

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

1.	Einleitung und Zielstellung	1
2.	Arbeitspakete und Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und erreichte Ziele	2
3.	Zusammenfassung	52
4.	Sachbericht	55
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

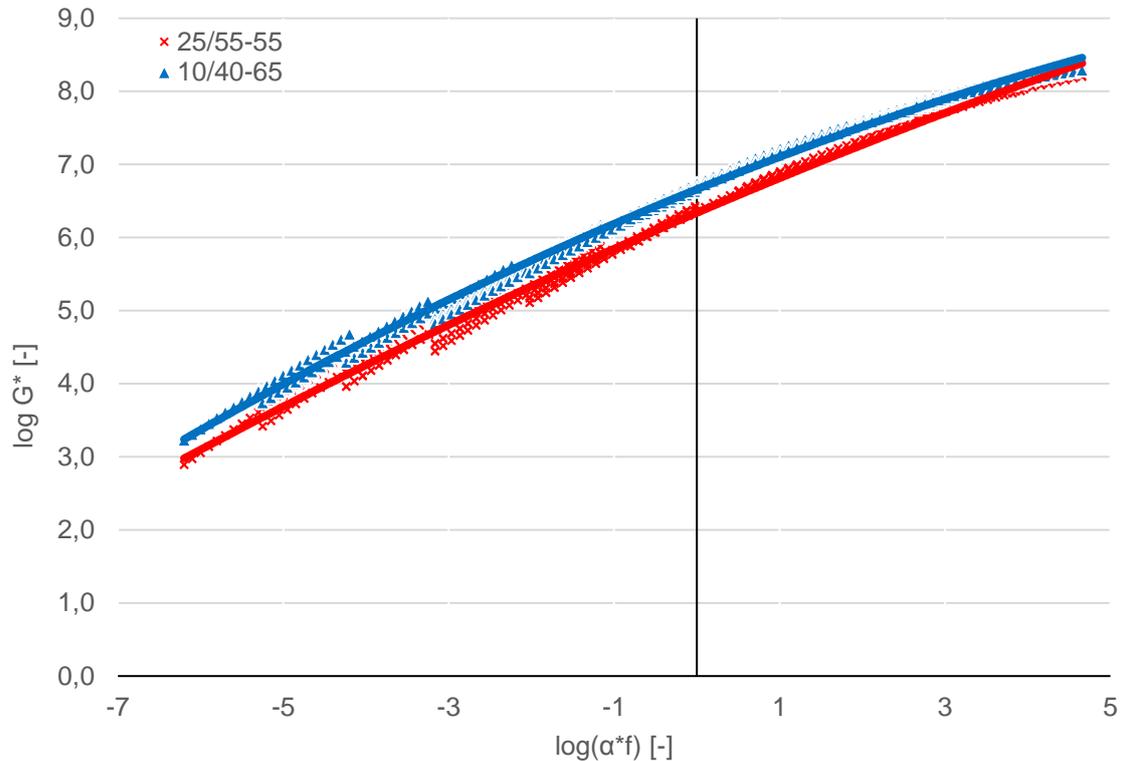


Abb. 1: Hauptkurven der untersuchten Bitumen

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

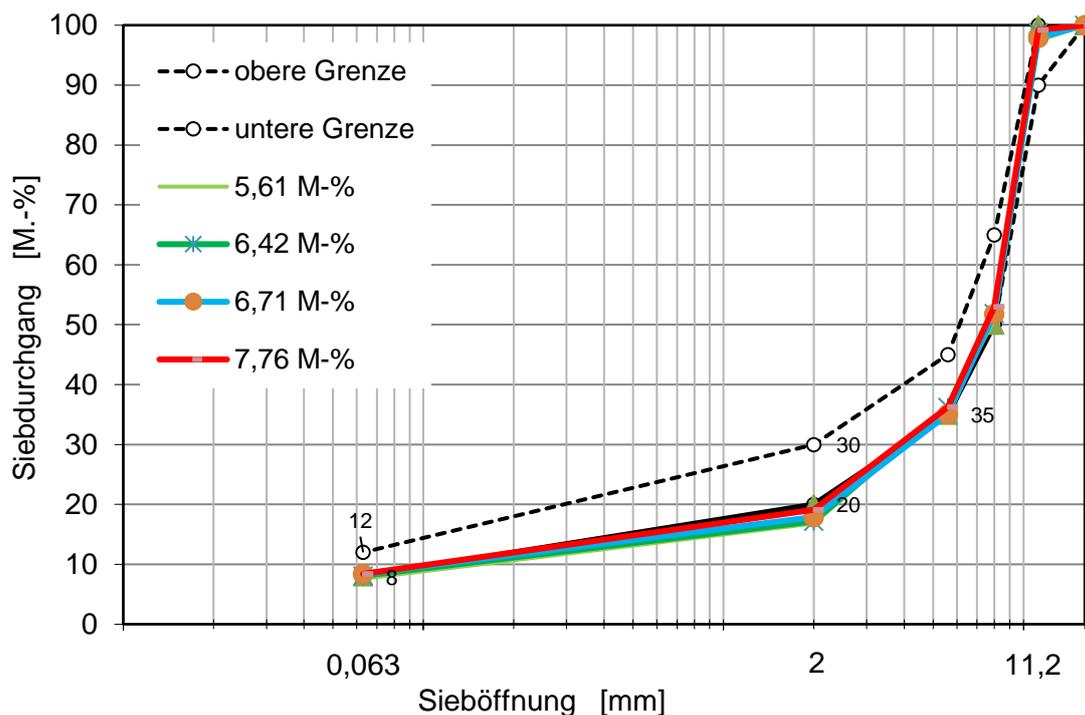


Abb. 2: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

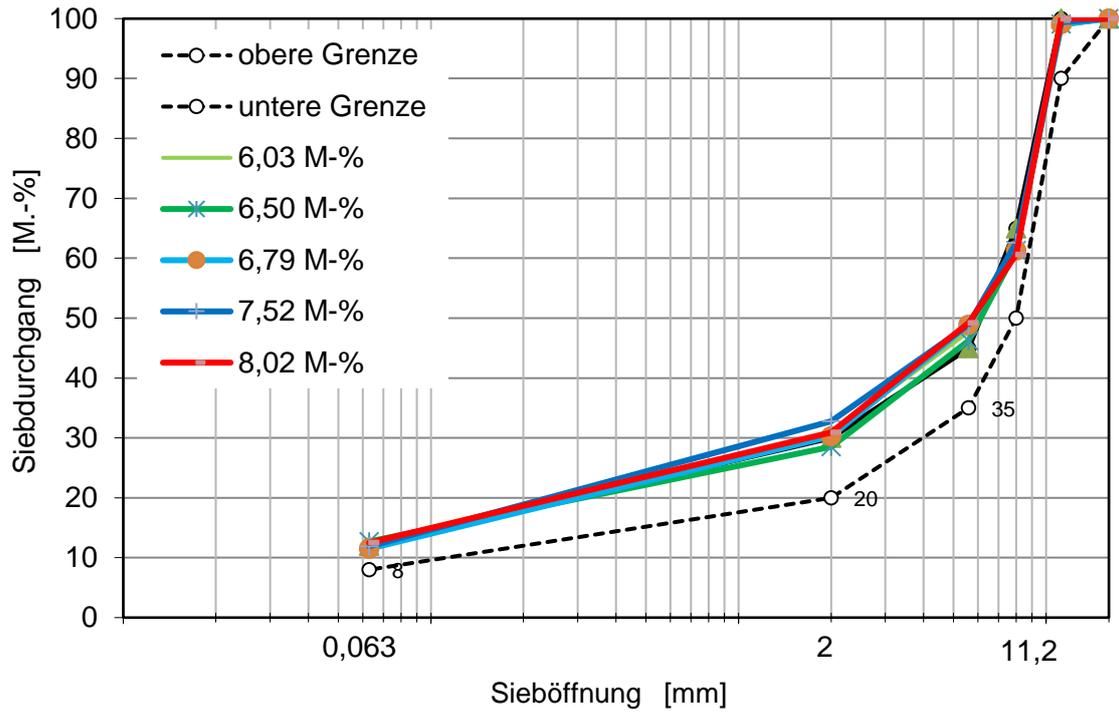


Abb. 3: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung

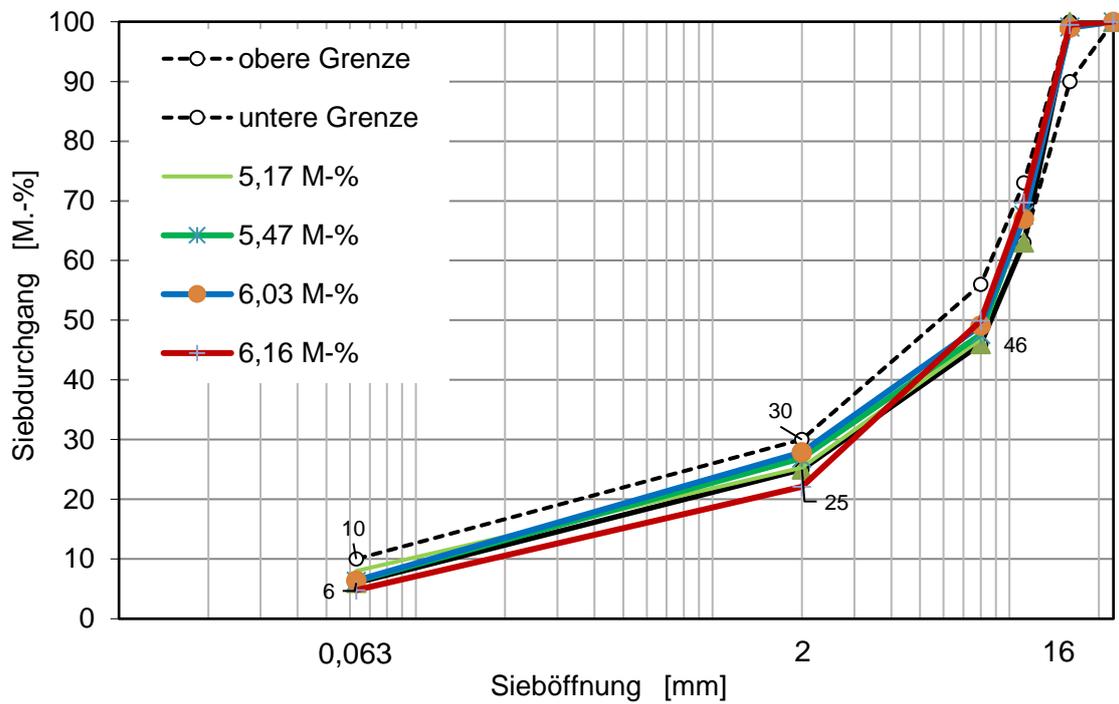


Abb. 4: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 16 B S

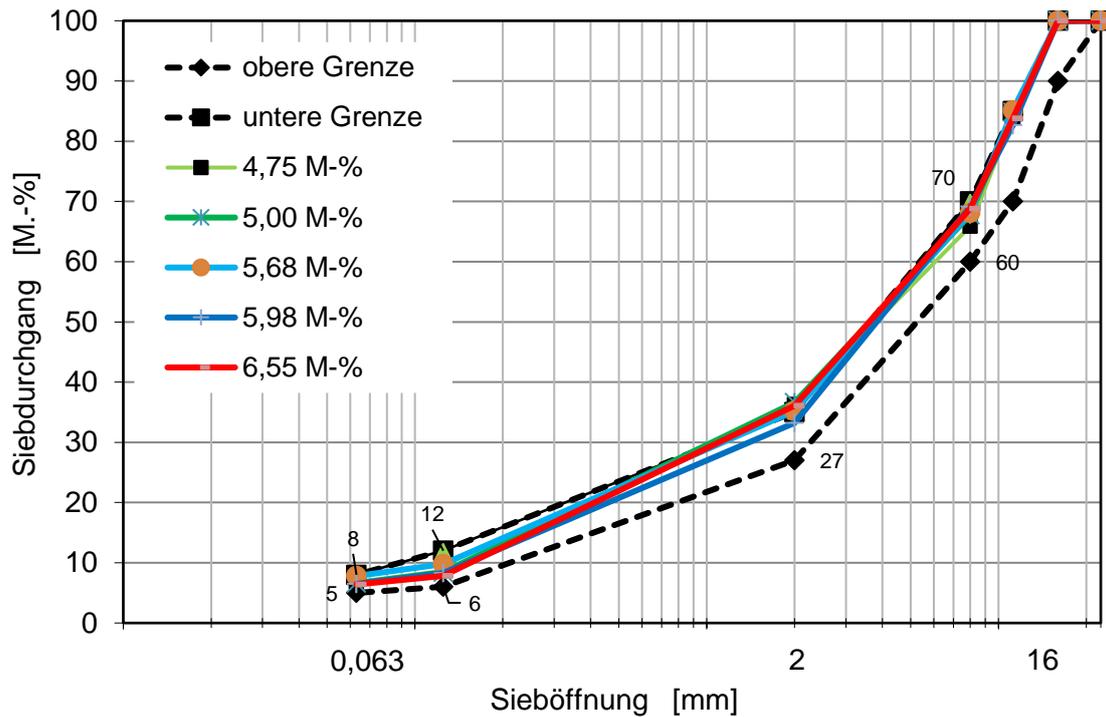


Abb. 5: Sieblinie der Asphaltgemische AC 16 B S SG

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]	$\epsilon_{ele,anf}$ [‰]	σ_u [N/mm ²]	σ_o [N/mm ²]
-10; 5; 20; 35	0,1; 0,3; 1; 3; 5; 10	ca. 0,065	0,035	Temperatur-, frequenzabhängig

Tab.4: Versuchsparameter zur Bestimmung der Masterkurve

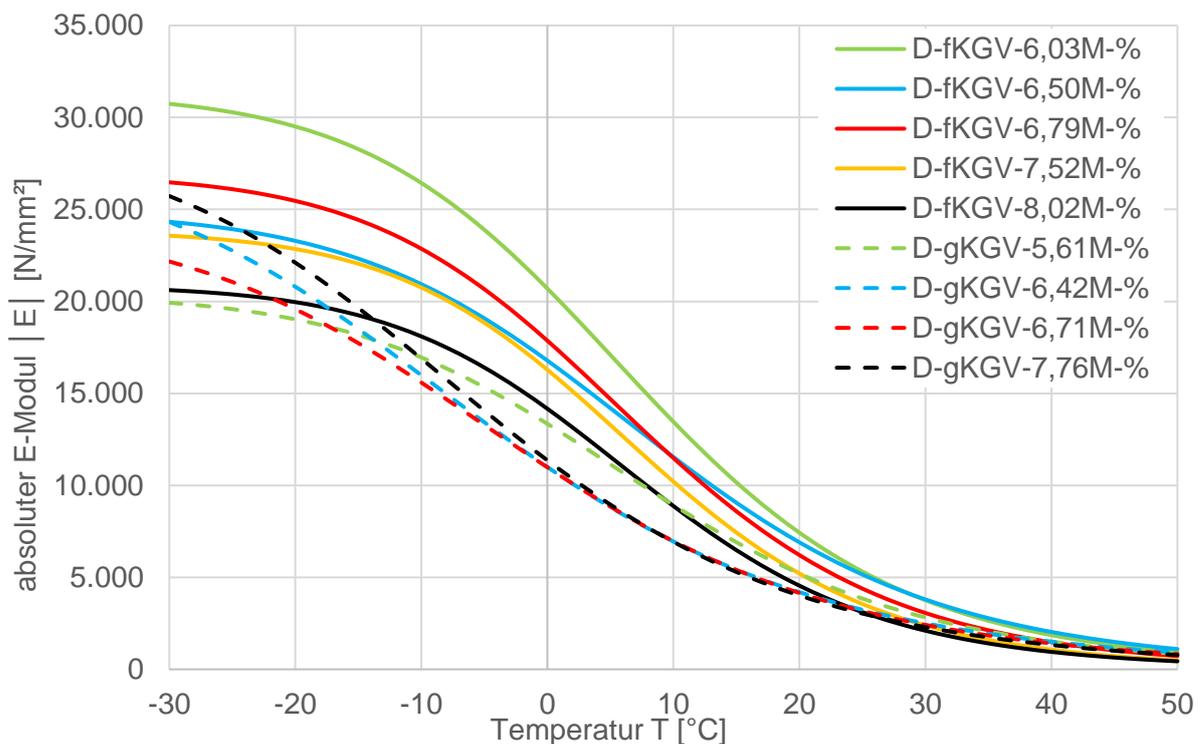


Abb. 6: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Deckschichtvarianten

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.

