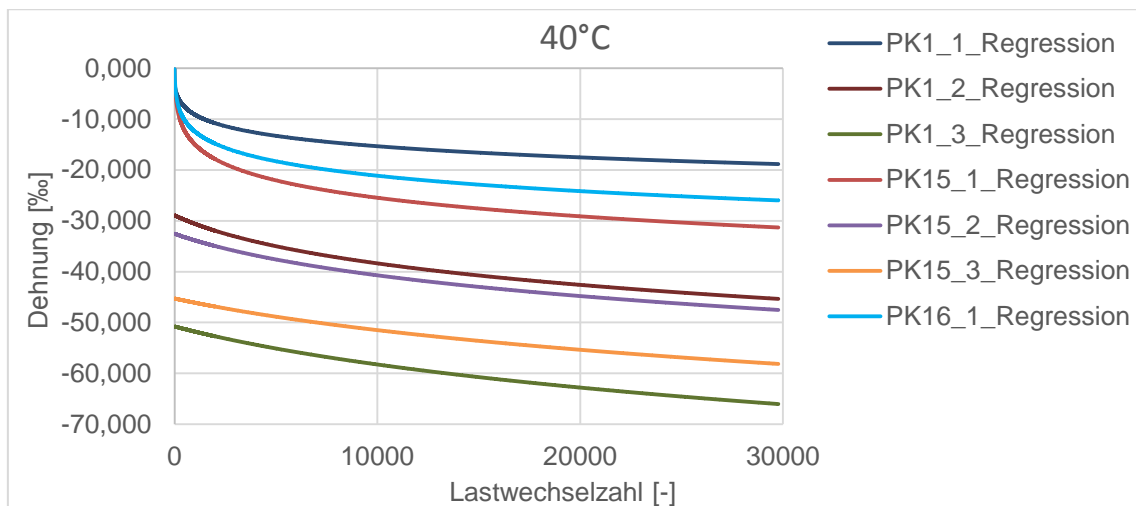
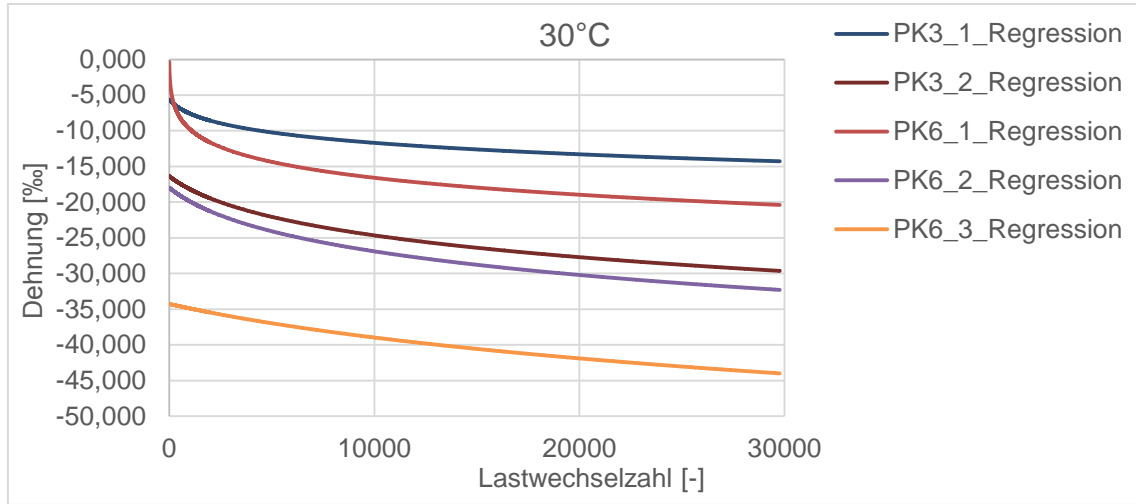
**a1** -0,0735411 **b** 1,72818017  
**a2** 0,54858047 **T<sub>0</sub>** -56,670912 **R<sup>2</sup>** 0,97785784





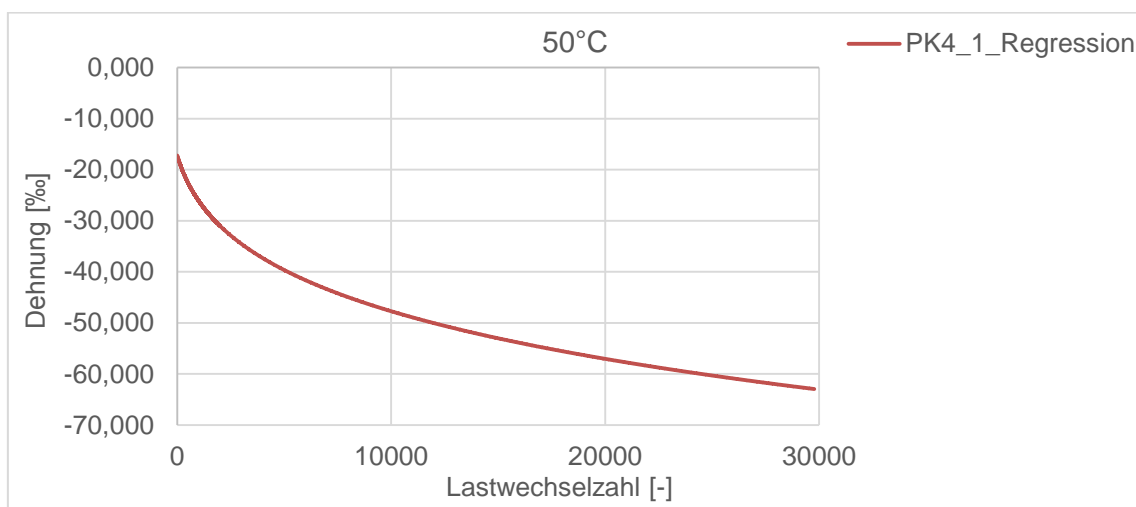
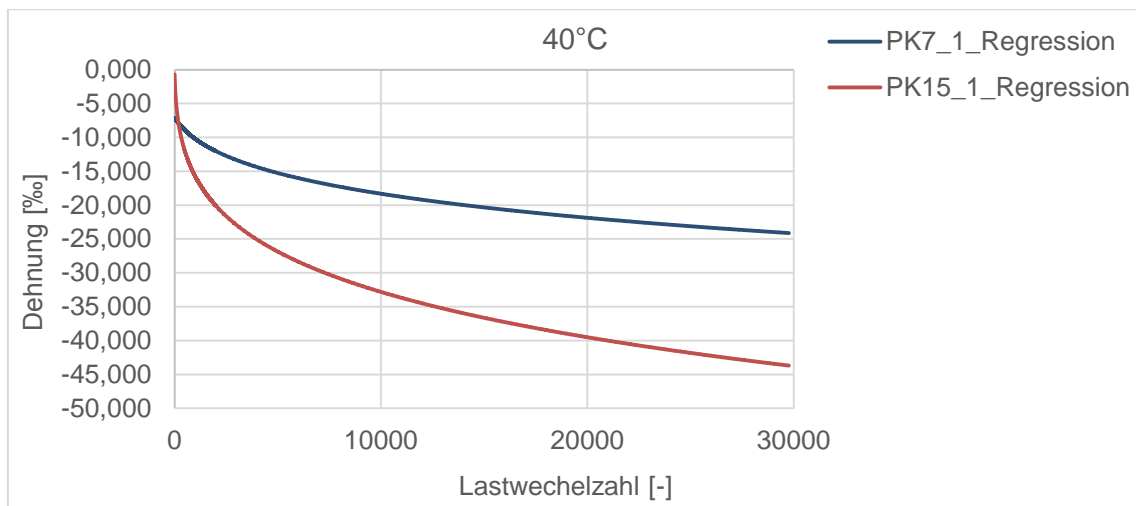
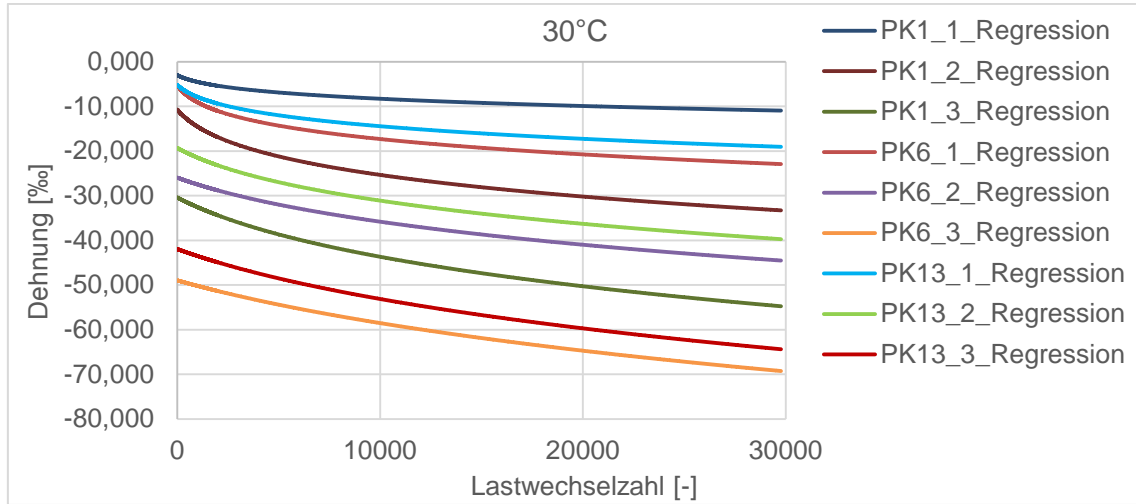
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,79 M-%