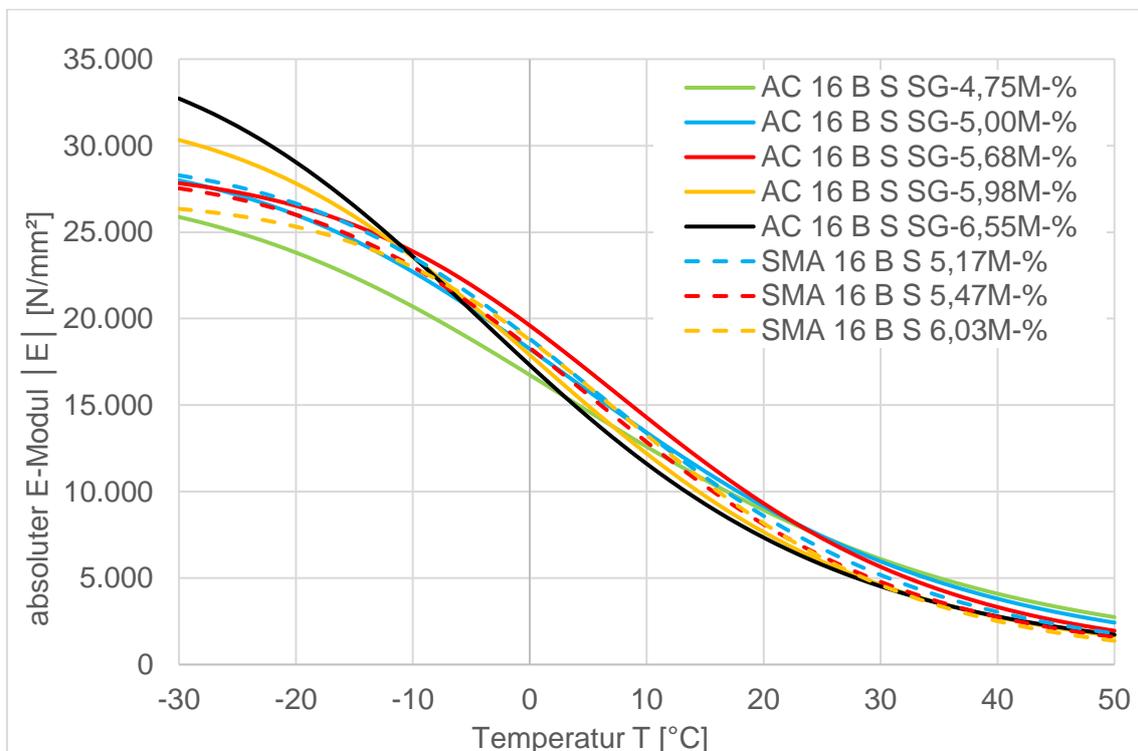


Abb. 7: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Binderschichtvarianten

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 $\varepsilon_{el,anf} \leq 0,12 \text{ ‰}$ 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 $\varepsilon_{el,anf} \leq 0,085 \text{ ‰}$ als die feine Korngrößenverteilung. Bei dem Bindemittelgehalt von 7,76 M-% besitzt die grobe Sieblinie ein besseres Ermüdungsverhalten als die der feineren.

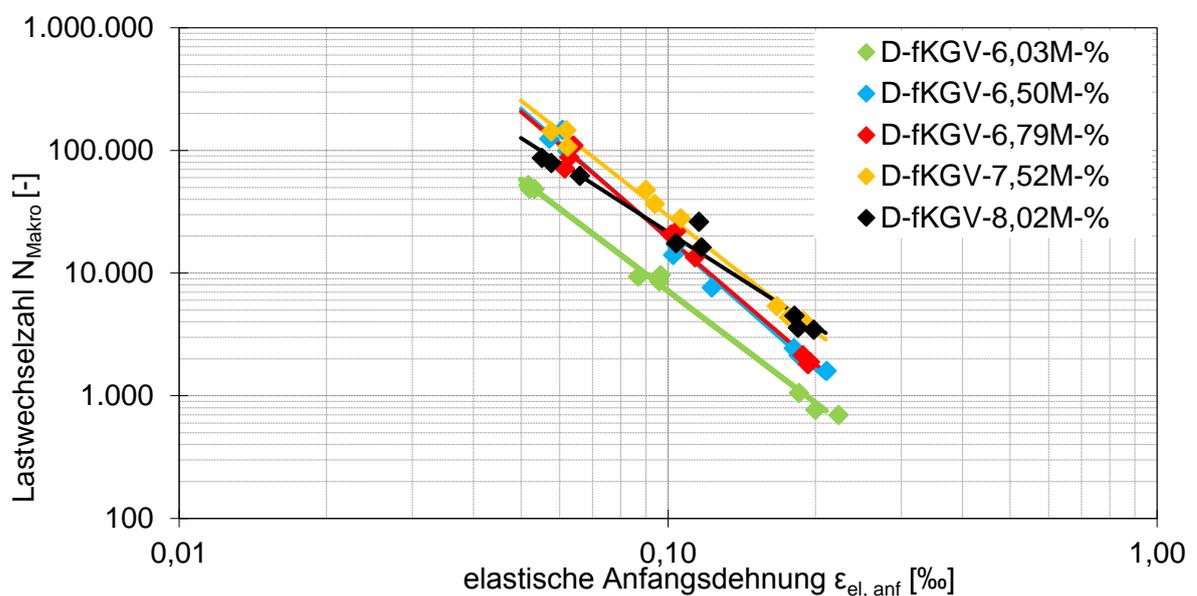


Abb. 8: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; feine Korngrößenverteilung

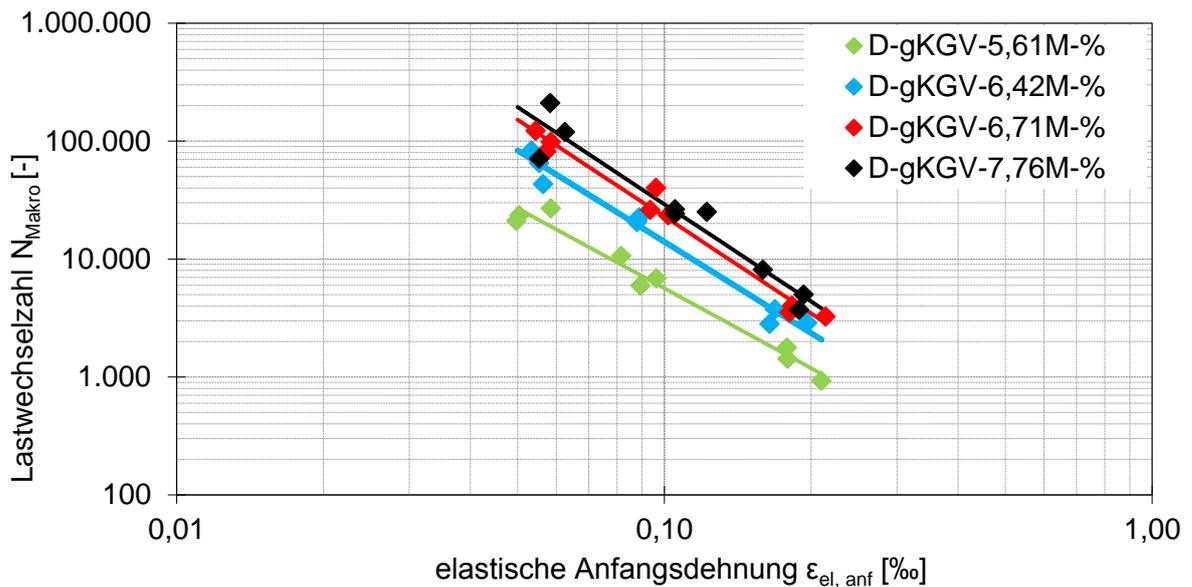


Abb. 9: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; grobe Korngrößenverteilung

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°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-%.

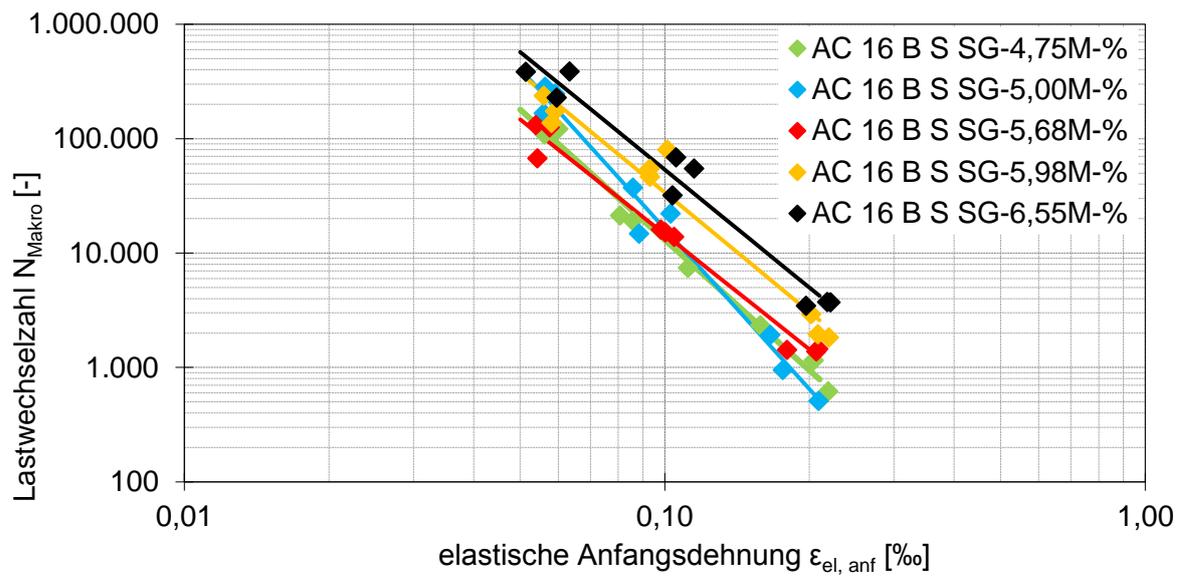


Abb. 10: Ermüdungsfunktion des AC 16 B S SG

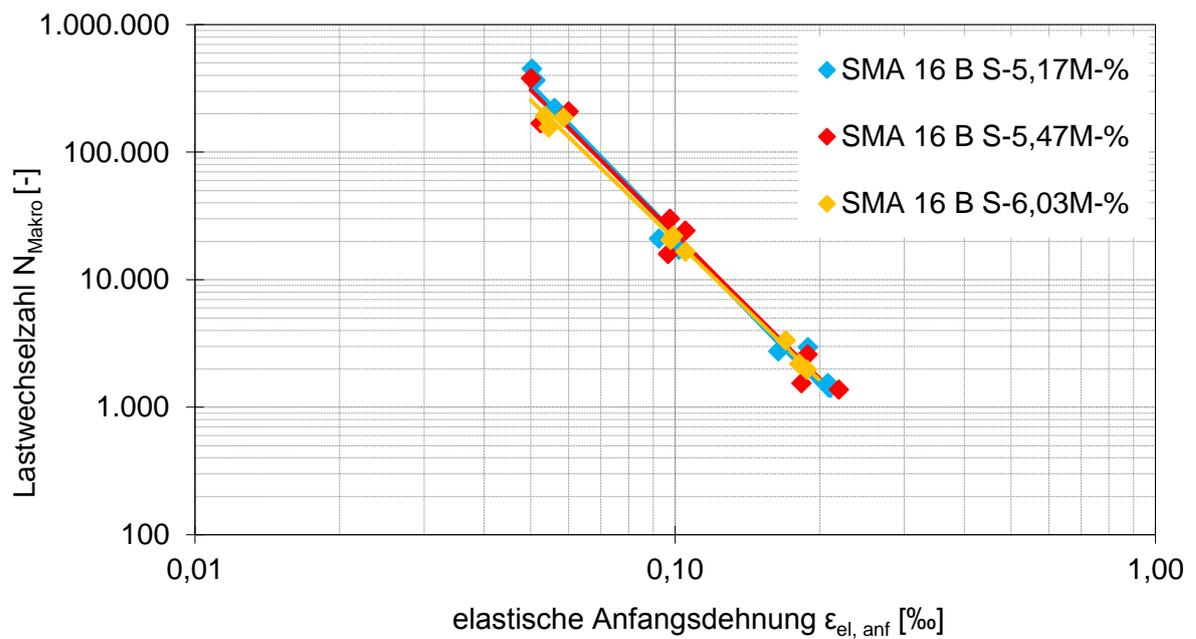


Abb. 11: Ermüdungsfunktion des SMA 16 B S

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.

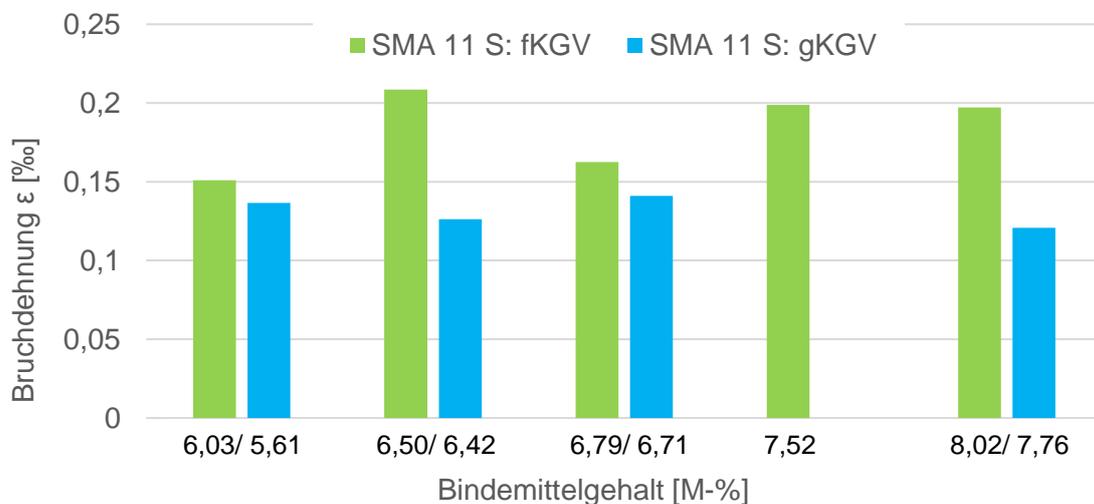


Abb. 12: ermittelte Bruchdehnungen der Deckschichtgemische

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.