**a1** -0,0226120 **b** 1,84322587  
**a2** 0,63388463 **T<sub>0</sub>** -273 **R<sup>2</sup>** 0,98364194



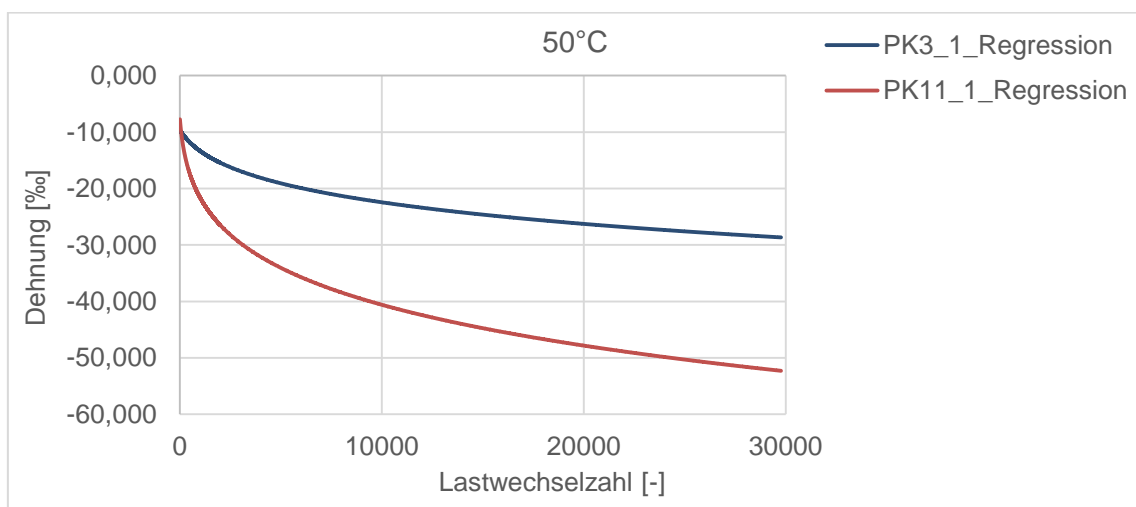
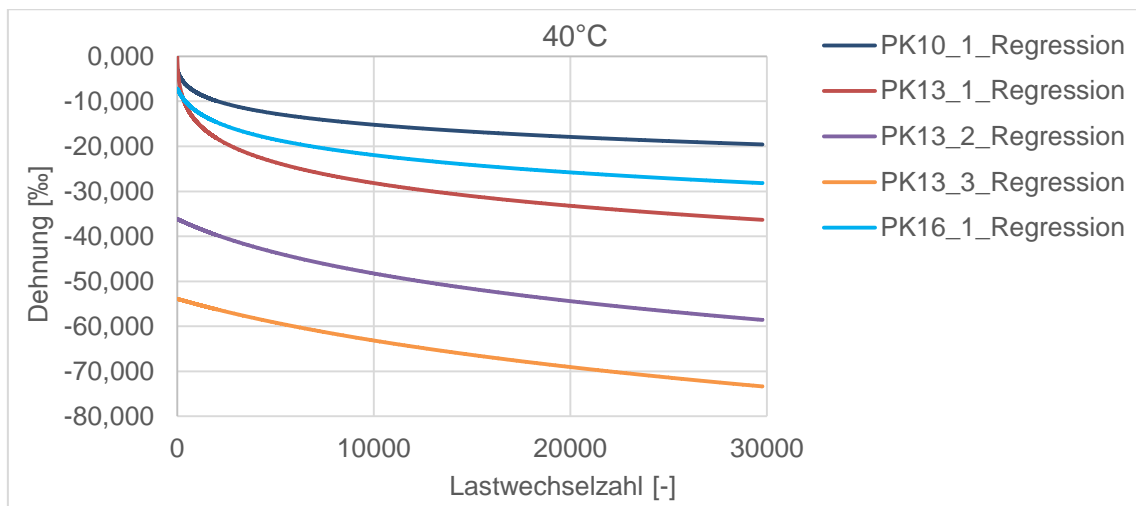
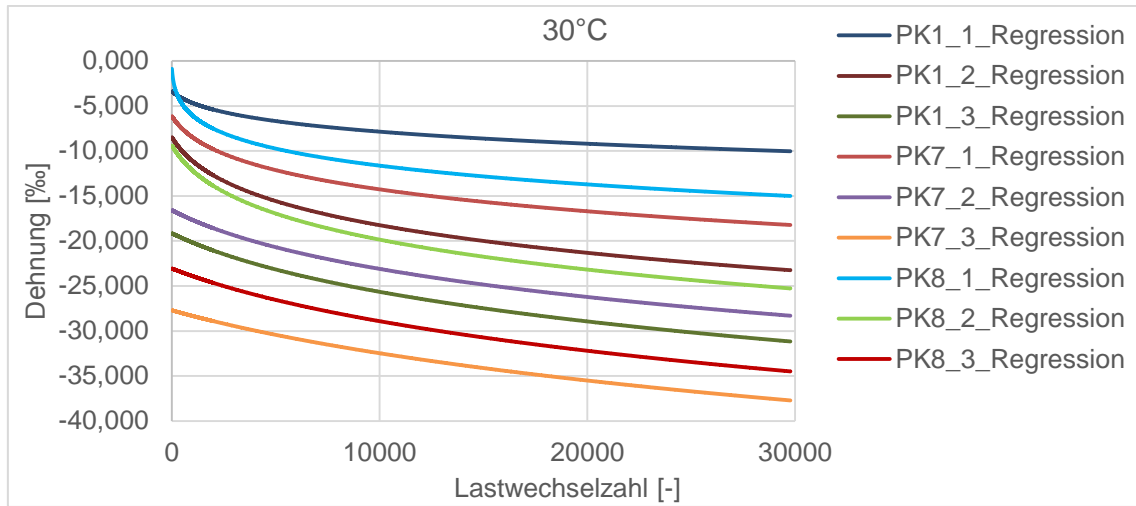
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 7,52 M-%

**a1** -0,3395501 **b** 2,55908213  
**a2** 0,97625689 **T<sub>0</sub>** 13,3470927 **R<sup>2</sup>** 0,98981606



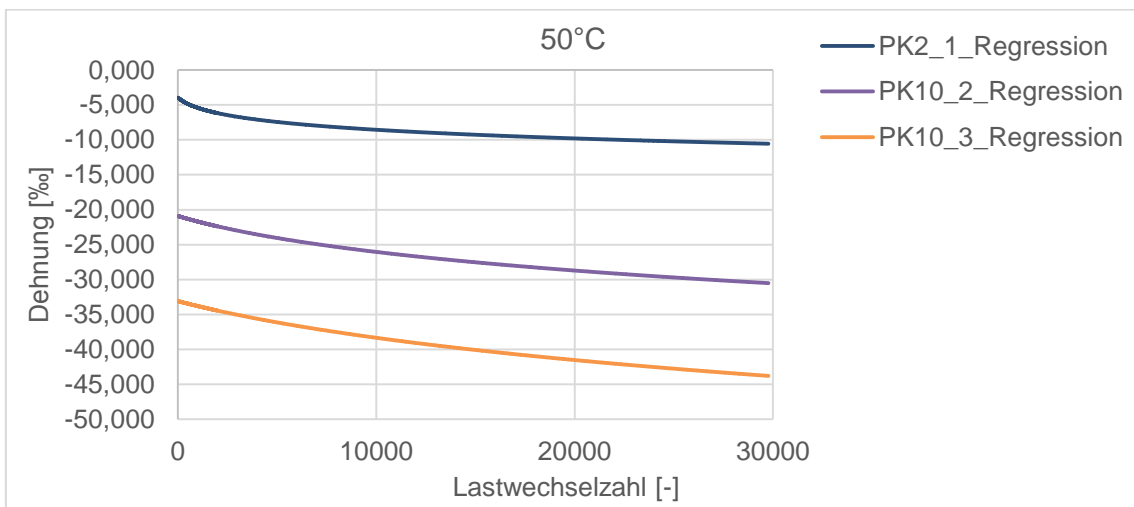
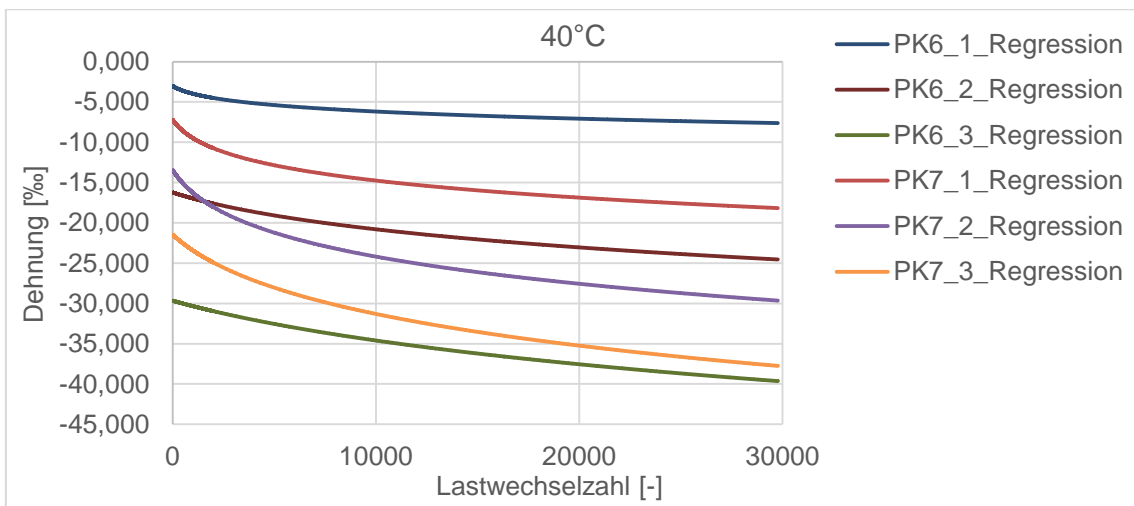
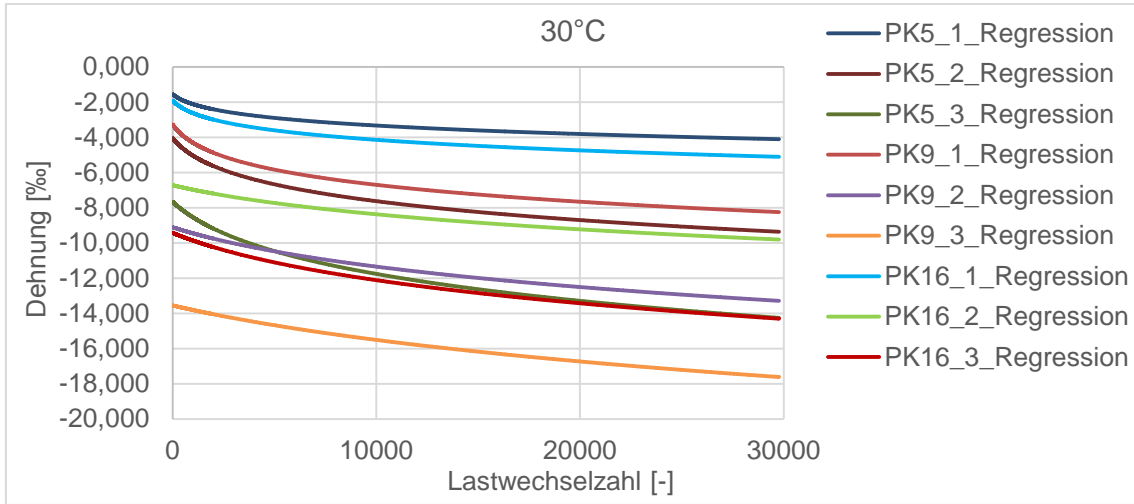
SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A; 7,52 M-%

**a1** -0,162816 **b** 2,27499065  
**a2** 0,6729553 **T<sub>0</sub>** 6,57873527 **R<sup>2</sup>** 0,97985873



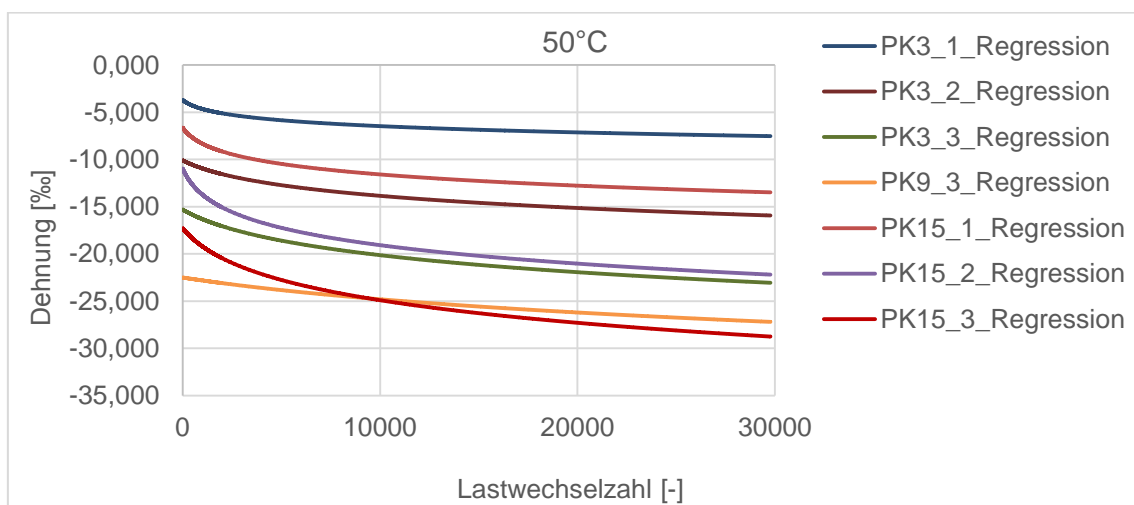
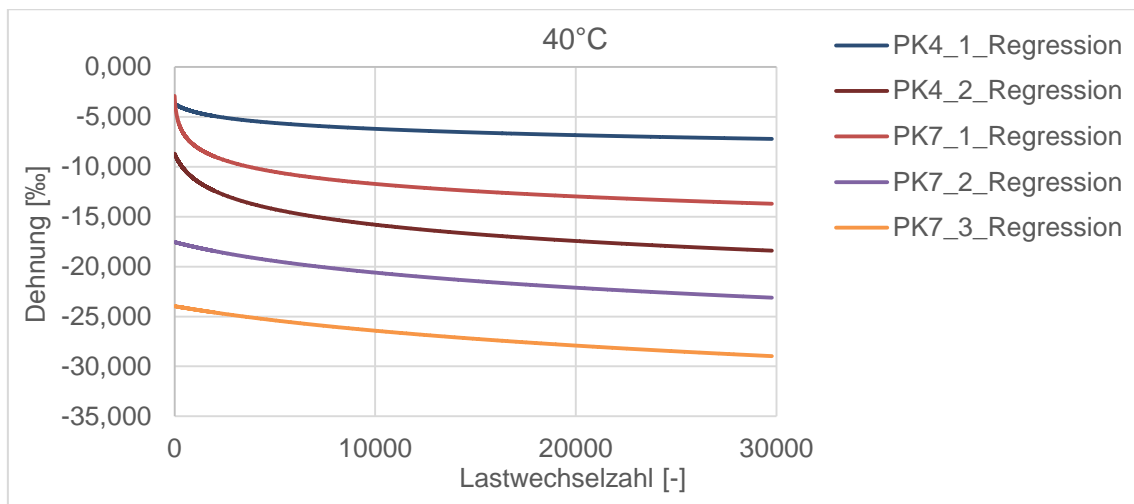
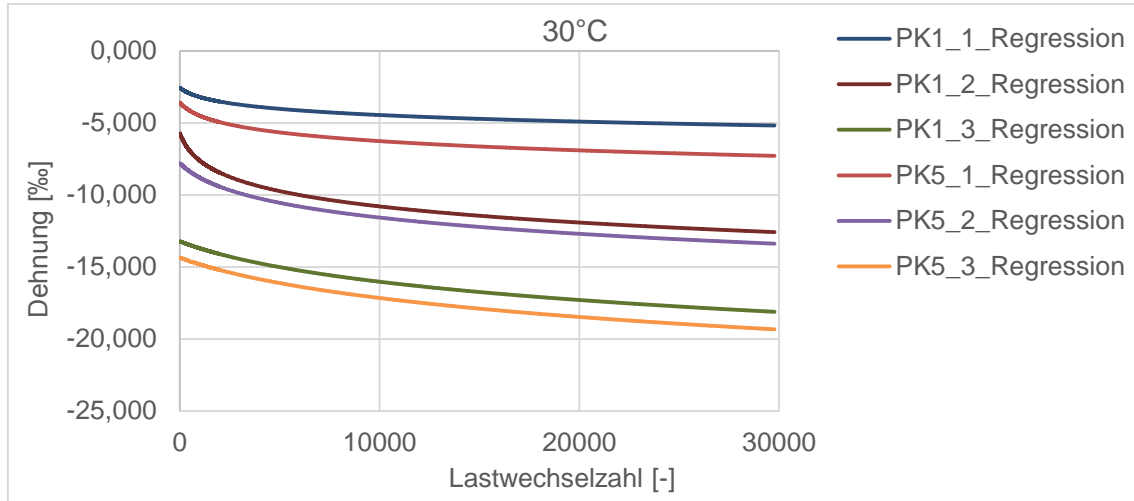
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

**a1** -0,1023494 **b** 1,93511468  
**a2** 0,74771948 **T<sub>0</sub>** 7,76013799 **R<sup>2</sup>** 0,96210314



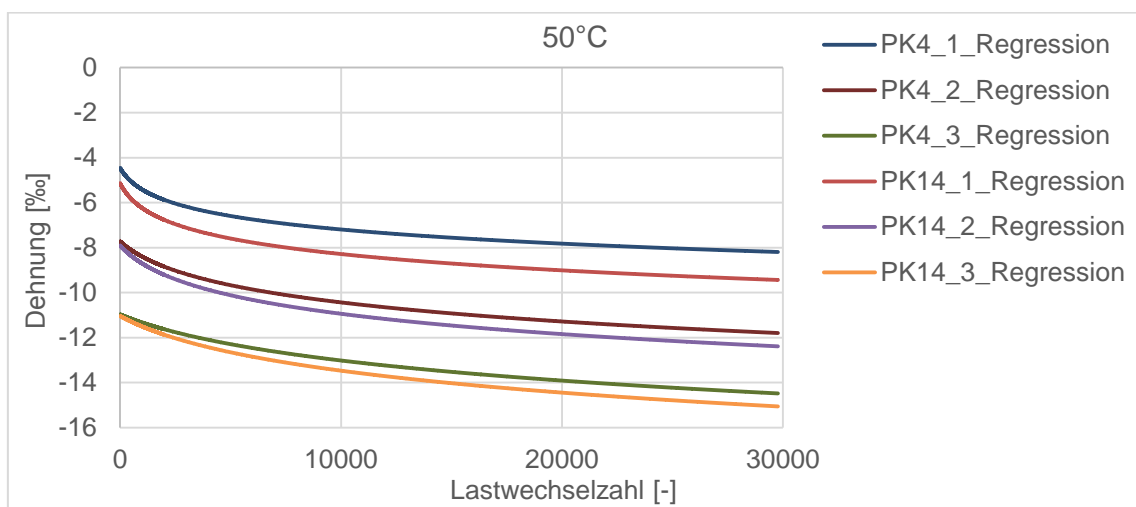
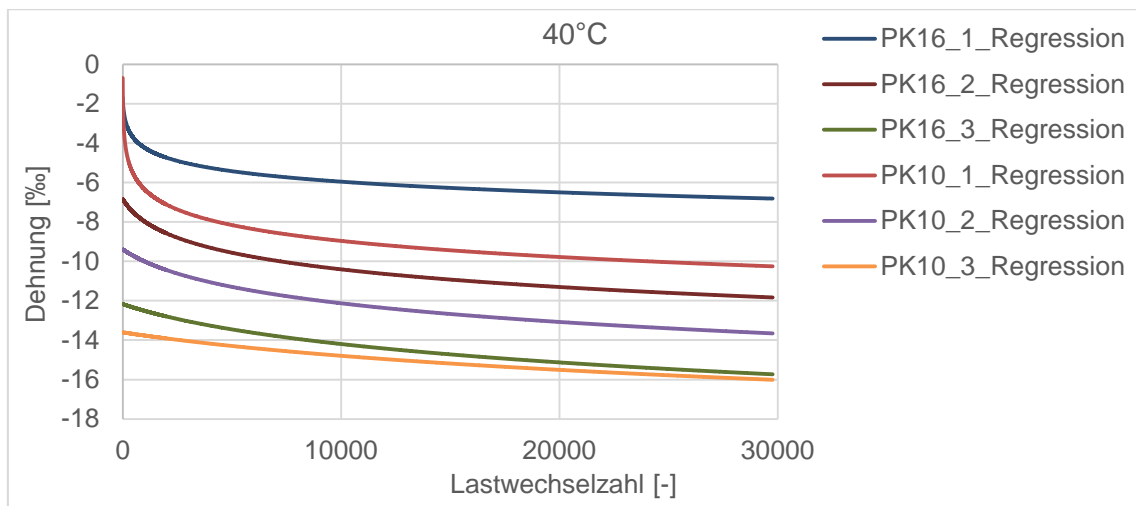
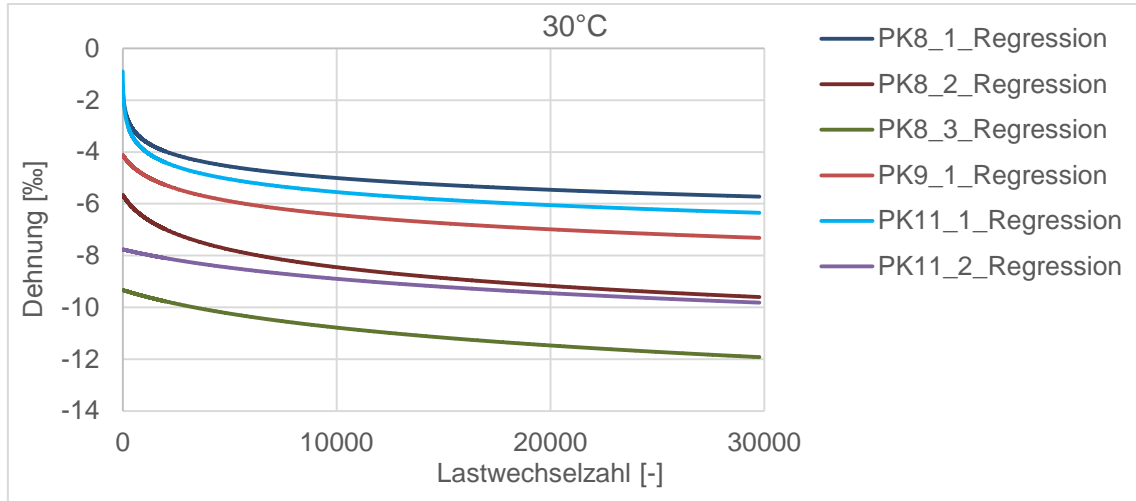
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