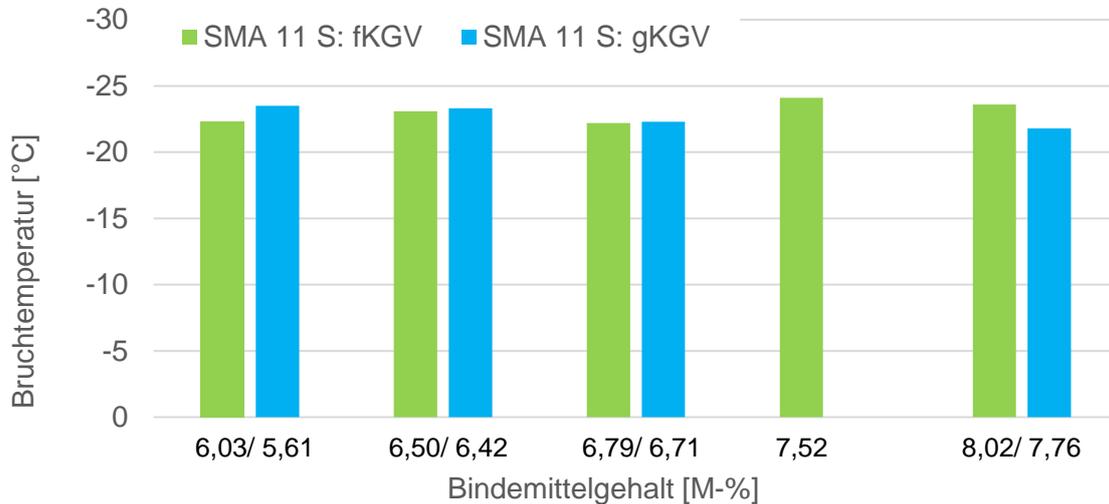


Abb. 13: Bruchtemperaturen der Deckschichtgemische

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.

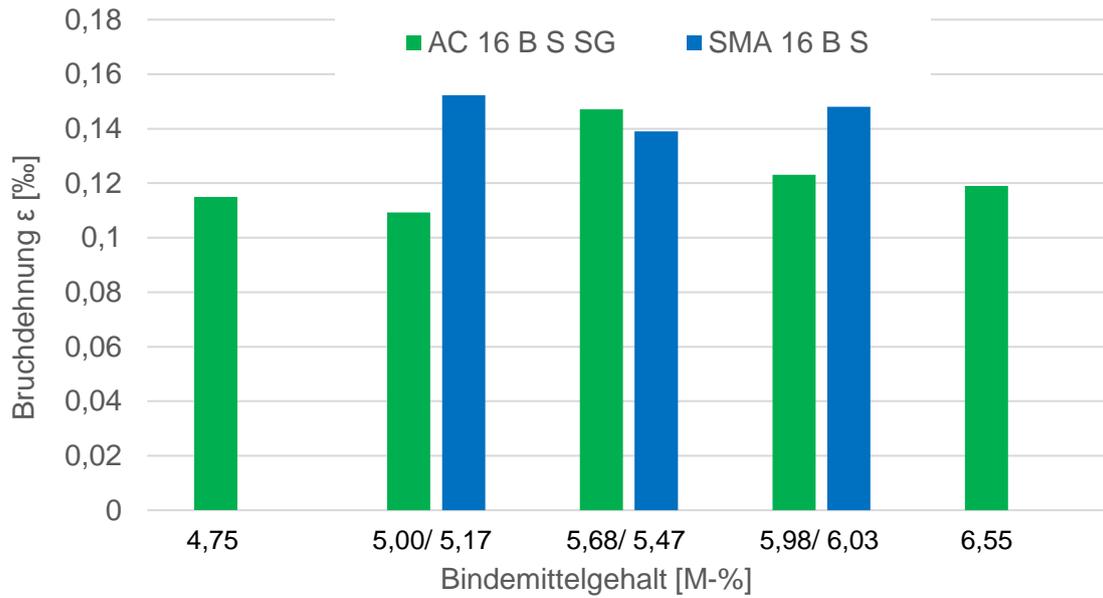


Abb. 14: ermittelte Bruchdehnungen der Binderschichtgemische

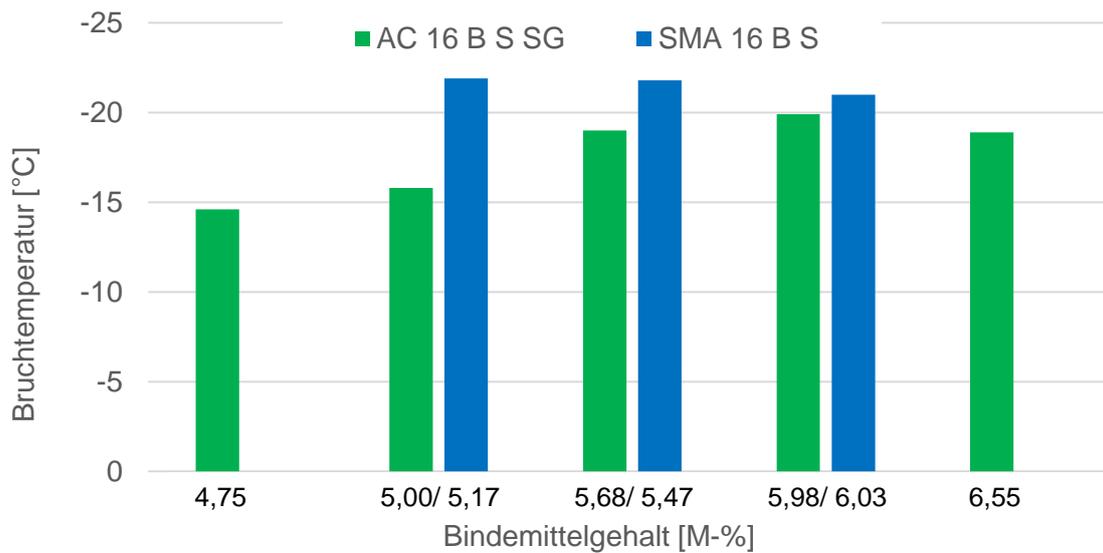


Abb. 15: Bruchtemperaturen der Binderschichtgemische

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.

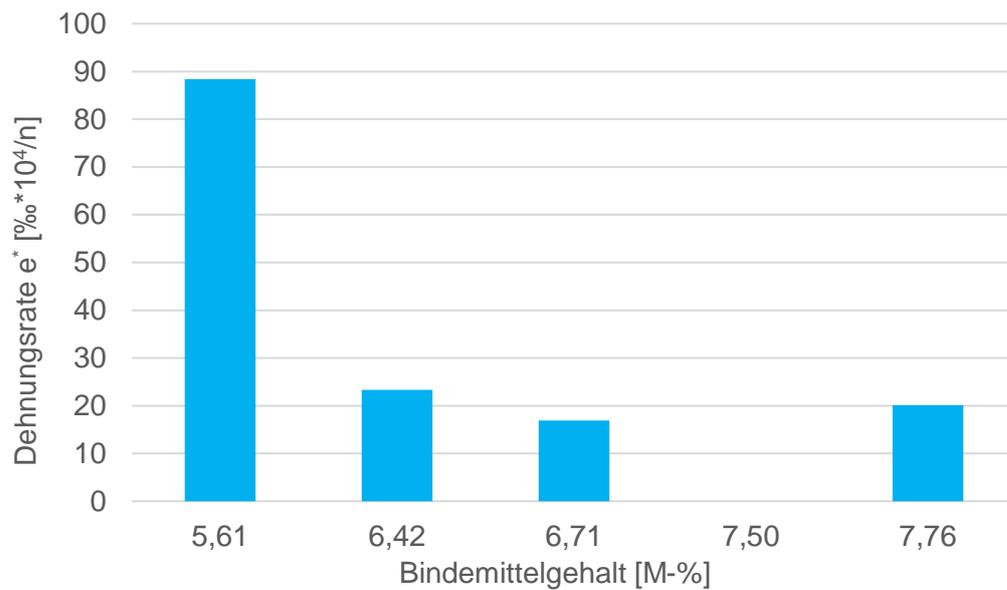


Abb. 16: Dehnungsraten im Wendepunkt für den SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

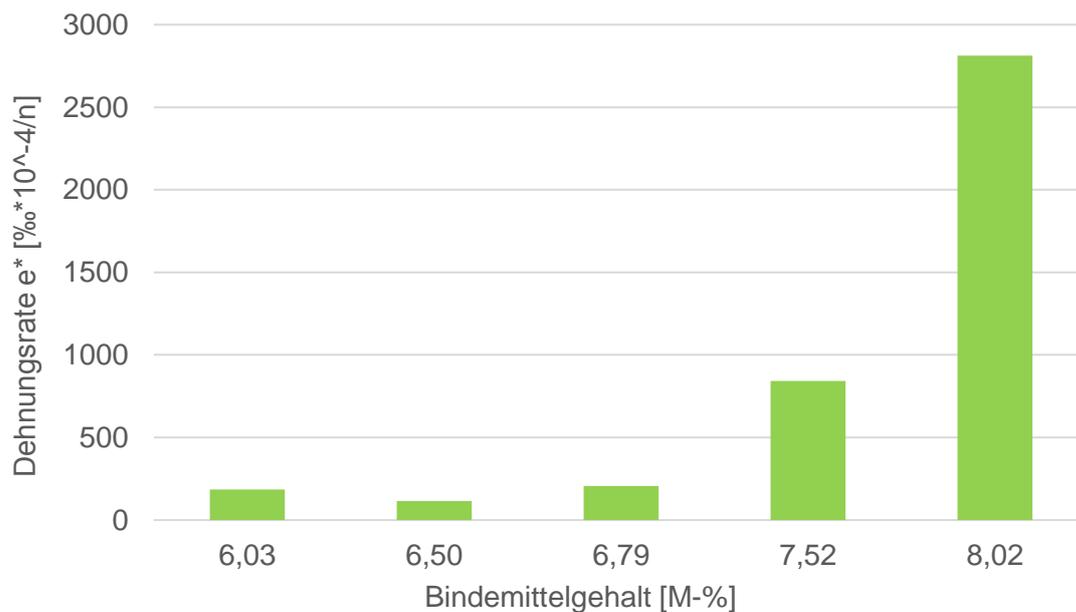


Abb. 17: Dehnungsraten bei einer Dehnung von 40 % für den SMA 11 S: feine KGV

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.

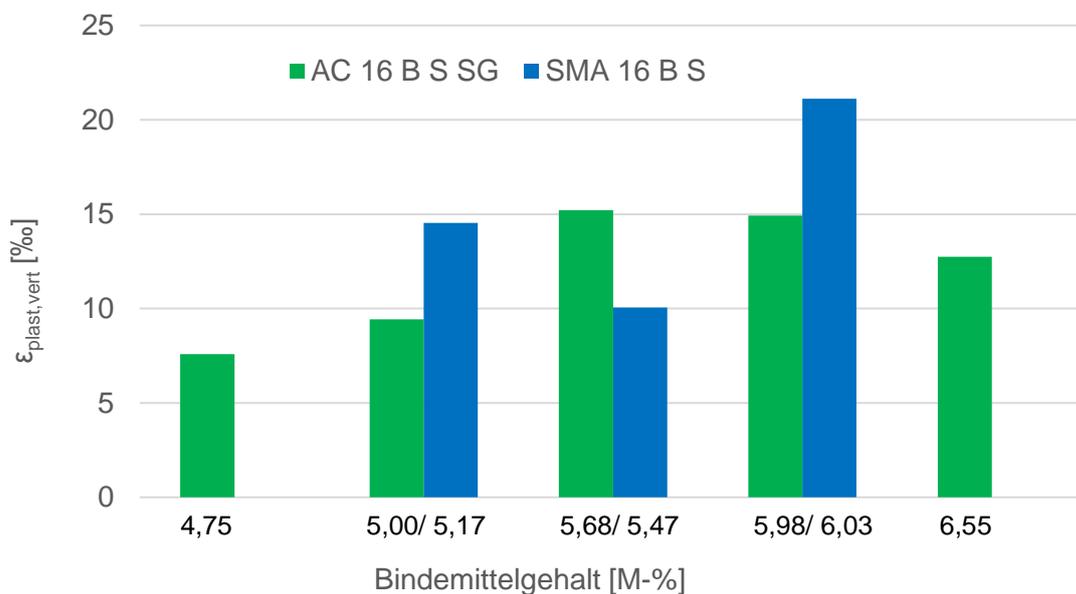


Abb. 18: plastische Gesamtdehnung am Versuchsende für die Binderschichtgemische

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.

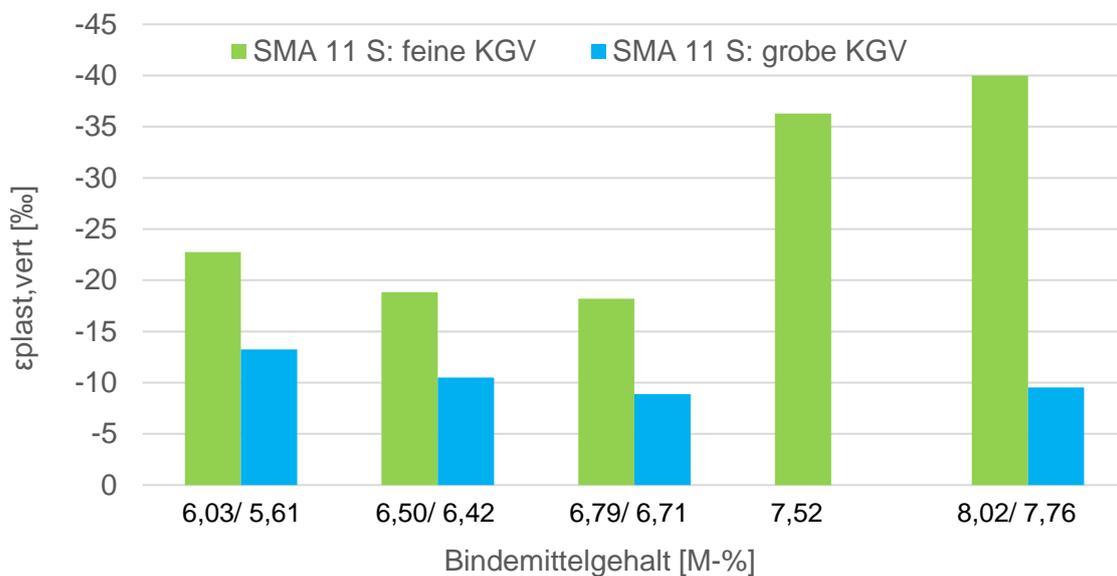


Abb. 19: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei $T=40^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,15\text{ N/mm}^2$

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

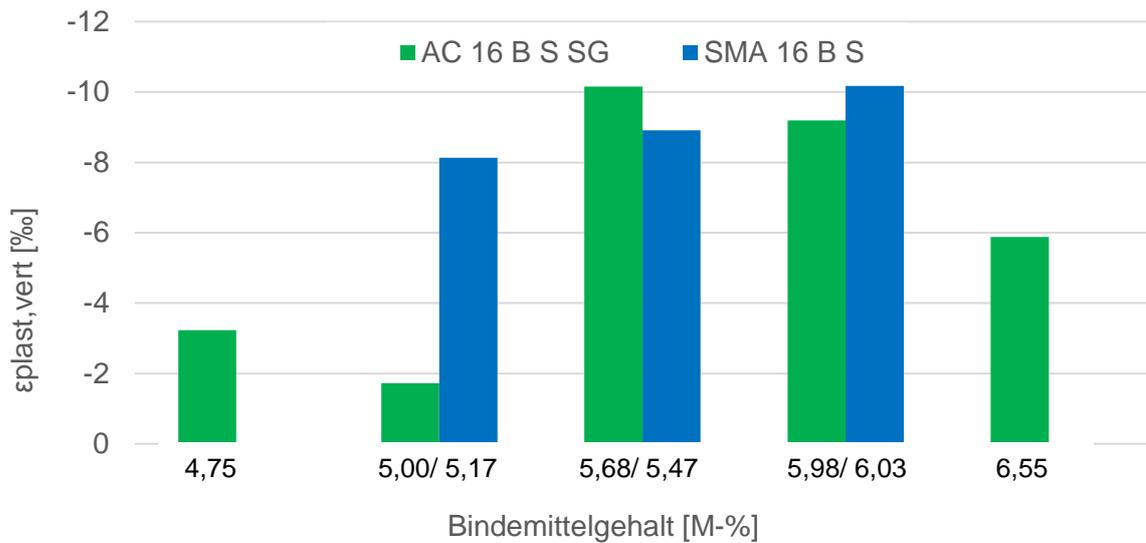


Abbildung 20: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei $T=50^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,20\text{ N/mm}^2$

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.

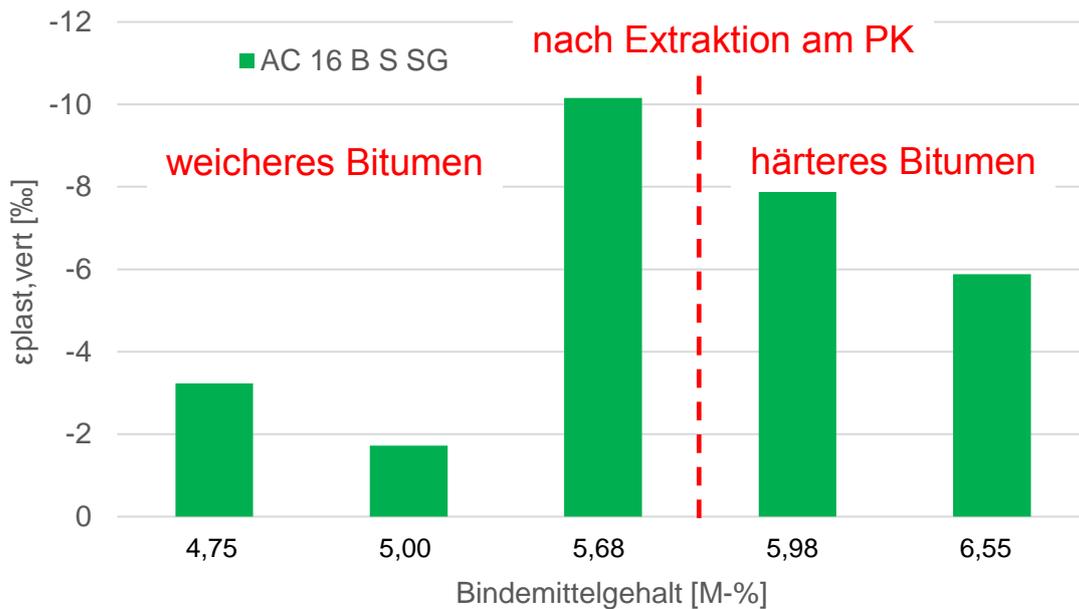


Abb. 21: Verhärtung des Bitumens bei der Variante AC 16 B S SG

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.

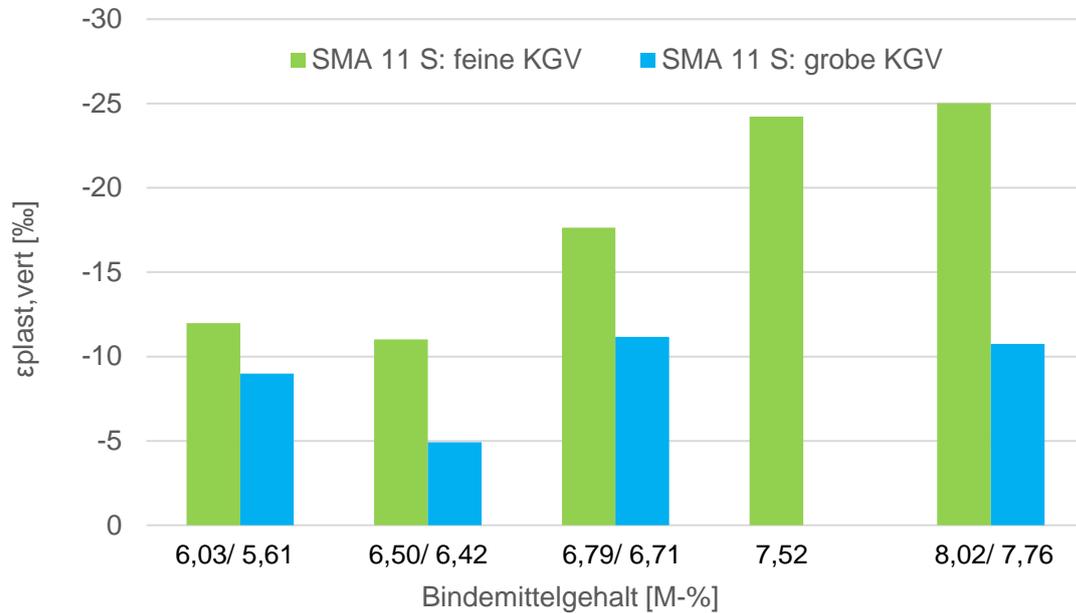


Abb. 22: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei $T=30^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,20 \text{ N/mm}^2$

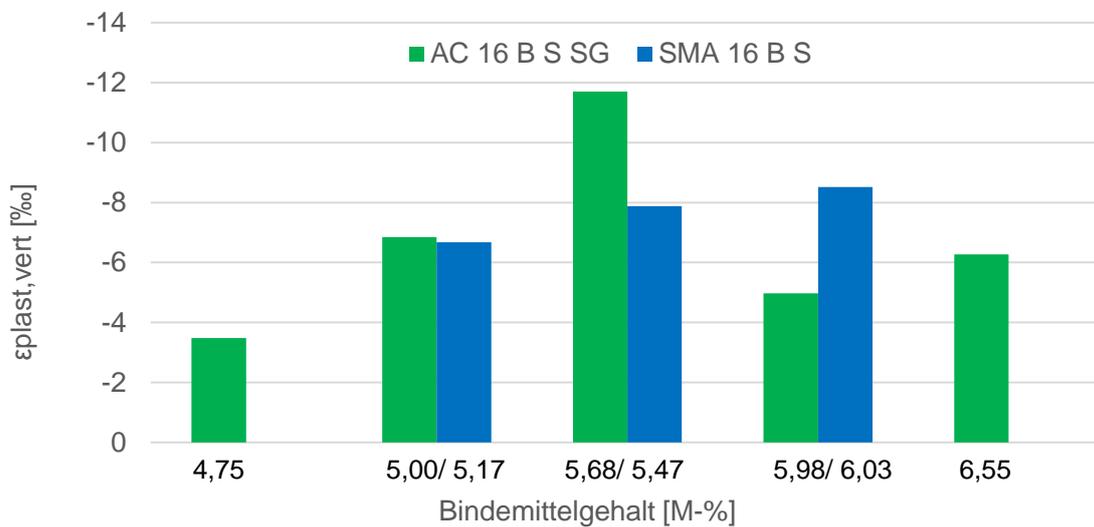


Abbildung 23: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei $T=50^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,20 \text{ N/mm}^2$

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.

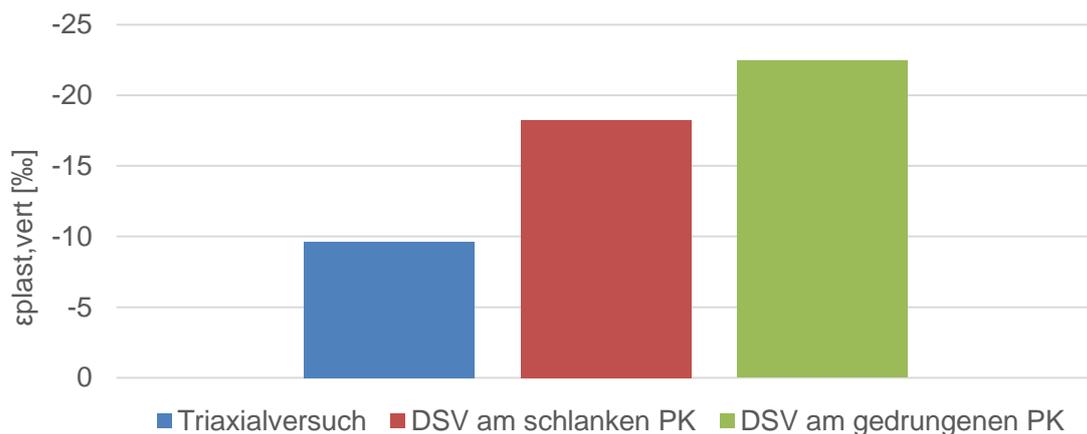


Abb. 24: Versuchsergebnisse des SMA 11 S mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten

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

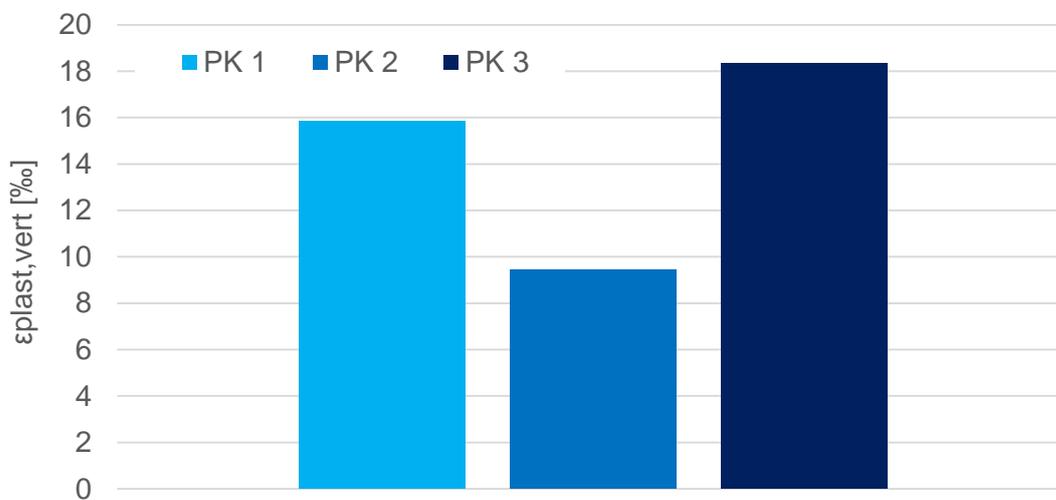


Abb. 25: Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung

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.

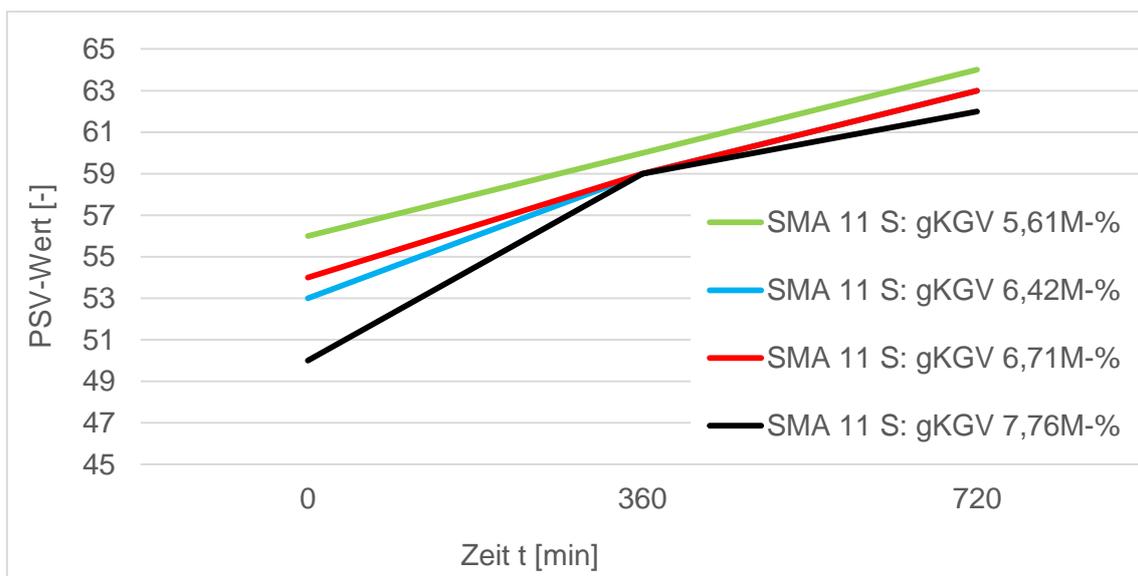


Abb. 26: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: grobe KGV

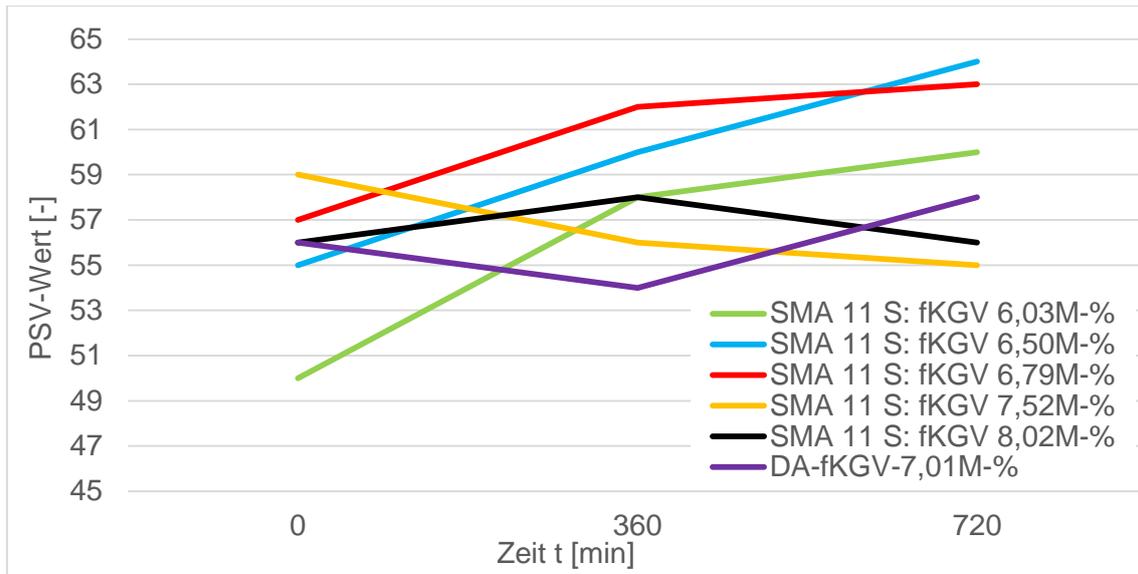


Abb. 4-27: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: feine KGV

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 α -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}_{β_1} Zufallsvariable

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

SSR_{β_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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 $\epsilon_{\text{ele, anf}}$ 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 abgelehnt 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Ermüdungsrisssbildung 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 Frostschutzschicht.

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 Ermüdungsrisssbildung

Die Prognoserechnungen der Ermüdungsrisssbildung 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.