**a1** -0,0209819 **b** 1,39880143  
**a2** 0,70402184 **T<sub>0</sub>** -273 **R<sup>2</sup>** 0,96142695



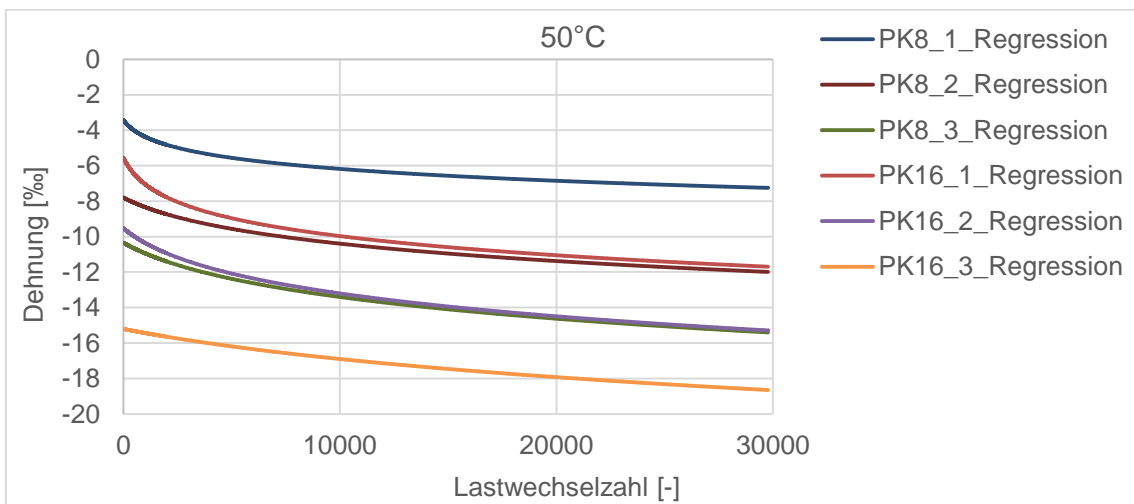
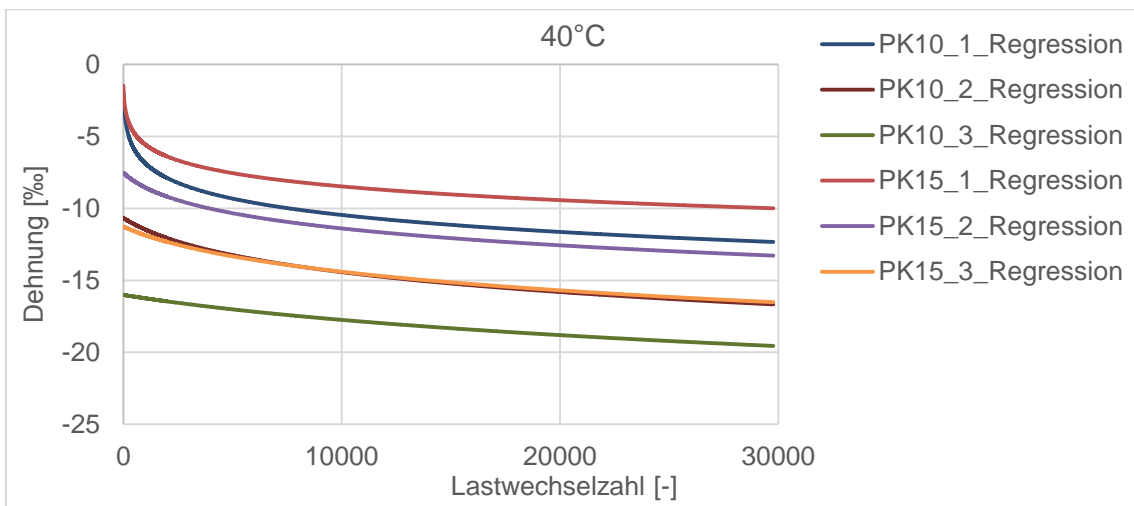
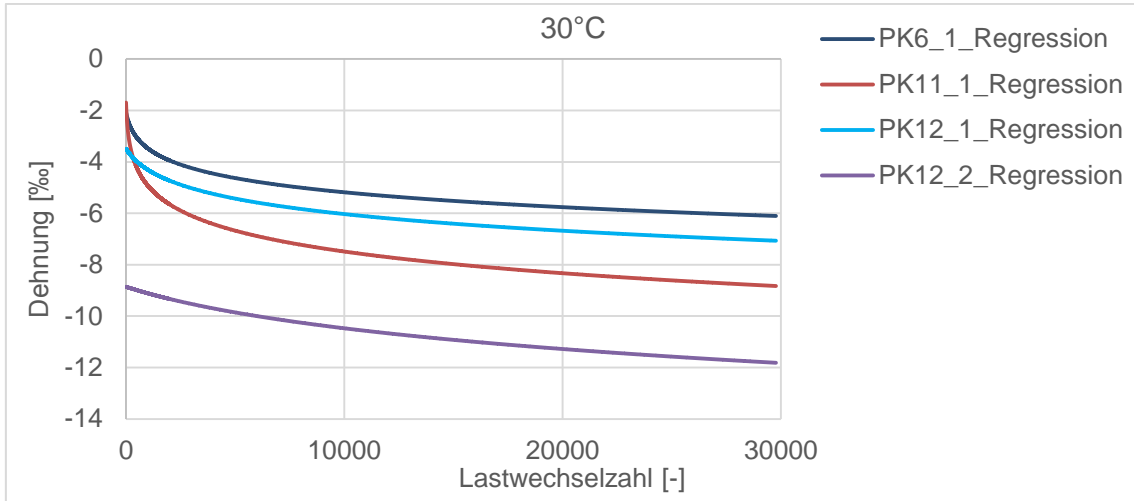
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

**a1** -0,0122220 **b** 1,20220615  
**a2** 0,45341591 **T<sub>0</sub>** -273 **R<sup>2</sup>** 0,92347937



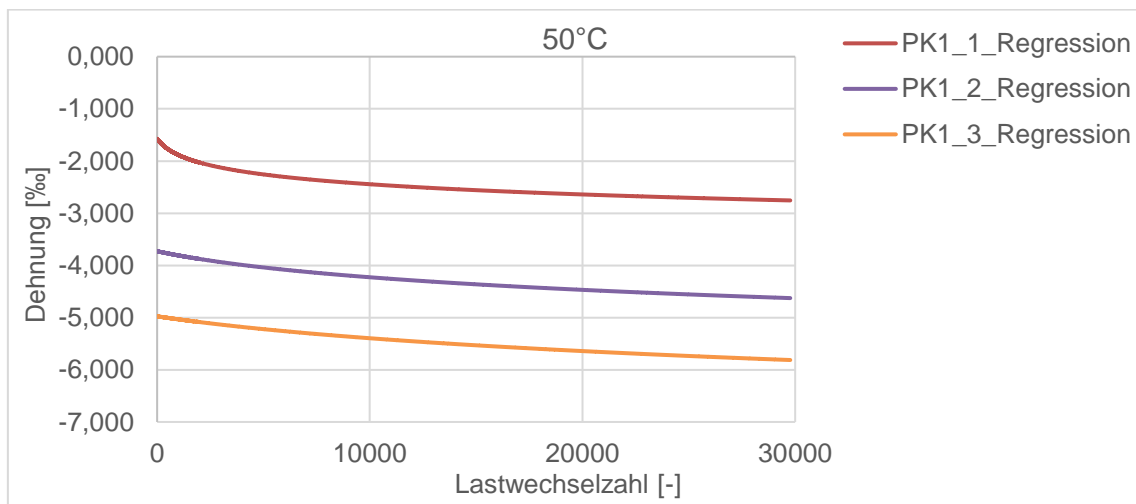
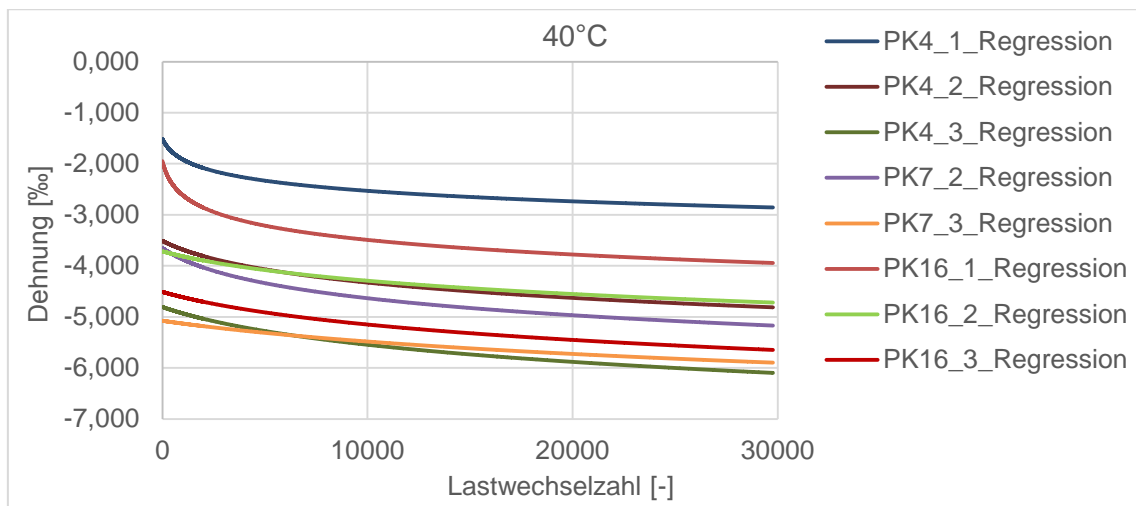
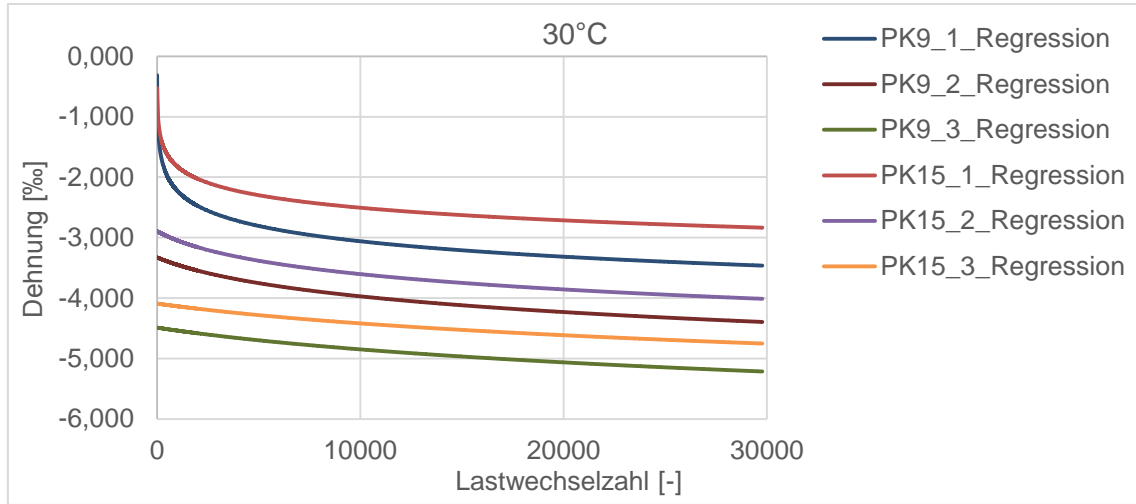
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