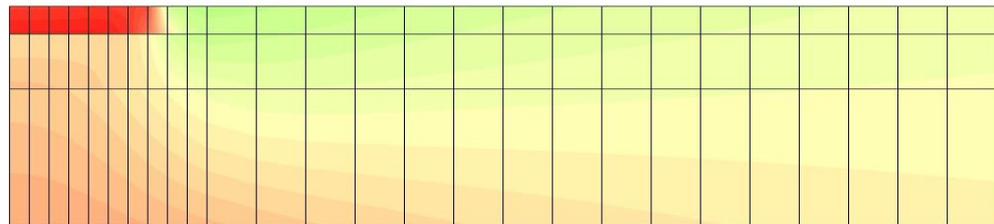


Abb. 28: Verlauf der vertikalen Dehnungen im Straßenquerschnitt

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

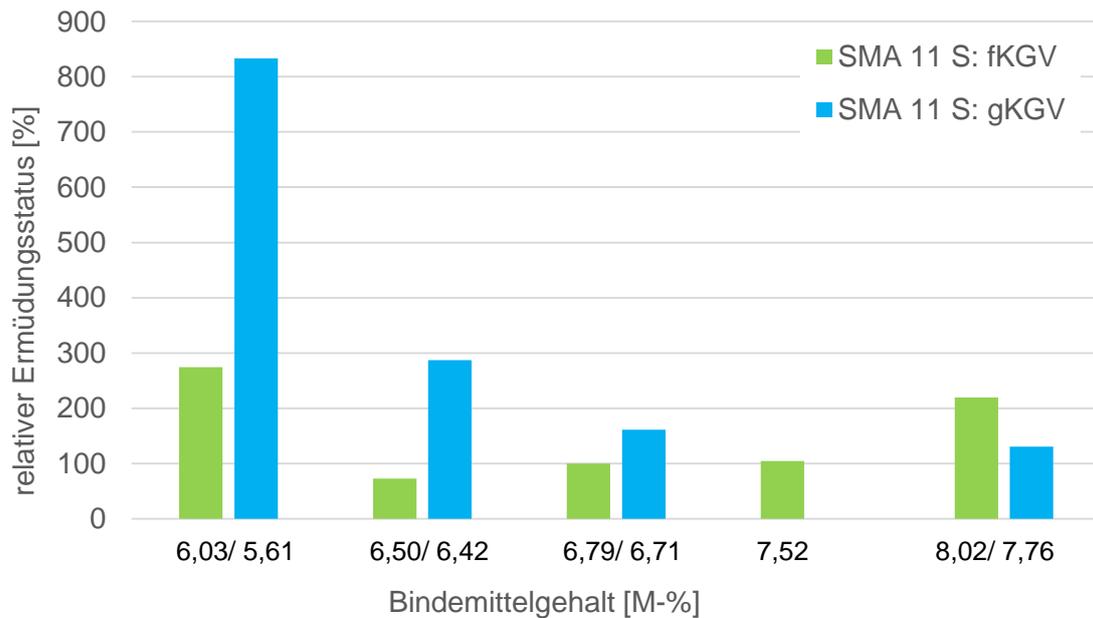


Abb. 29: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren

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 Asphaltsschichten 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.

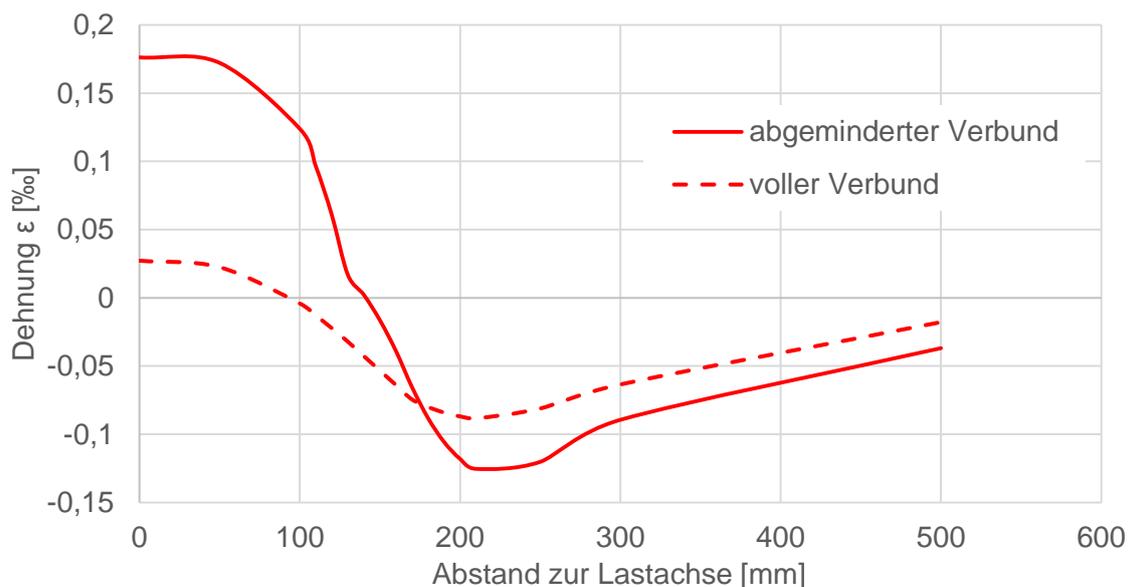


Abb. 30: Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltbinderschicht bei starren Verbund und abgeminderten Verbund

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

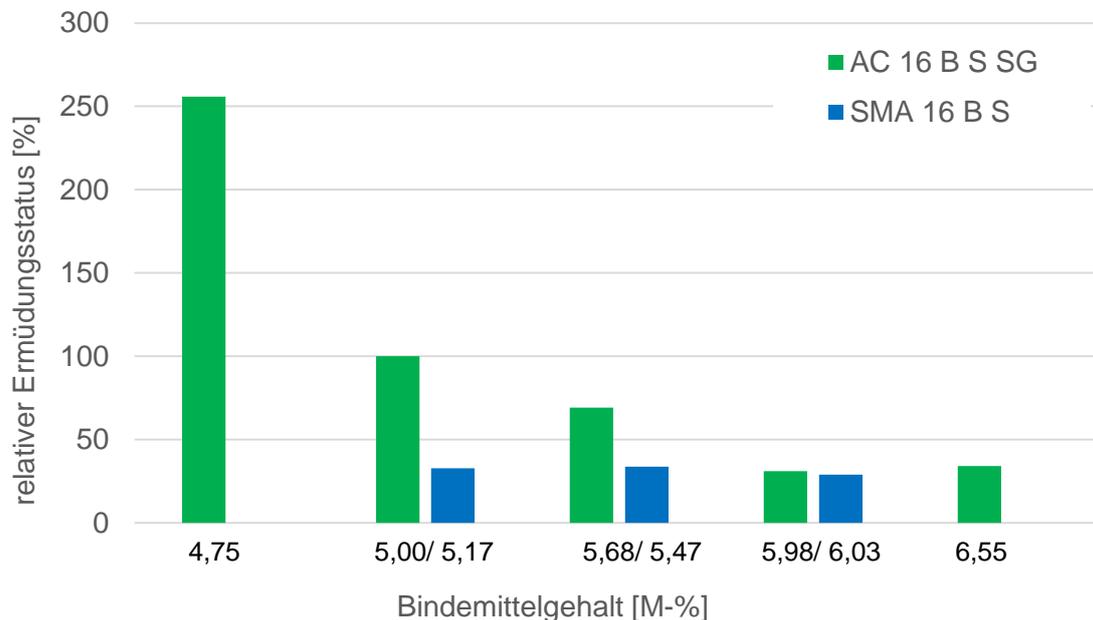


Abb. 31: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschichtgemische nach 30 Jahren

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:

ε_{plast} bleibende axiale Dehnungen [%]

ε_{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.

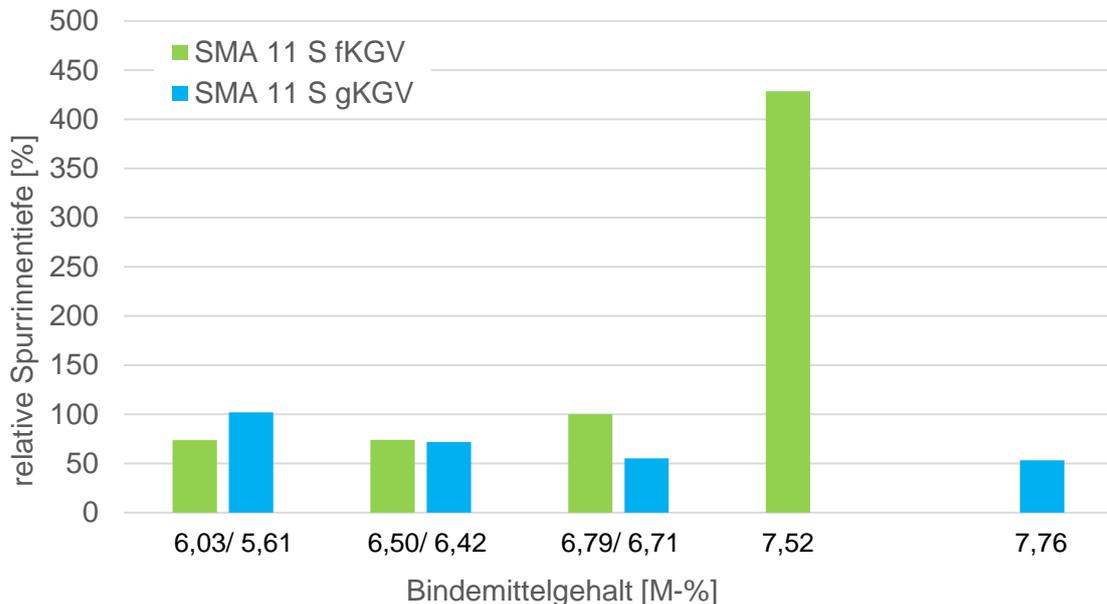


Abb. 32: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

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.

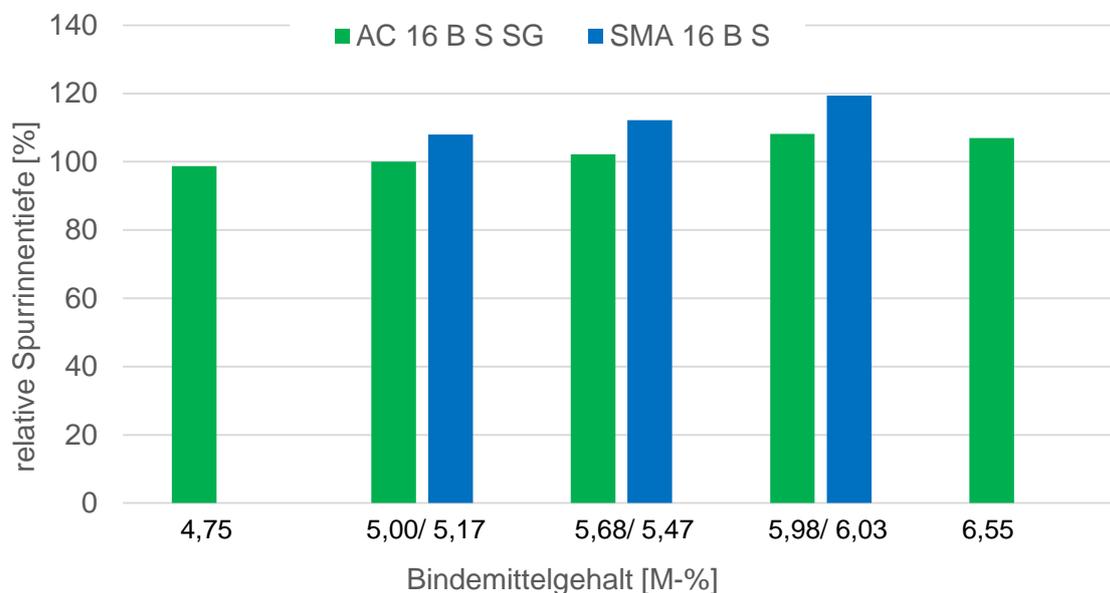


Abb. 33: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

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) $B_{opt} = 6,6 \text{ M-\%}$.

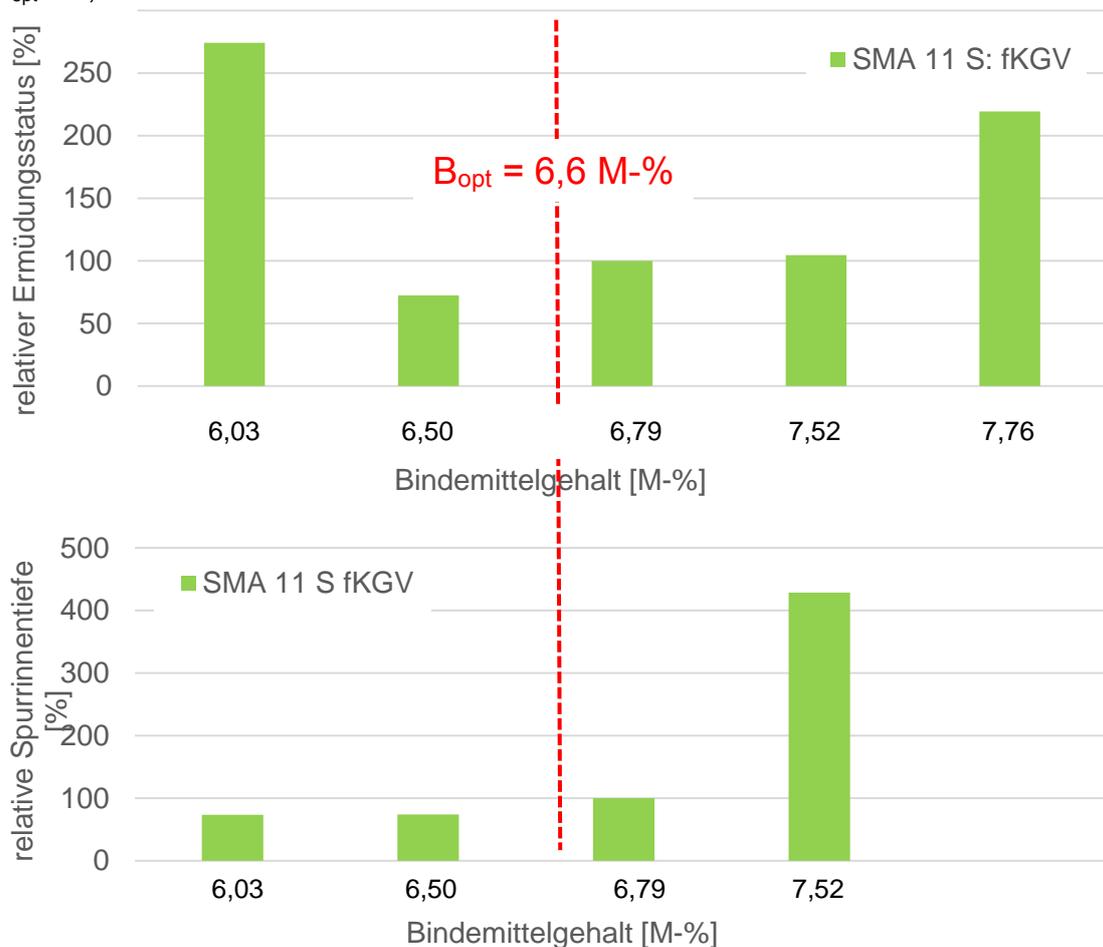


Abb. 34: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, feine KGV

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) $B_{opt} = 7,4 \text{ M-}\%$.