**a1** -0,0091485 **b** 1,47419462  
**a2** 0,45260878 **T<sub>0</sub>** -273 **R<sup>2</sup>** 0,91506112



AC 16 B S SG: 4,75 M-%

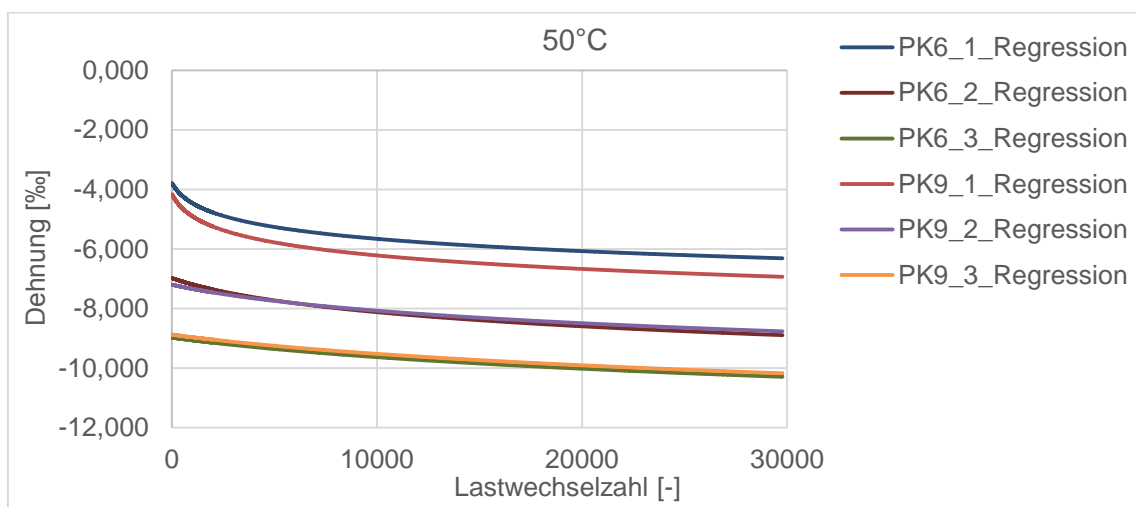
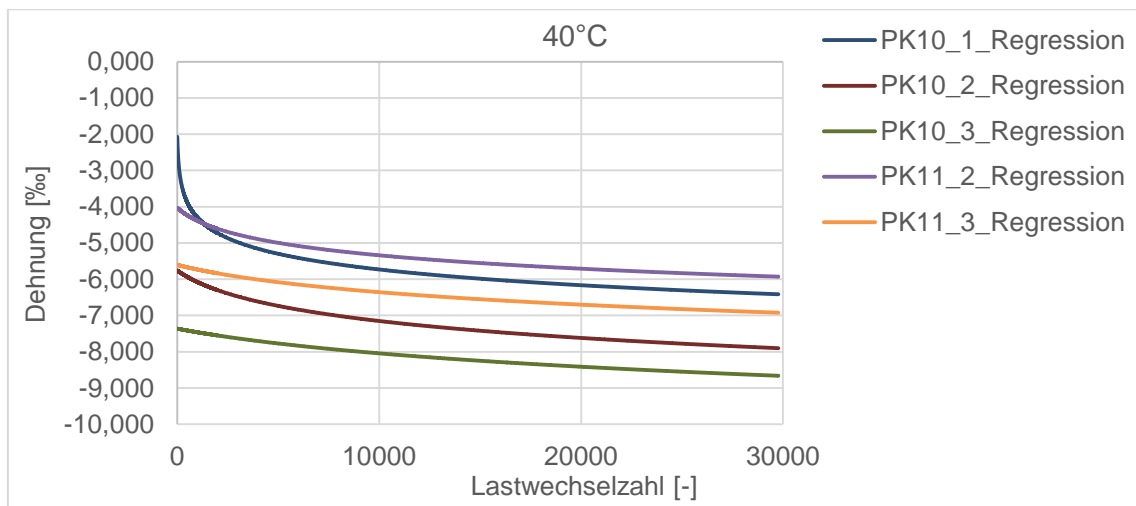
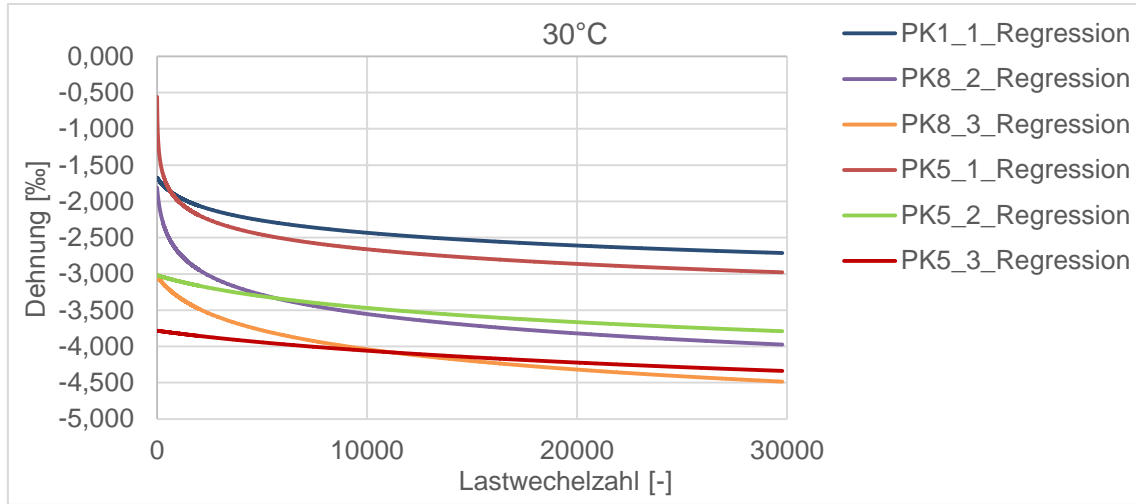
**a1** -0,0273930 **b** 1,10447642  
**a2** 0,46510745 **T<sub>0</sub>** -53,669046 **R<sup>2</sup>** 0,97318382





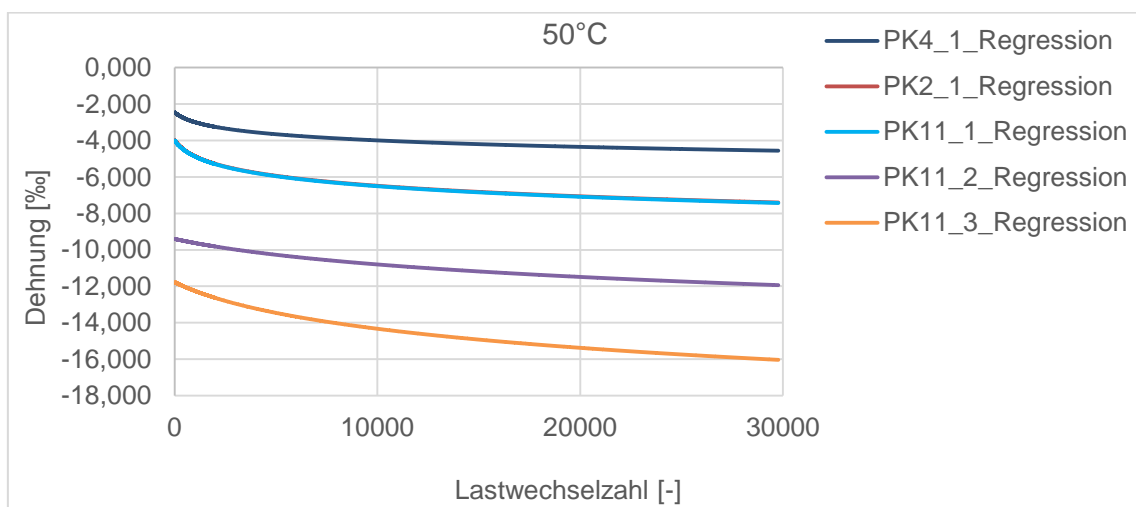
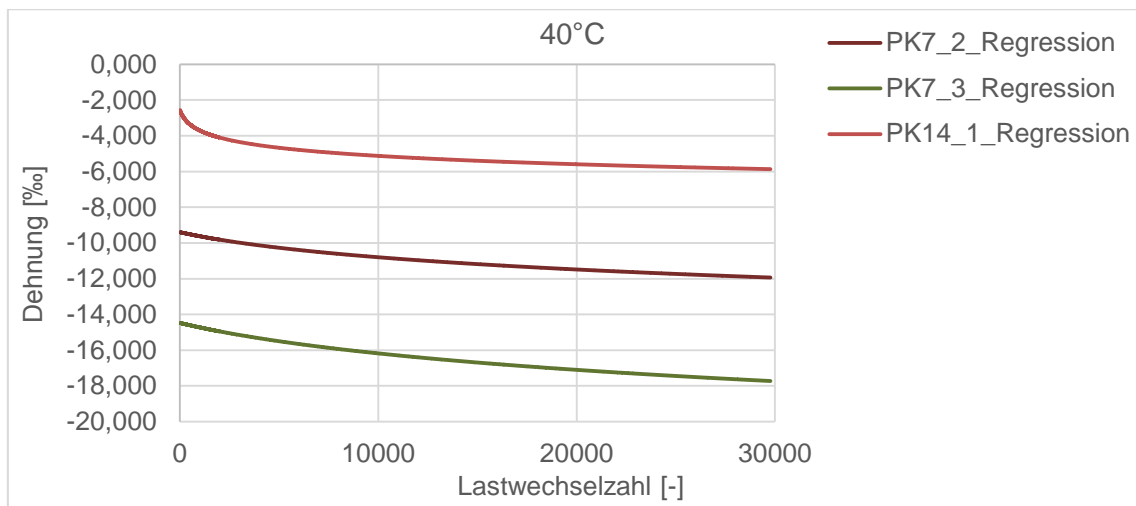
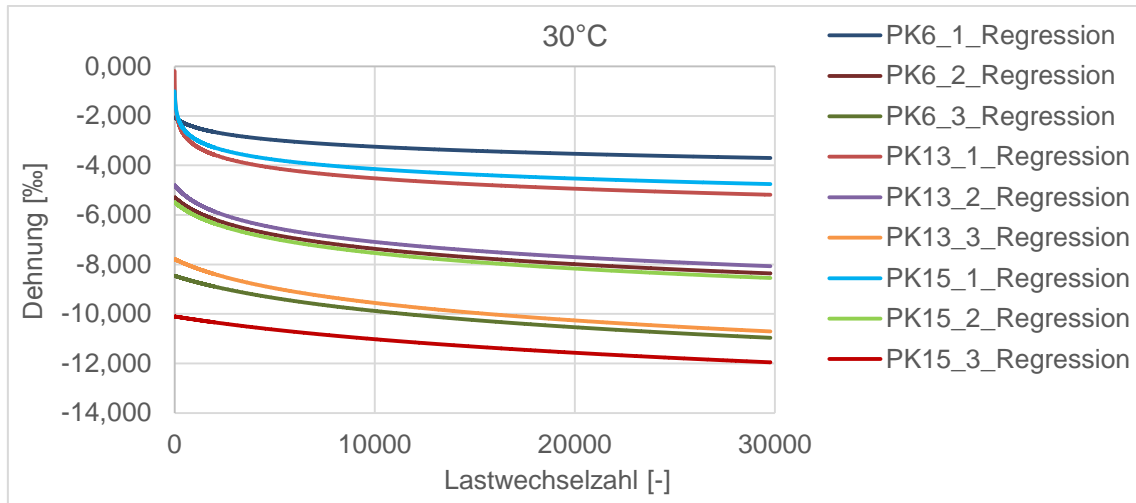
AC 16 B S SG: 5,00 M-%

**a1** -0,1180836 **b** 1,00791643  
**a2** 0,37753038 **T<sub>0</sub>** 13,2459809 **R<sup>2</sup>** 0,97745857



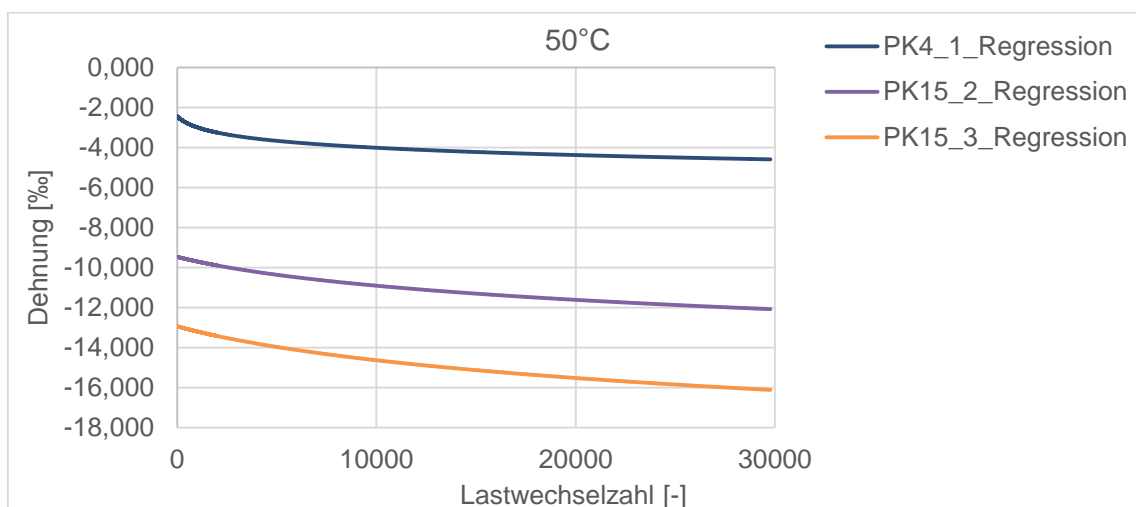
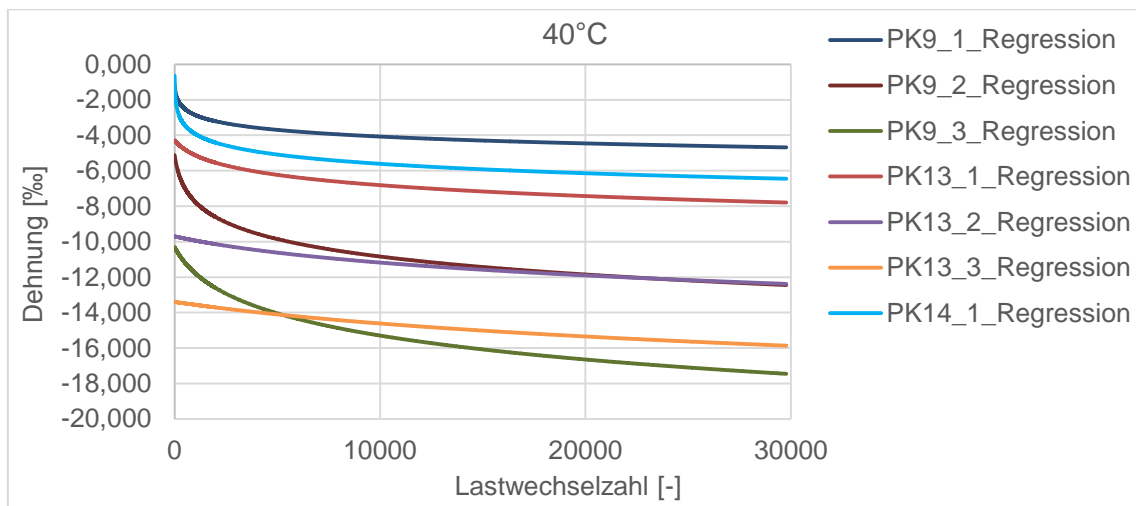
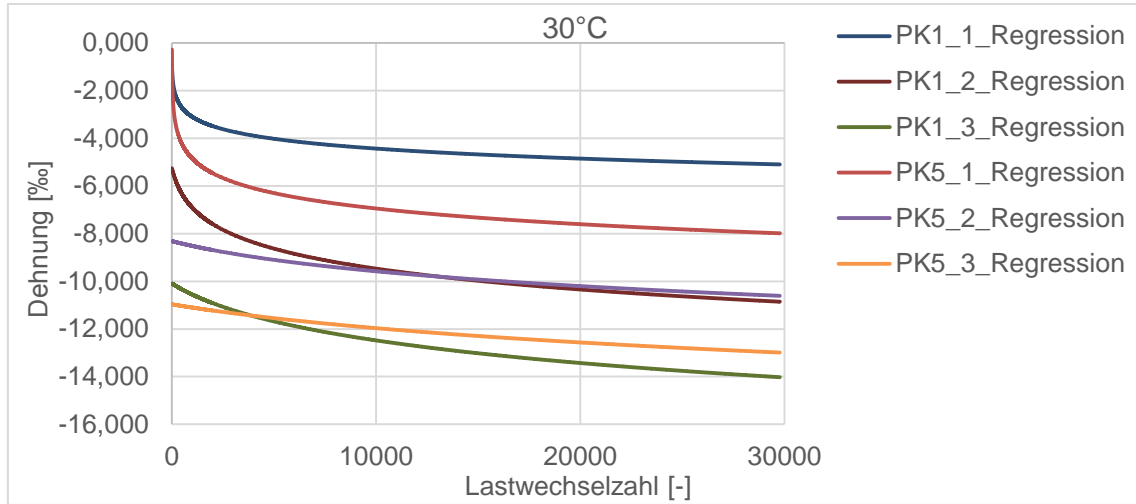
AC 16 B S SG: 5,68 M-%

**a1** -0,0309027 **b** 1,22260743  
**a2** 0,74516355 **T<sub>0</sub>** -193,70098 **R<sup>2</sup>** 0,98085436



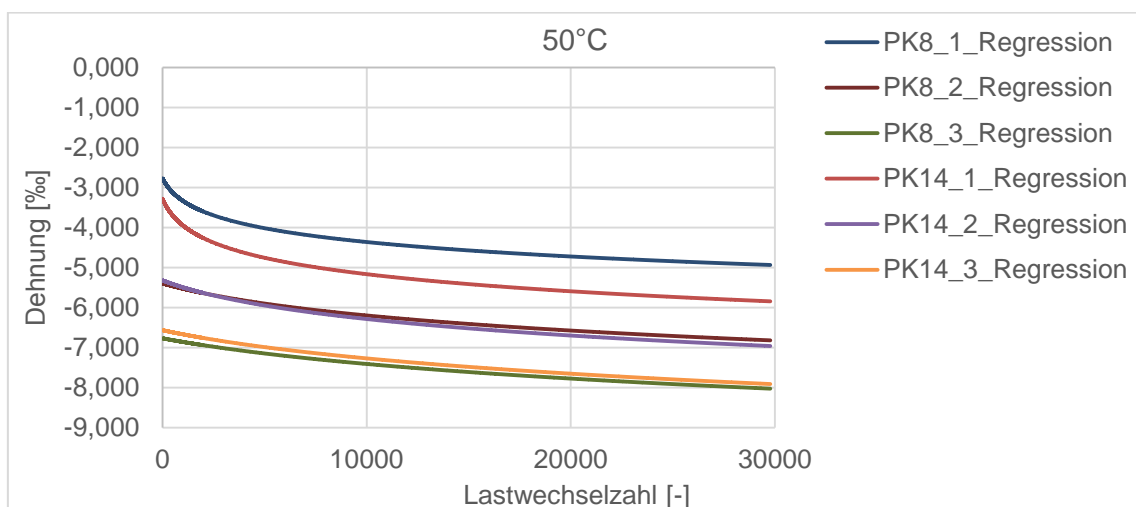
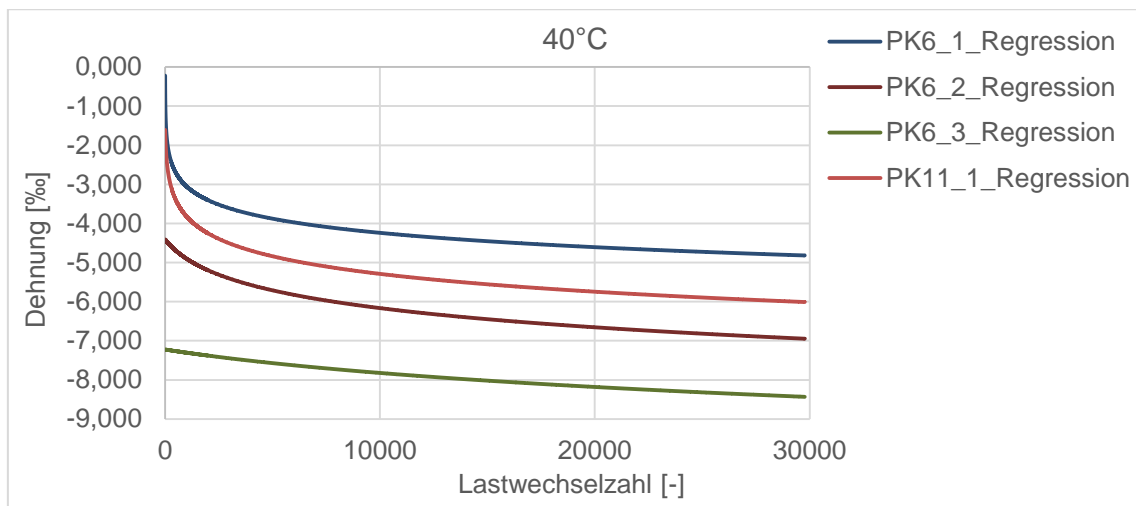
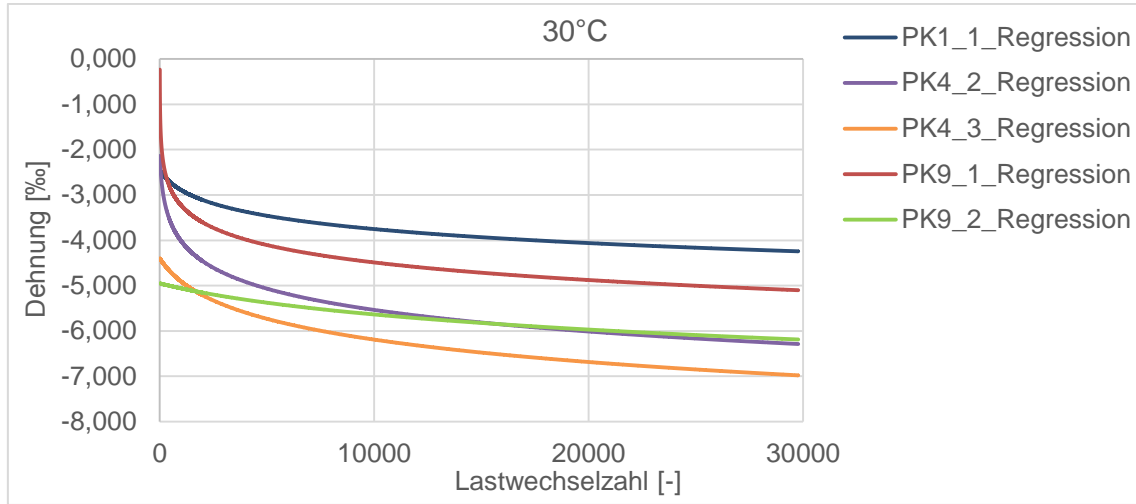
AC 16 B S SG: 5,98 M-%