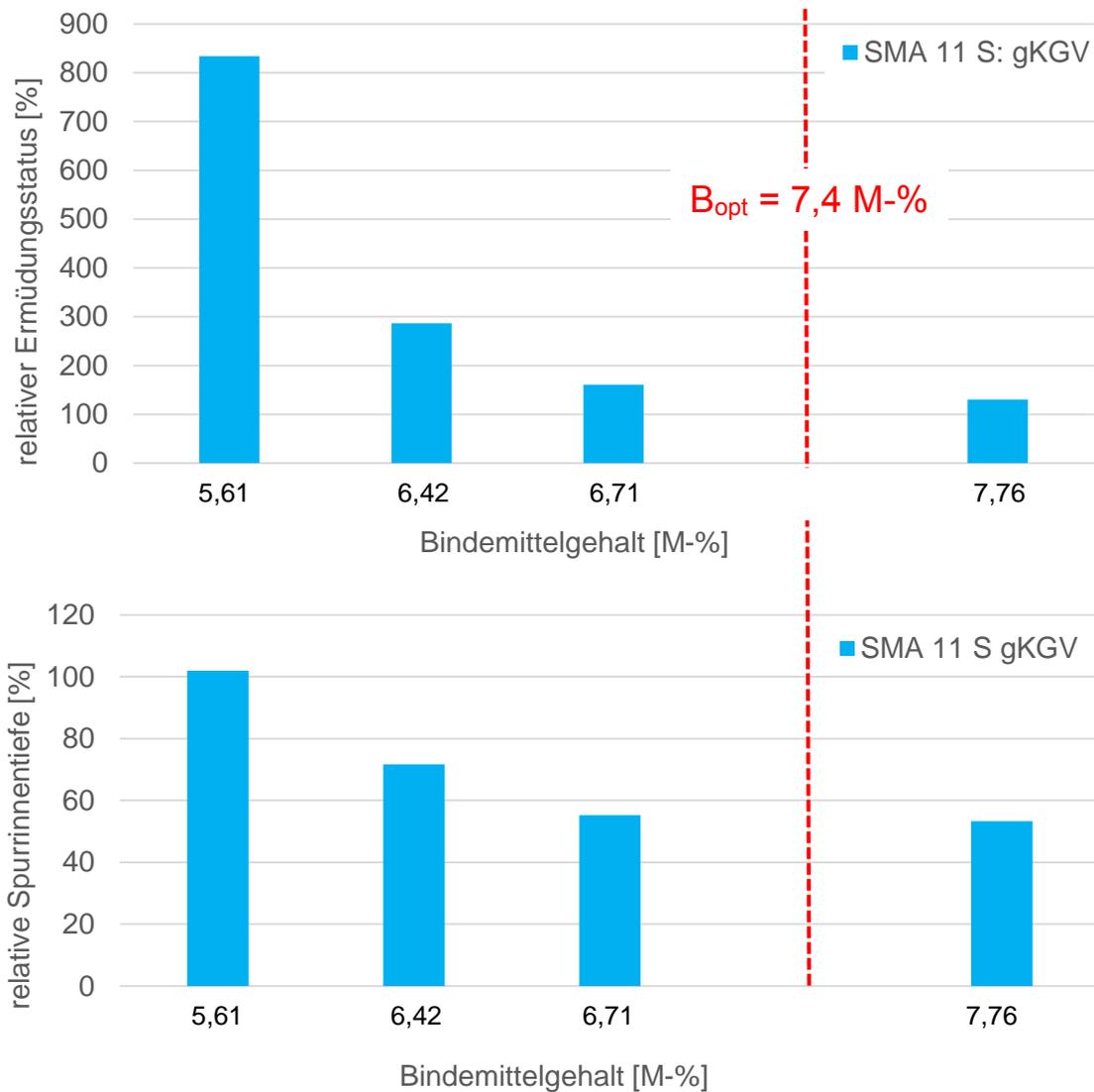


Abb. 35: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, grobe KGV

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).

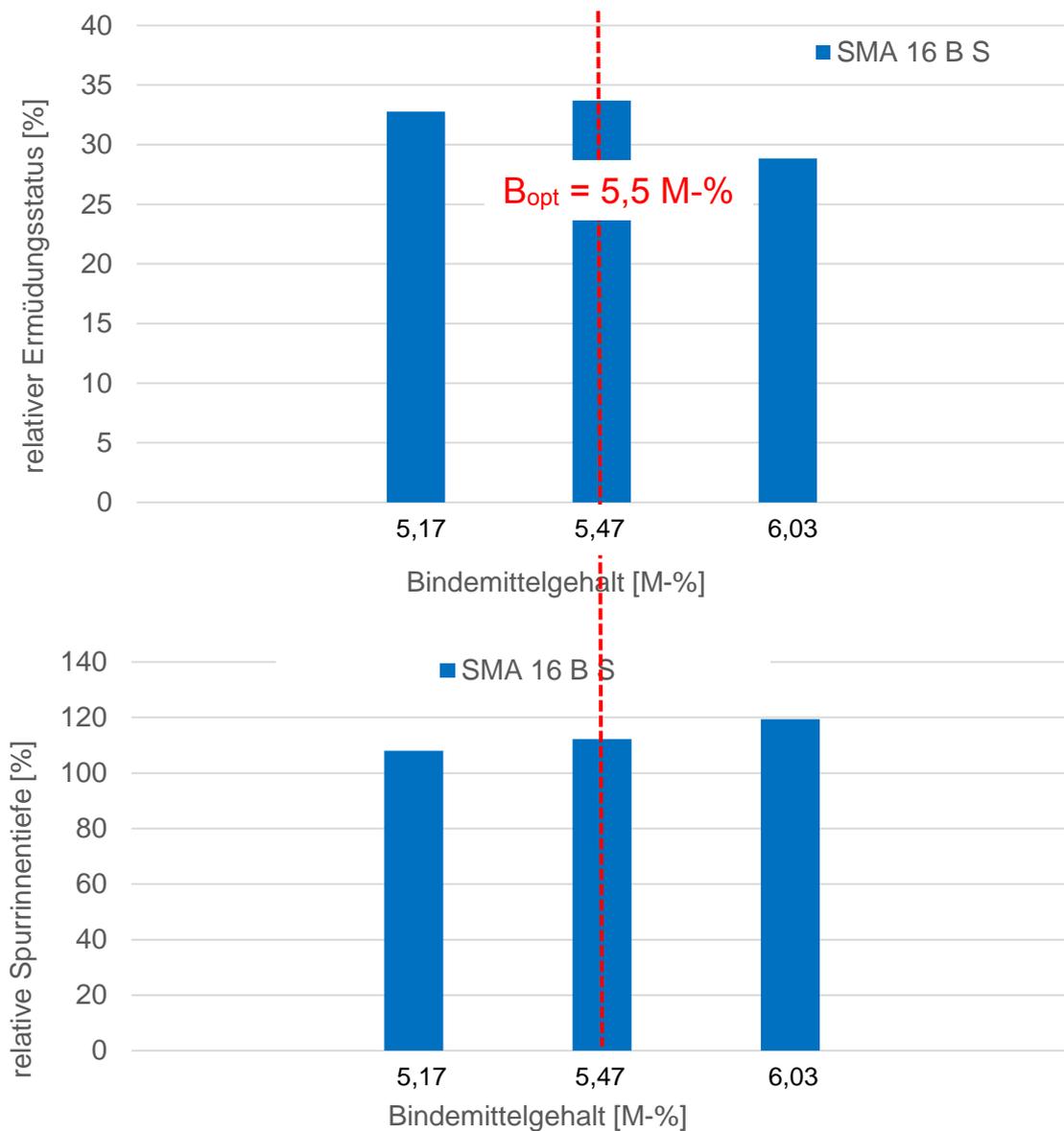


Abb. 36: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 16 B S

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: $B_{opt} = 6,2 \text{ M-\%}$.

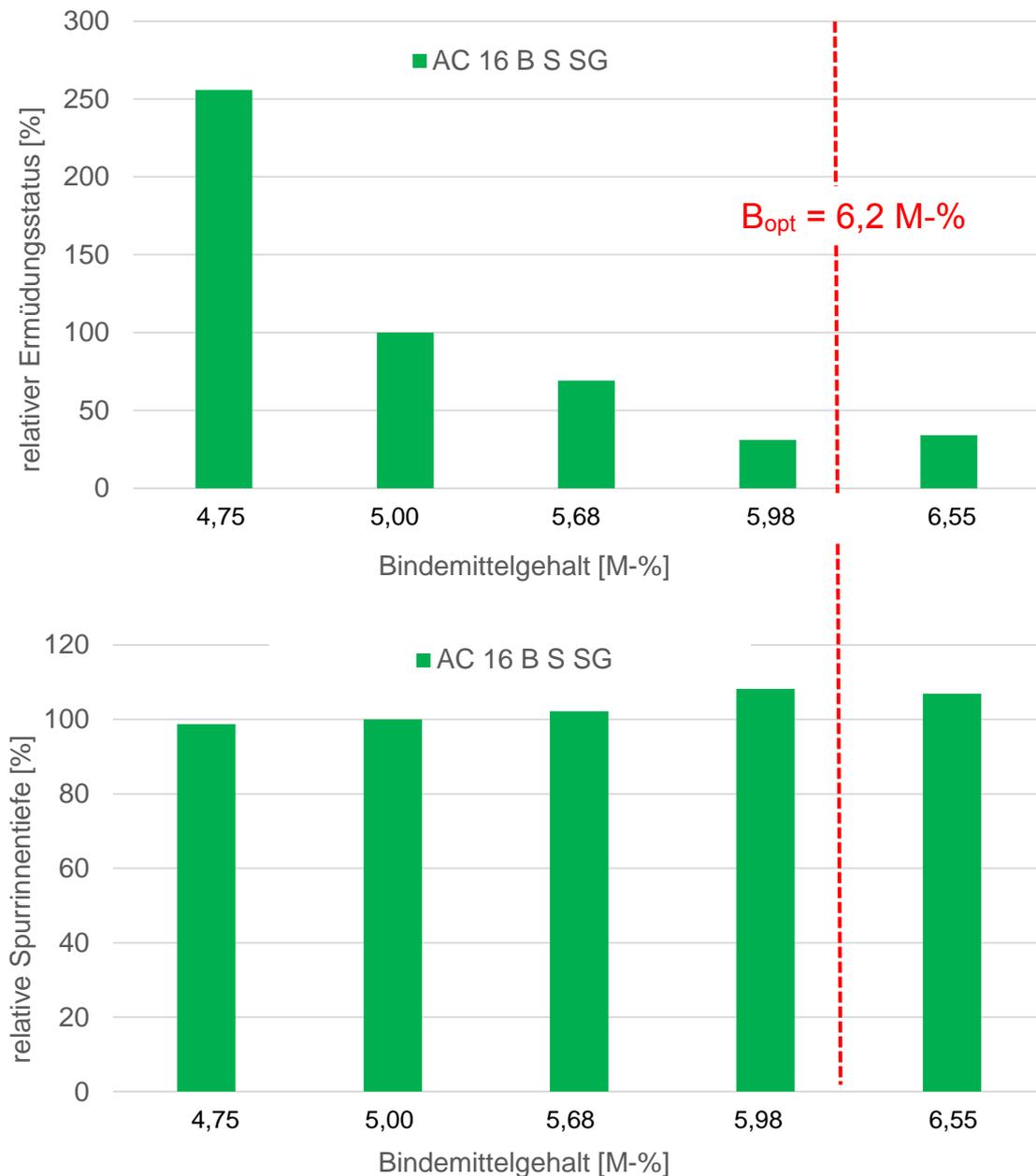


Abb. 37: Optimierung des Bindemittelgehaltes des AC 16 B S SG

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 Ermüdungsrisssbildung 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 Ermüdungsrisssbildung 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/ Fachzeitschriften	bereits begonnen
Vorträge	Fachleute der Branche Ergebnisse vorstellen und diskutieren	in den Arbeitskreisen der FGSV und des DAV/DAI	ab Oktober 2018
Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter/Merk- blätter	Anwendung der Ergebnisse	FGSV	ab 2019
Akademische Ausbildung und berufliche Weiter- bildung	Wissensvermittlung und Einbeziehung neuester Erkenntnisse in die Lehrveranstaltungen	Vorlesungen, Aufbaustudium Asphalttechnik	bereits begonnen
Dissertation	Wissenschaftliche Qualifikation des Bearbeiters des 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 Spurringefährdung 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

	Abbildungsverzeichnis	III
	Tabellenverzeichnis	VI
1.	Einleitung und Zielstellung	1
2.	Stand der Forschung	2
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
3.	Untersuchungsmethodik	7
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
4.	Versuchsergebnisse	35
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
5.	Statistische Auswertung	61
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
6.	Prognoserechnung	76
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
7.	Optimierung der Asphaltgemische	105
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
8.	Zusammenfassung	117
9.	Literaturverzeichnis	120

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_{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 Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper	97
Tab. 6-11	Relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper	98
Tab. 6-12	Relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper	100
Tab. 6-13	Relative Spurrinnentiefe 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"> - erhöhte Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen und gegen Ermüdung - erhöhte Verformungsbeständigkeit - erhöhte Griffigkeit und Verschleißbeständigkeit
Asphaltbinderschicht	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Verformungsbeständigkeit - Beständigkeit gegen Ermüdungsrissbildung (eingeschränkt) - Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen (eingeschränkt)
Asphalttragschicht	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Beständigkeit gegen Ermüdungsrissbildung - Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen (eingeschränkt) - Verformungsbeständigkeit (eingeschränkt)

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 Asphaltzusammensetzung 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 ³]
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 [mm]	Masse der Messprobe [g]	Masse der nicht kubischen Körner [g]	Kornformkennzahl [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 körper	Pendelwerte			MW PK	MW DG	MW Gestein	PSV
Prüf 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 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 α_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 α_T lautet:

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

Gleichung 2

mit:

 α_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

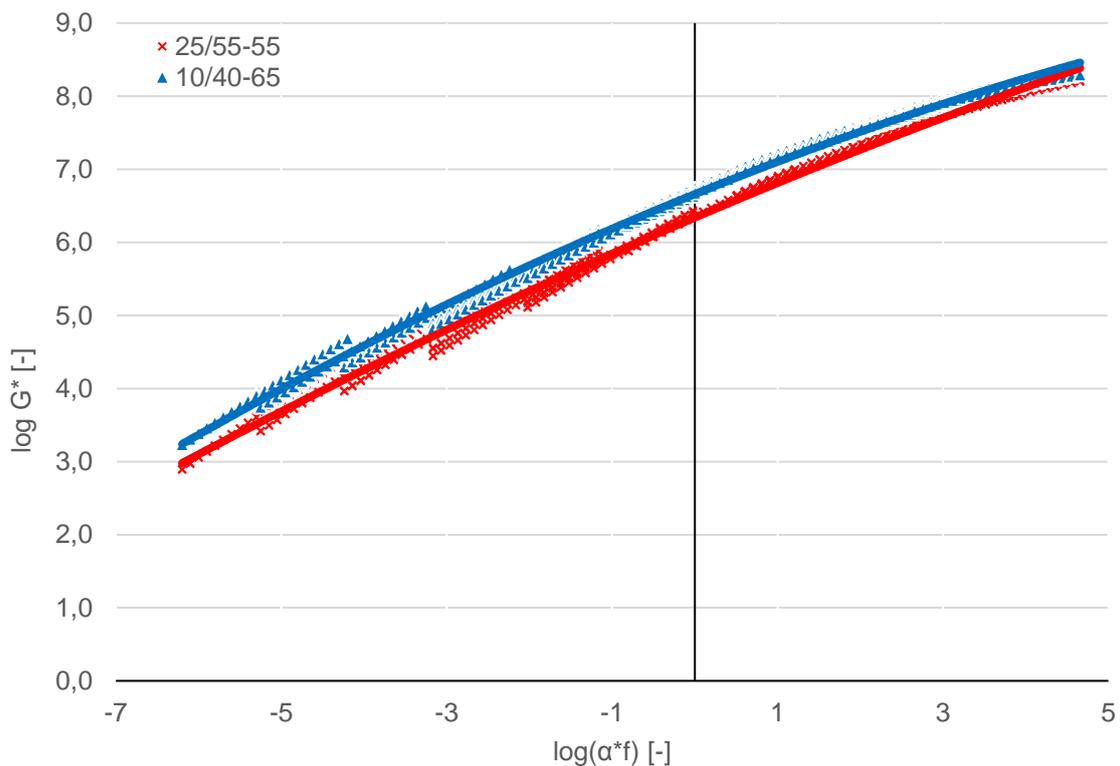


Abb. 3-1: Hauptkurven der untersuchten Bitumen

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 [cm²/g]
- O_{spk} spezifische Oberfläche [cm²/cm³]
- M_K Massenanteil der Gesteinsfraktion [Gew.-%/100]
- P_{RK} Gesteinsrohichte [g/cm³]
- f_{sK} Faktor schlecht geformter Körner [cm²/g]
- M_{sK} Anteil schlecht geformter Körner [Gew.-%/100]
- BM Bindemittelbedarf
- B_f [g/cm²*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.