**a1** -0,0366369 **b** 1,24772255  
**a2** 0,77310067 **T<sub>0</sub>** -163,25739 **R<sup>2</sup>** 0,96066003



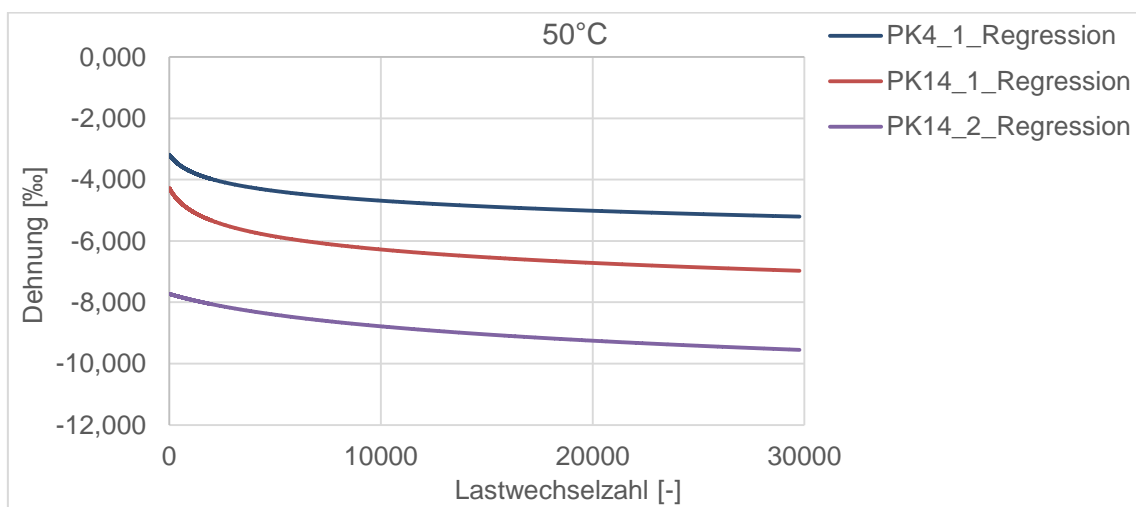
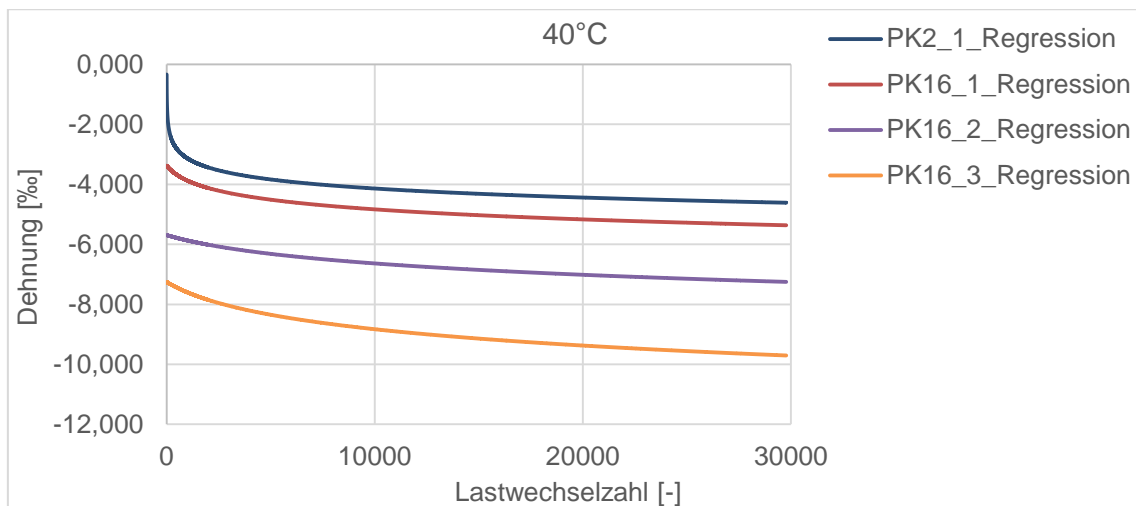
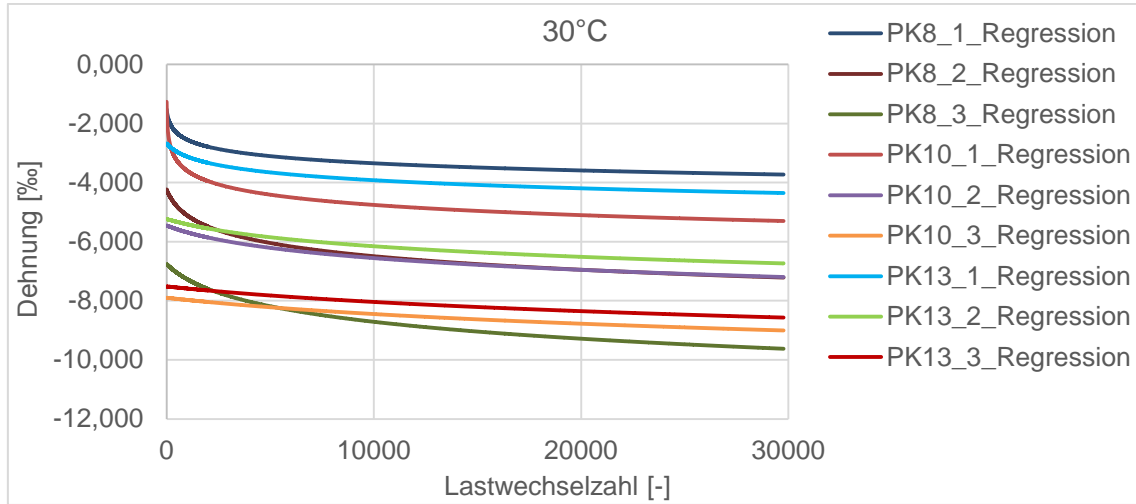
AC 16 B S SG: 6,55 M-%

**a1** -0,0092117 **b** 1,14192749  
**a2** 0,32607906 **T<sub>0</sub>** -206,06193 **R<sup>2</sup>** 0,84848222



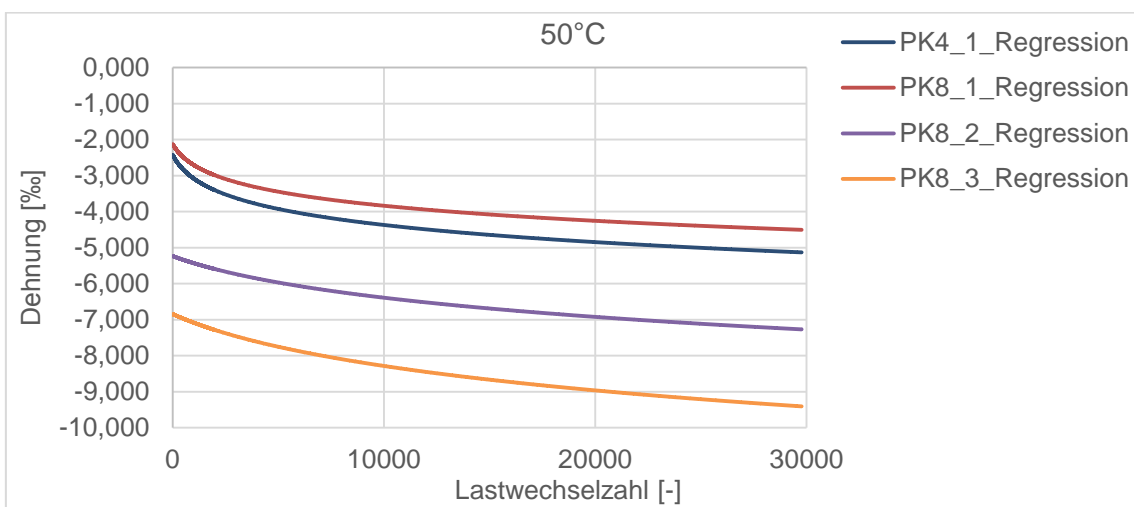
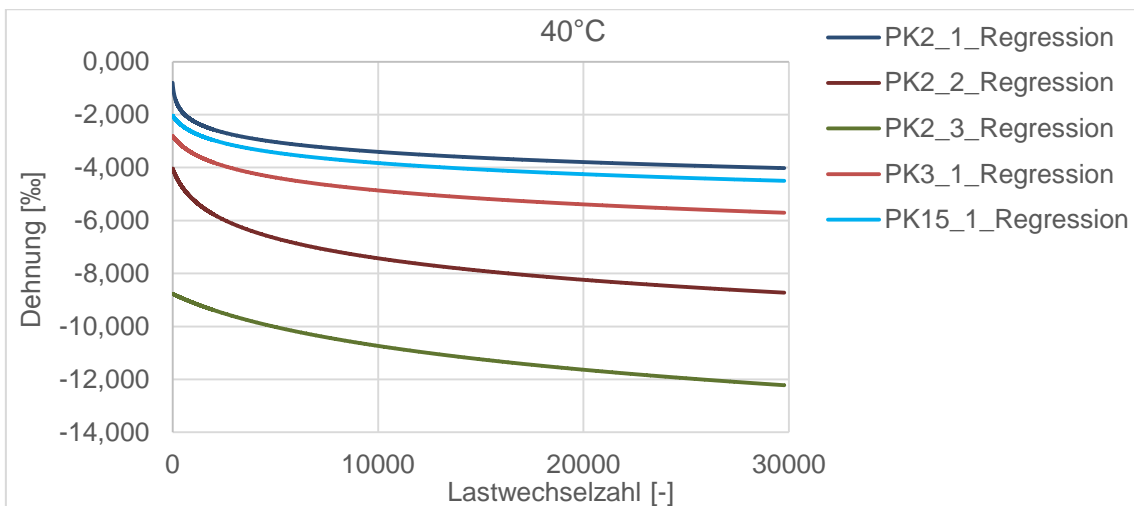
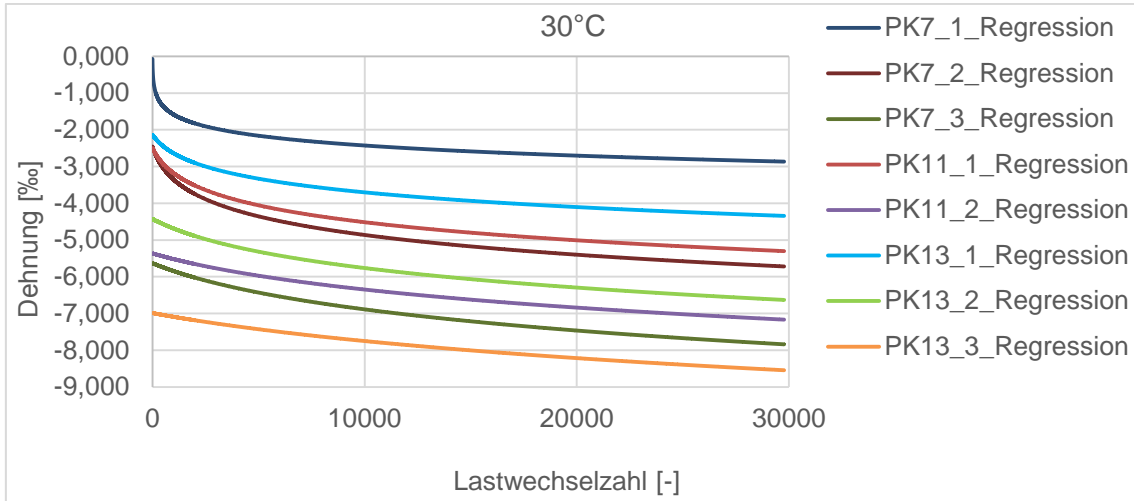
AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

**a1** -0,0437746 **b** 0,96775006  
**a2** 0,59814755 **T<sub>0</sub>** -101,05147 **R<sup>2</sup>** 0,9756738



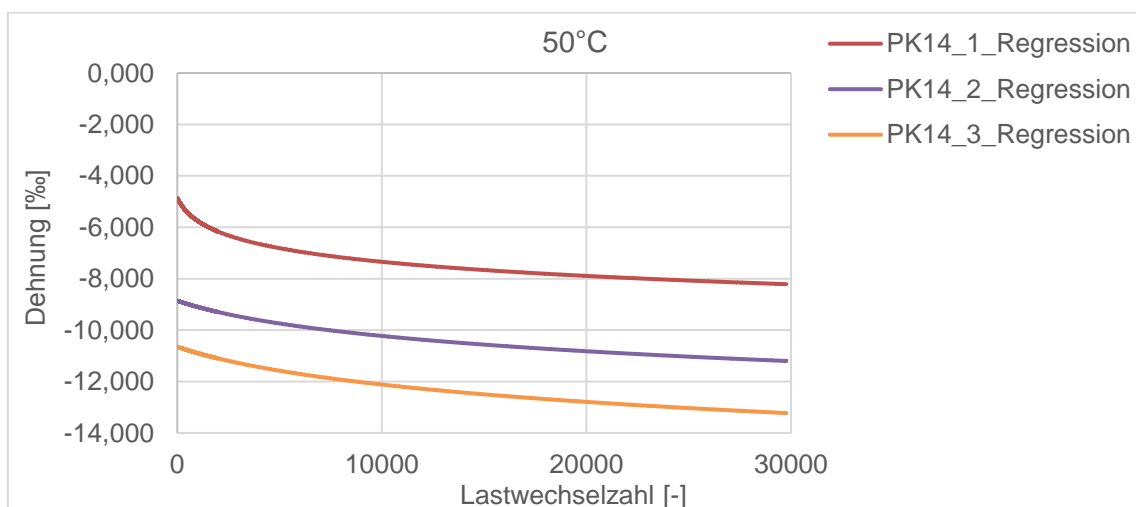
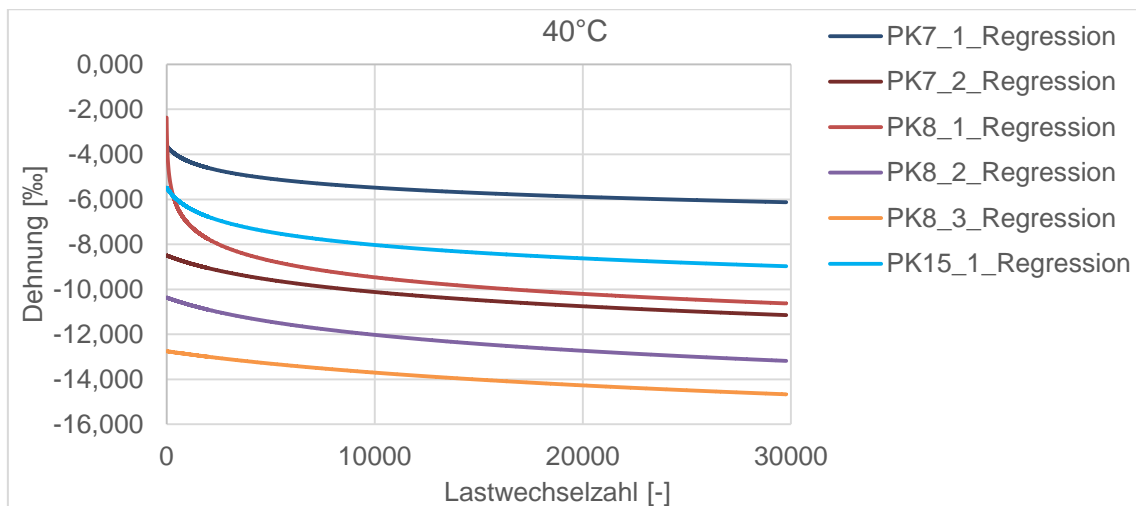
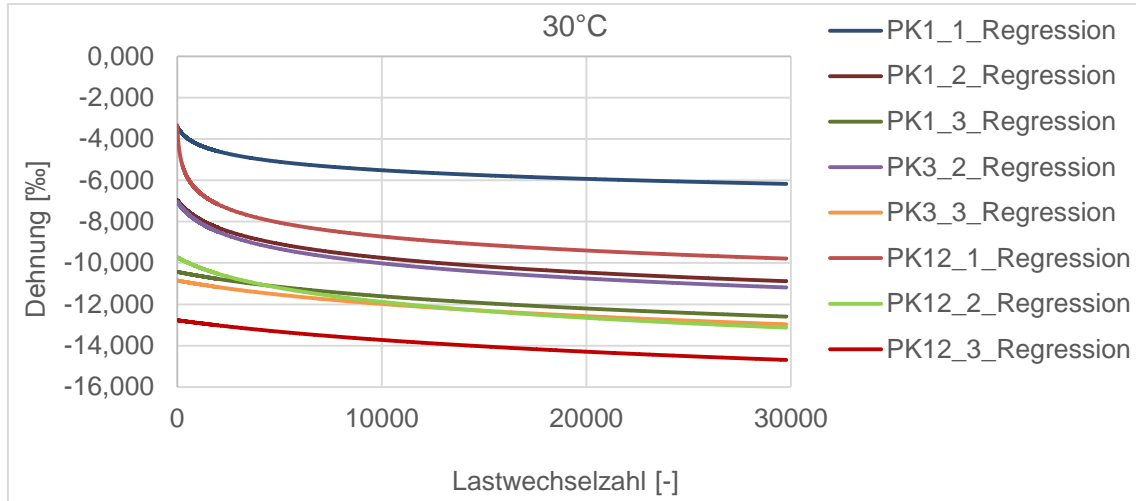
SMA 16 B S: 5,17 M-%

**a1** -0,0087727 **b** 1,48351699  
**a2** 0,62164016 **T<sub>0</sub>** -273 **R<sup>2</sup>** 0,96486385



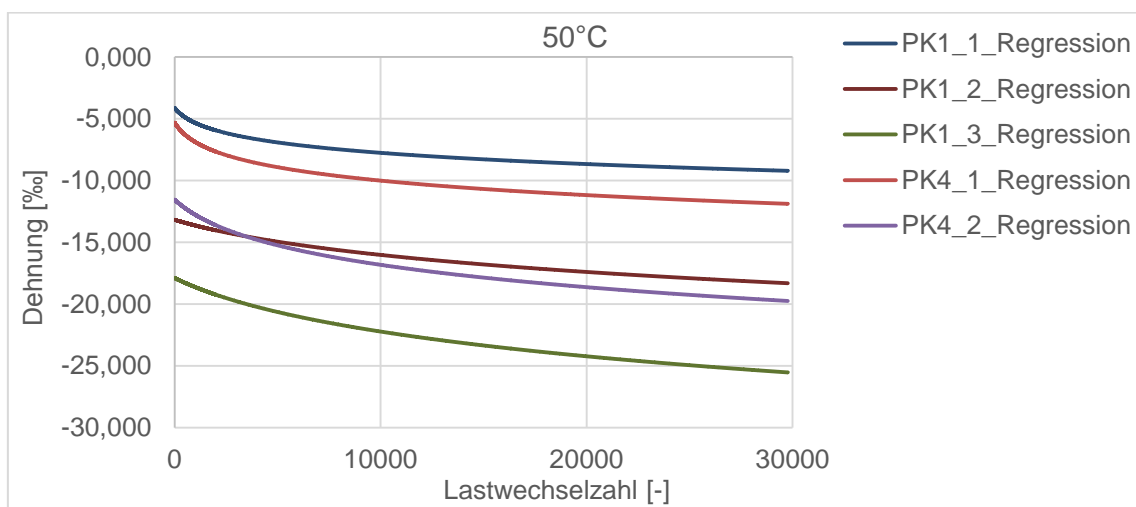
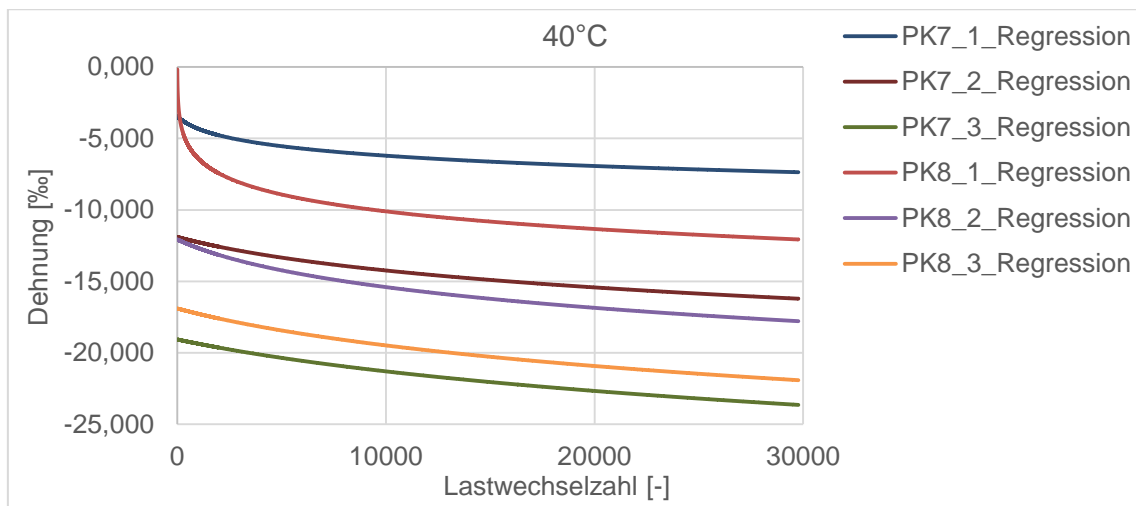
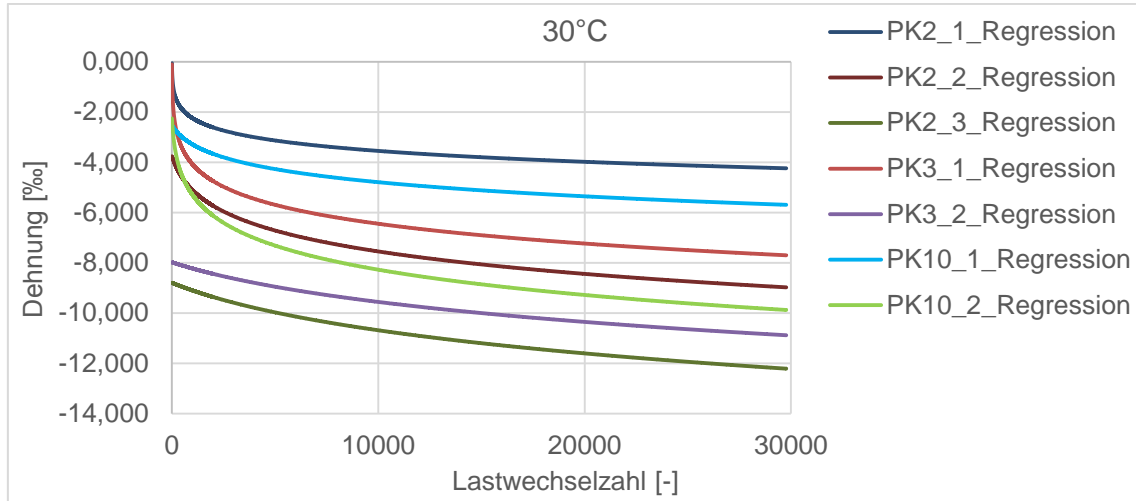
SMA 16 B S: 5,47 M-%

**a1** -0,0181763 **b** 1,03333547  
**a2** 0,44969152 **T<sub>0</sub>** -273 **R<sup>2</sup>** 0,9556873



SMA 16 B S: 6,03 M-%

**a1** -0,1352085 **b** 1,58790909  
**a2** 0,62912058 **T<sub>0</sub>** 5,39112023 **R<sup>2</sup>** 0,96187933





**Anlage 8: Ergebnisse der Griffigkeitsuntersuchungen**

|                              | 0 min | 360 min | 720 min |
|------------------------------|-------|---------|---------|
| SMA 11 S: fKGV; 6,03 M-%     | 50    | 58      | 60      |
| SMA 11 S: fKGV; 6,50 M-%     | 55    | 60      | 64      |
| SMA 11 S: fKGV; 6,79 M-%     | 57    | 62      | 63      |
| SMA 11 S: fKGV; 7,52 M-%     | 59    | 56      | 55      |
| SMA 11 S: fKGV; 8,02 M-%     | 56    | 58      | 56      |
| SMA 11 S: gKGV; 5,61 M-%     | 56    | 60      | 64      |
| SMA 11 S: gKGV; 6,42 M-%     | 53    | 59      | 63      |
| SMA 11 S: gKGV; 6,71 M-%     | 54    | 59      | 63      |
| SMA 11 S: gKGV; 7,76 M-%     | 50    | 59      | 62      |
| SMA 11S: 10/40-65A; 7,01 M-% | 56    | 54      | 58      |