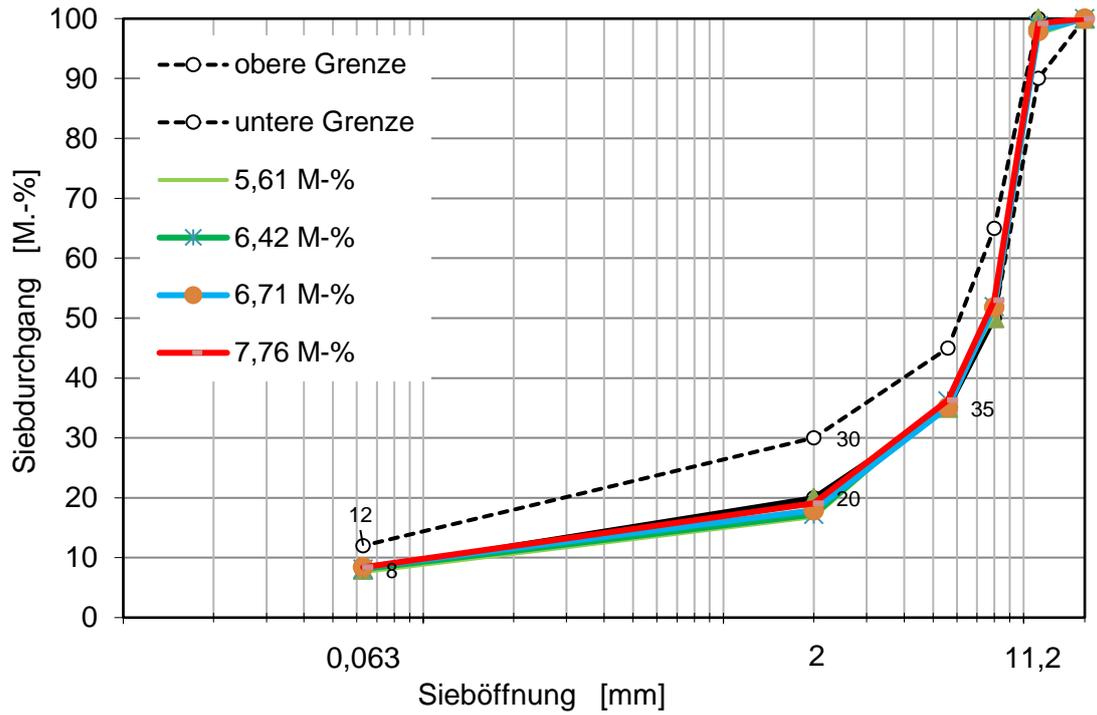


Abb. 3-2: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

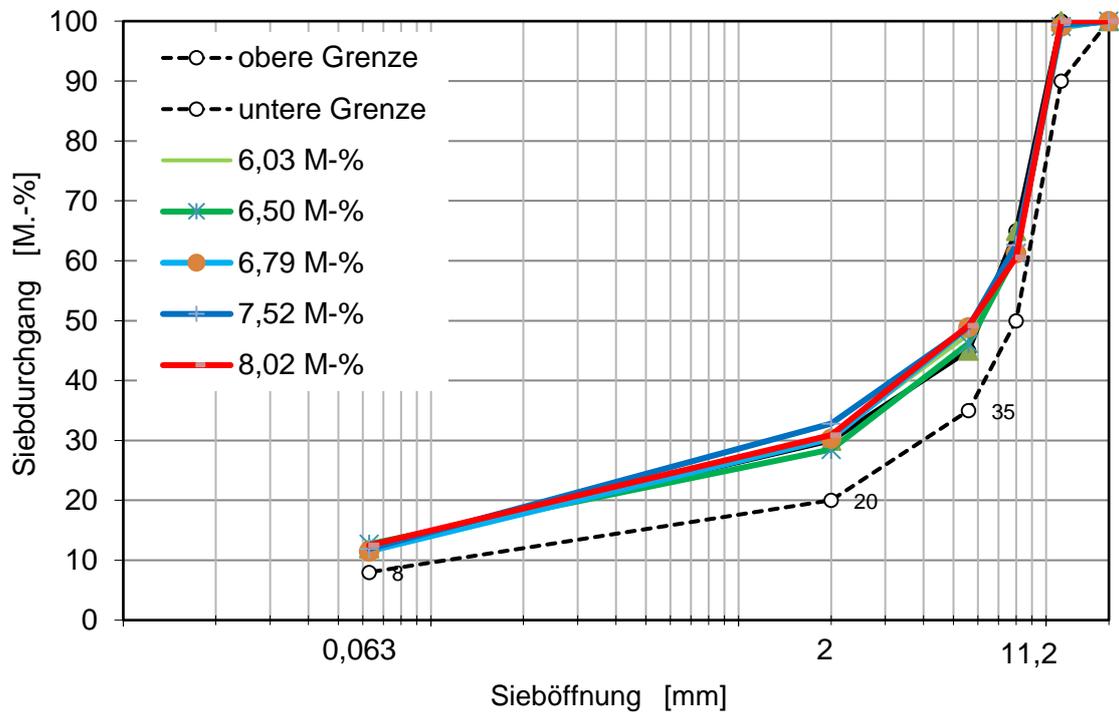


Abb. 3-3: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung

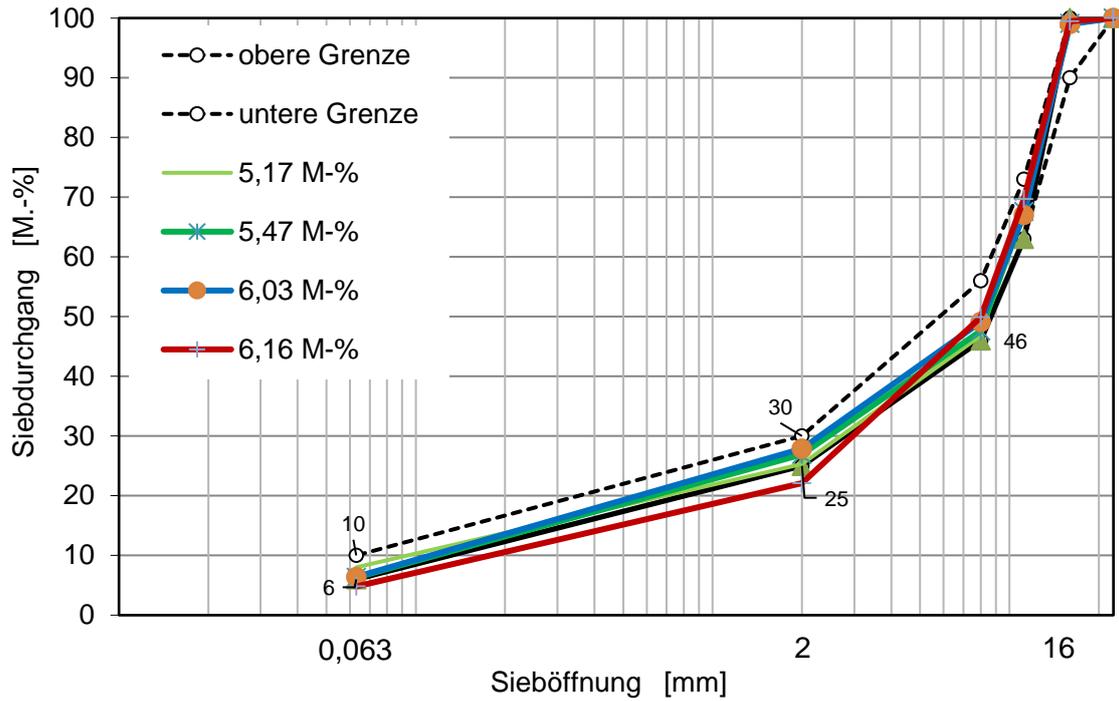


Abb. 3-4: Sieblinie der Asphaltgemische SMA 16 B S

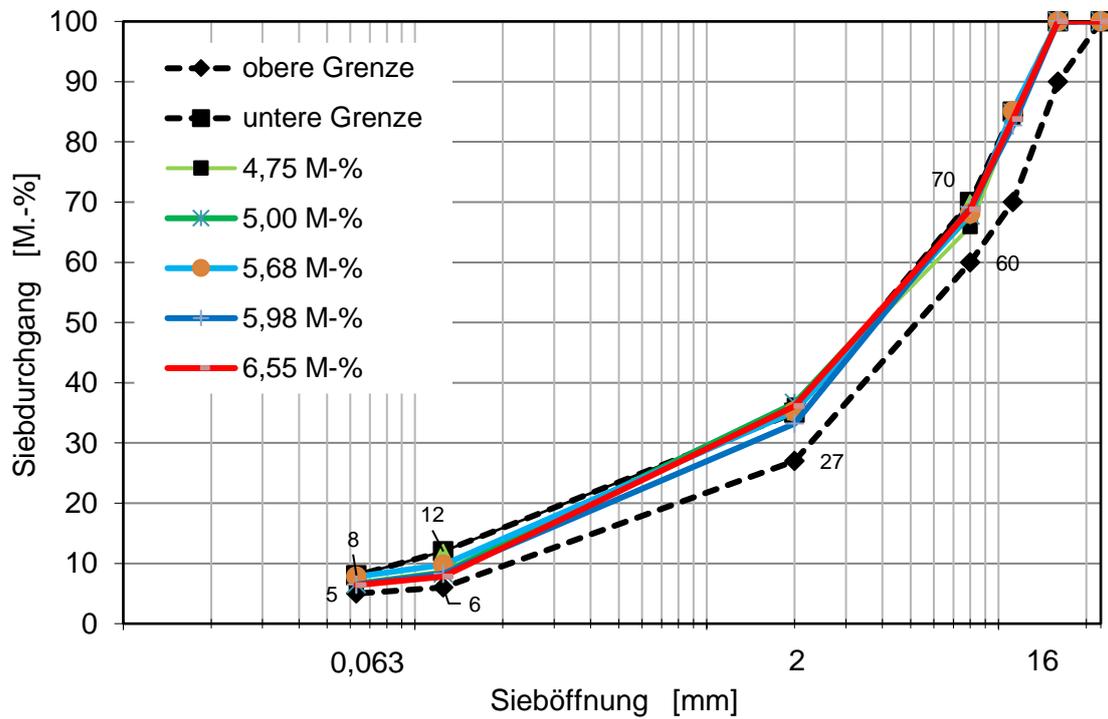


Abb. 3-5: Sieblinie der Asphaltgemische AC 16 B S SG

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]	$\epsilon_{ele,anf}$ [‰]	σ_u [N/mm ²]	σ_o [N/mm ²]
-10; 5; 20; 35	10; 5; 3; 1; 0,1; 0,3	ca. 0,065	0,035	temperatur- und 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]

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

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:

- ϵ_{el} elastische vertikale Dehnung [‰]
- H Probekörperhöhe [mm]
- Δu Differenz von maximaler und minimaler vertikaler Gesamtverformung [mm]
- ν 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 ν [-]
-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]
- ΔF Differenz von maximaler und minimaler Kraft [N]
- Δu Differenz von maximaler und minimaler vertikaler Gesamtverformung [mm]
- D Durchmesser des Probekörpers [mm]
- ν 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 α_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:

- α_T Verschiebungsfaktor [-]
- Φ 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]
- α_T Verschiebungsfaktor (Gleichung10) [-]
- 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:

δ 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

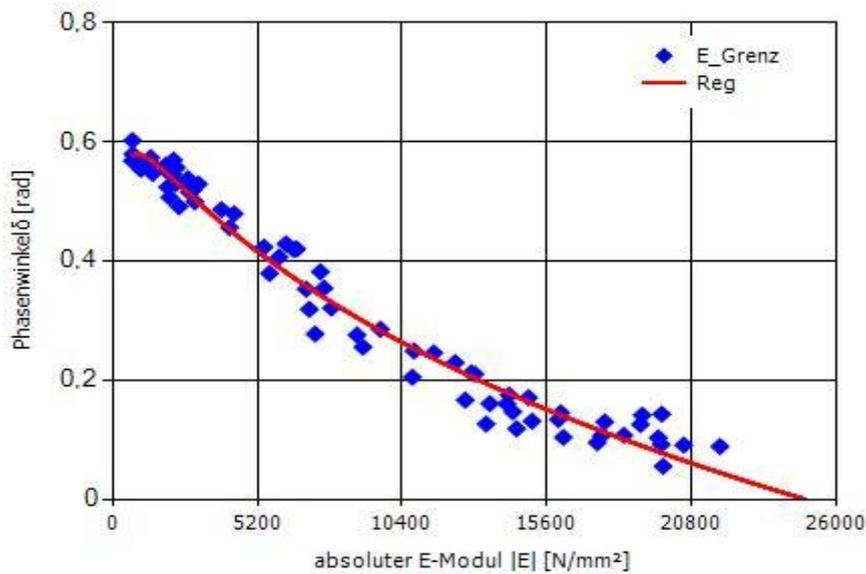


Abb. 3-7: grafische Darstellung der Bestimmung der Grenzwerte

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.

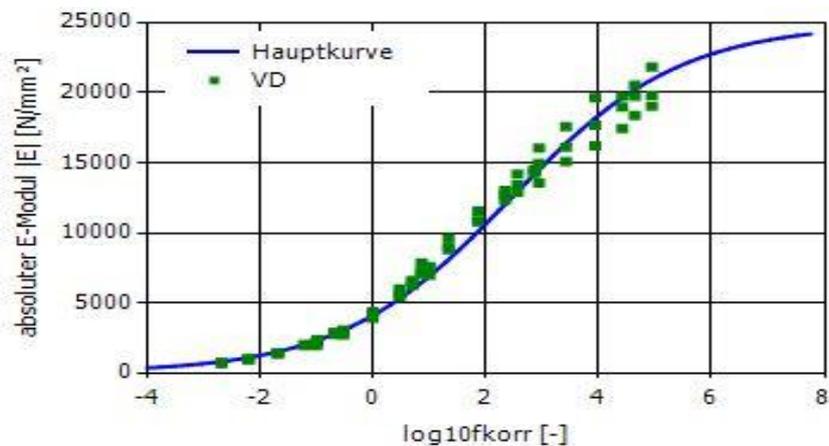


Abb. 3-8: Hauptkurve eines Asphaltgemisches

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.

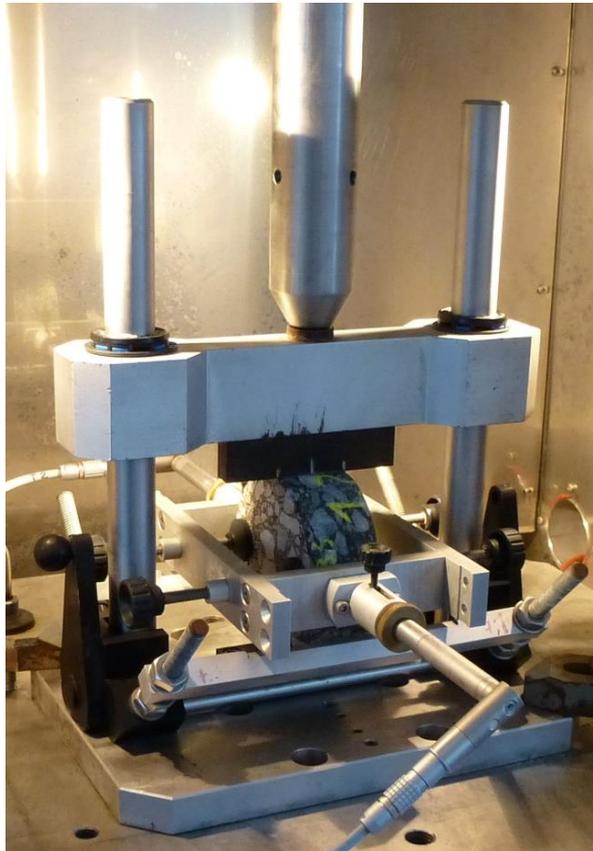


Abb. 3-9: Versuchsaufbau des Spaltzug-Schwellversuches

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:

ϵ_{el} elastische vertikale Dehnung [‰]

D Probekörperdurchmesser [mm]

Δu Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung [mm]

ν 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]

ΔF Differenz von maximaler und minimaler Kraft [N]

Δu Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung [mm]

H Probekörperhöhe [mm]

ν 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_{Makro} definiert. Diese Ermüdungslastwechselzahl kann über das Maximum der Funktion von ER_N ermittelt werden.

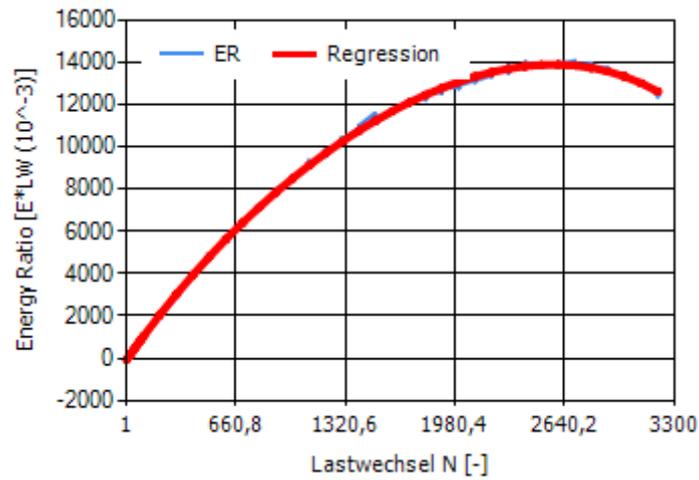


Abb. 3-10: Bestimmung der Ermüdungslastwechselzahl N_{Makro}

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_{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.

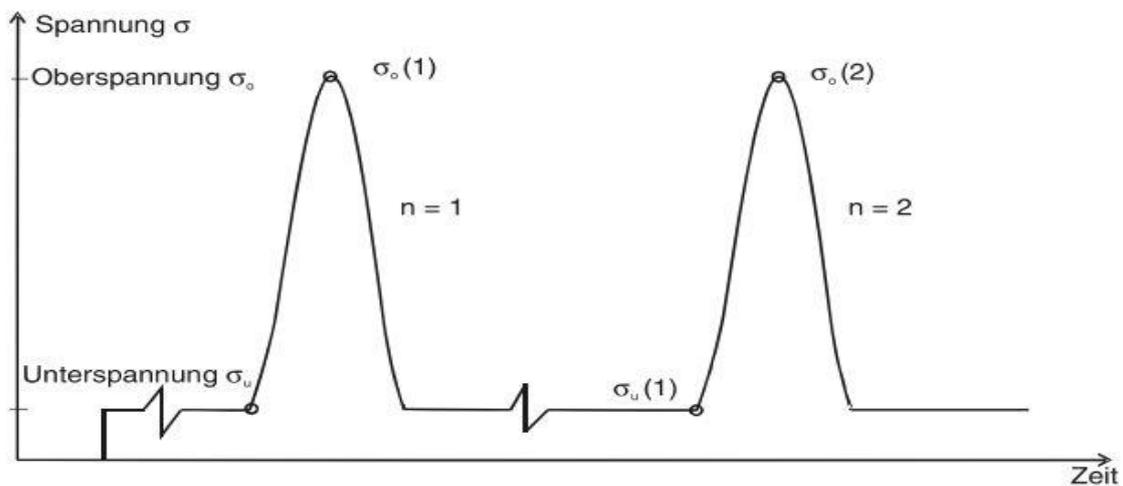


Abb. 3-11: Belastungsschema nach TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 [TP Asphalt-StB]

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 ; ε_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:

ε_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]

ε_i^* Dehnungsrate des Probekörpers im Messpunkt i [%*10⁻⁴/n]

ε_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° 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 [°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.

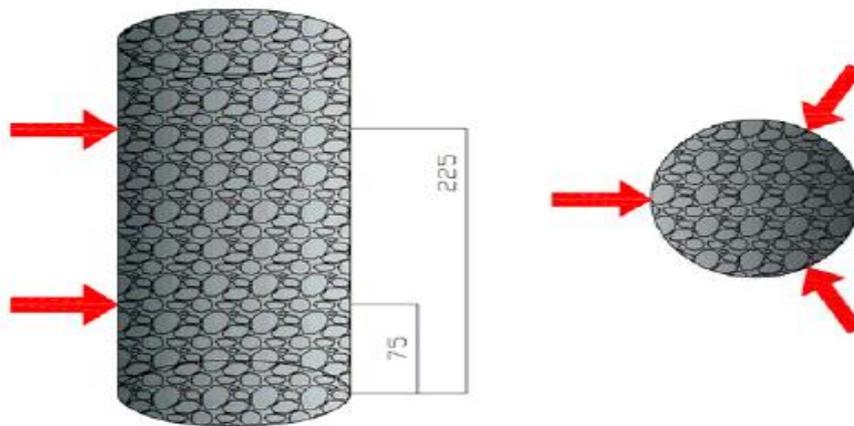


Abb. 3-15: Anordnung des Magnetmesssystems [Wellner 2007]

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].

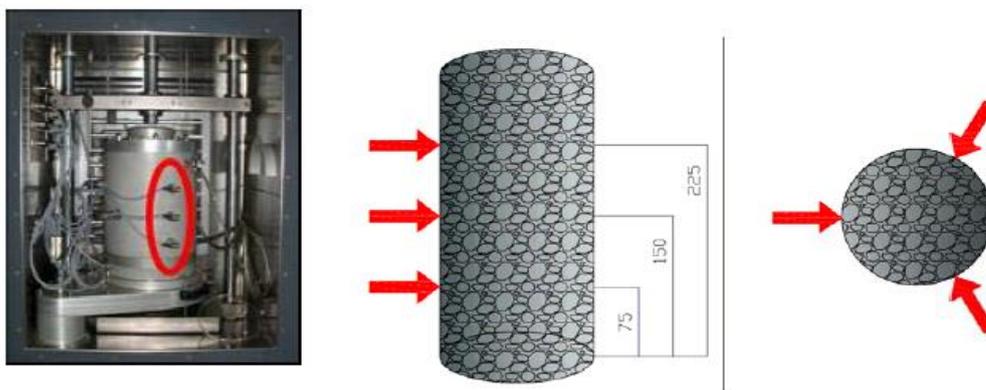


Abb. 3-16: Anordnung des radialen Wegmesssystems [Wellner 2007]

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 kraftgeregelte, 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 kraftgeregelten, 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:

σ_{dev} deviatorische Spannung [MPa]

σ_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 [°C]	$\sigma_{2,3}$ [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 ; ϵ_i) nach Gleichung 19 berechnet.

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

mit:

ϵ_{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

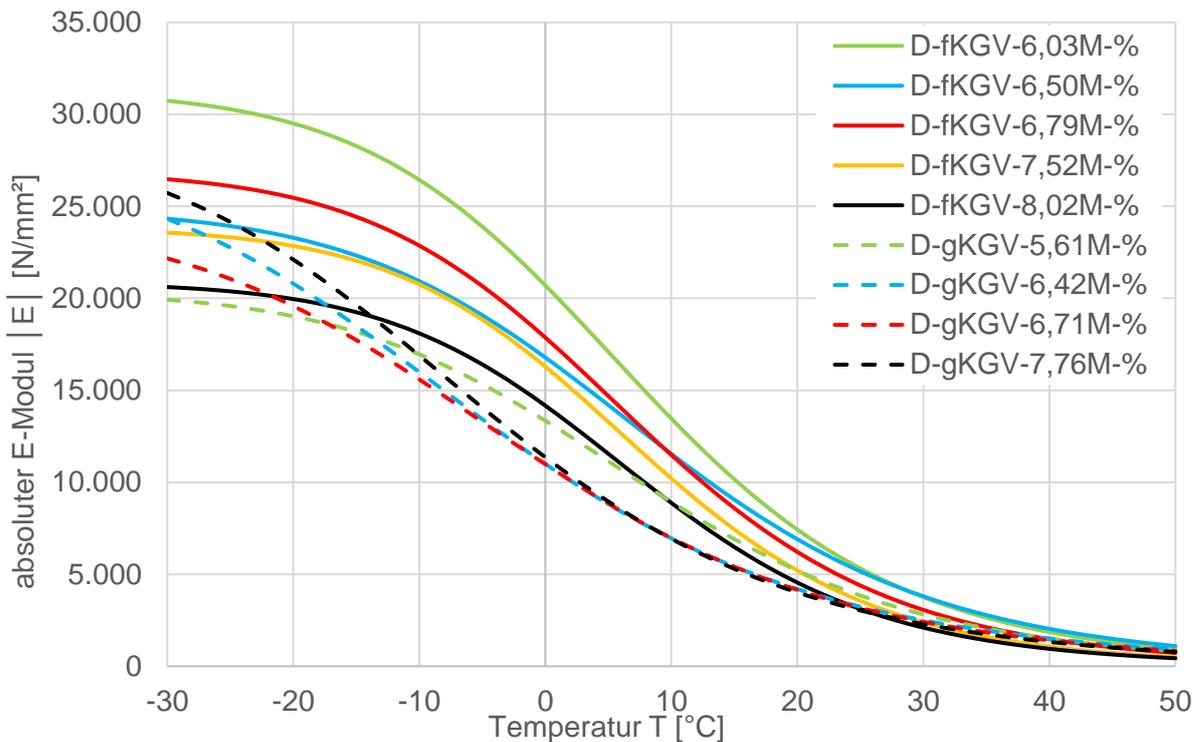


Abb. 4-1: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Deckschichtvarianten

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.

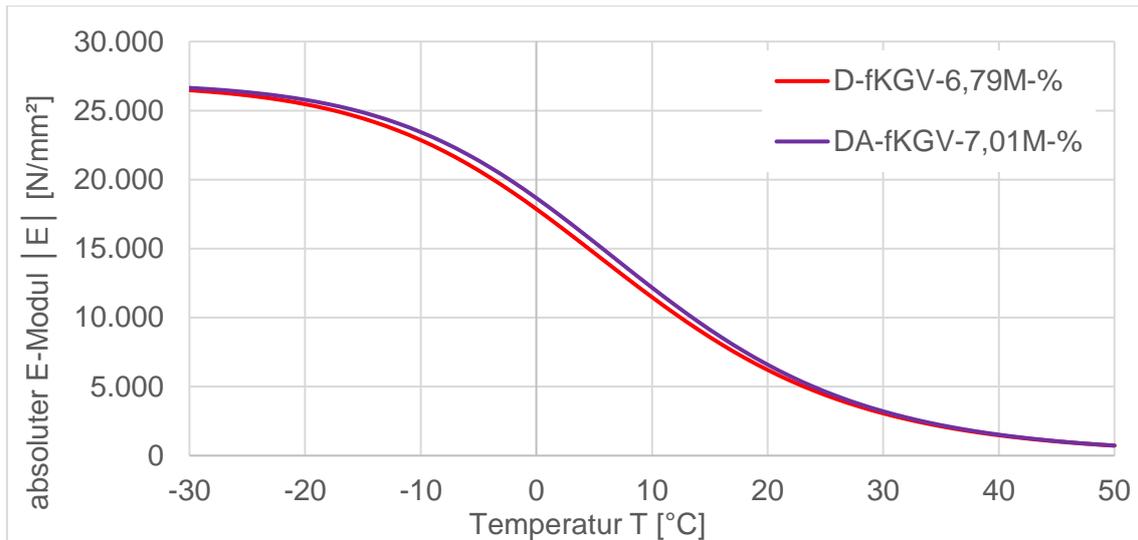


Abb. 4-2: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Deckschichtvariante mit unterschiedlicher Bitumensorte

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.

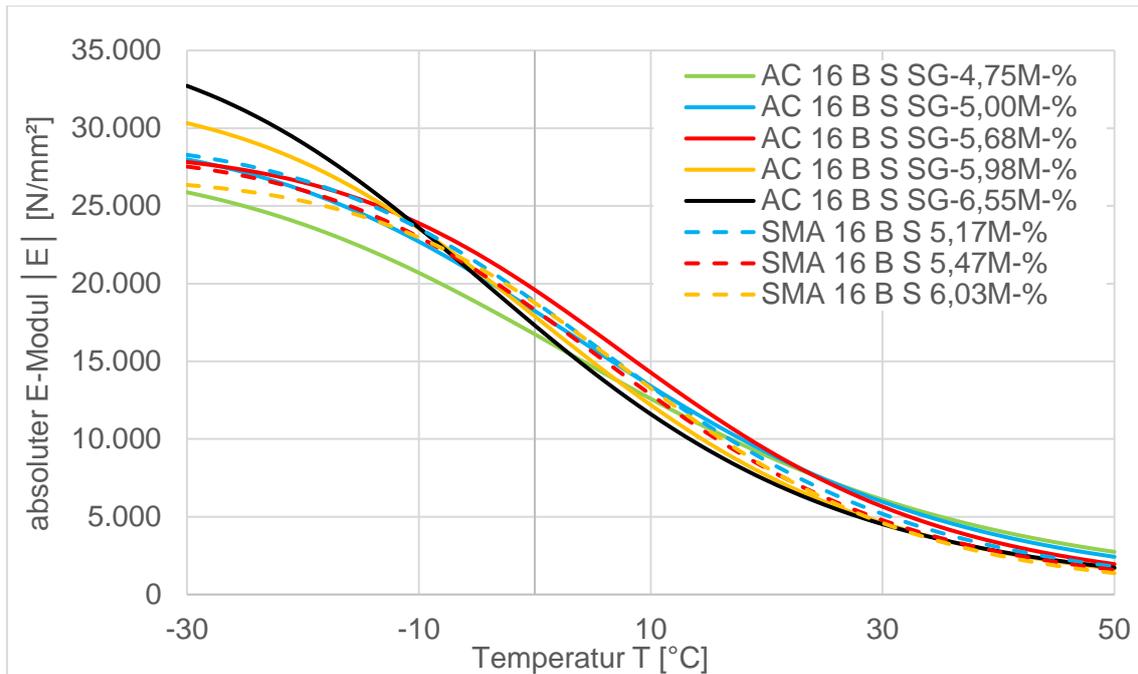


Abb. 4-3: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Binderschichtvarianten

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 Asphalzzusammensetzungen 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.

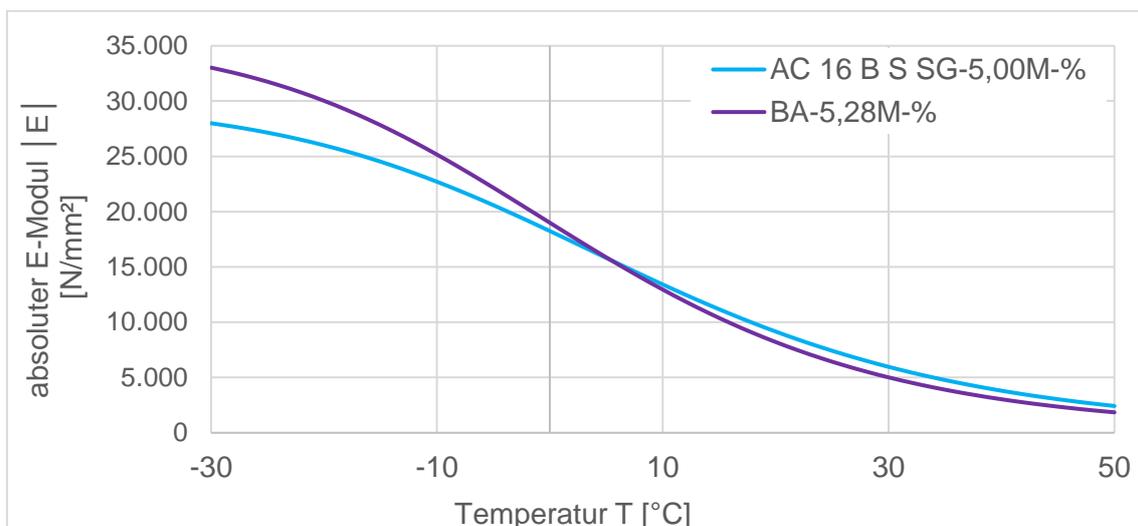


Abb. 4-4: Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion der Binderschichtvariante mit unterschiedlicher Bitumensorte

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.

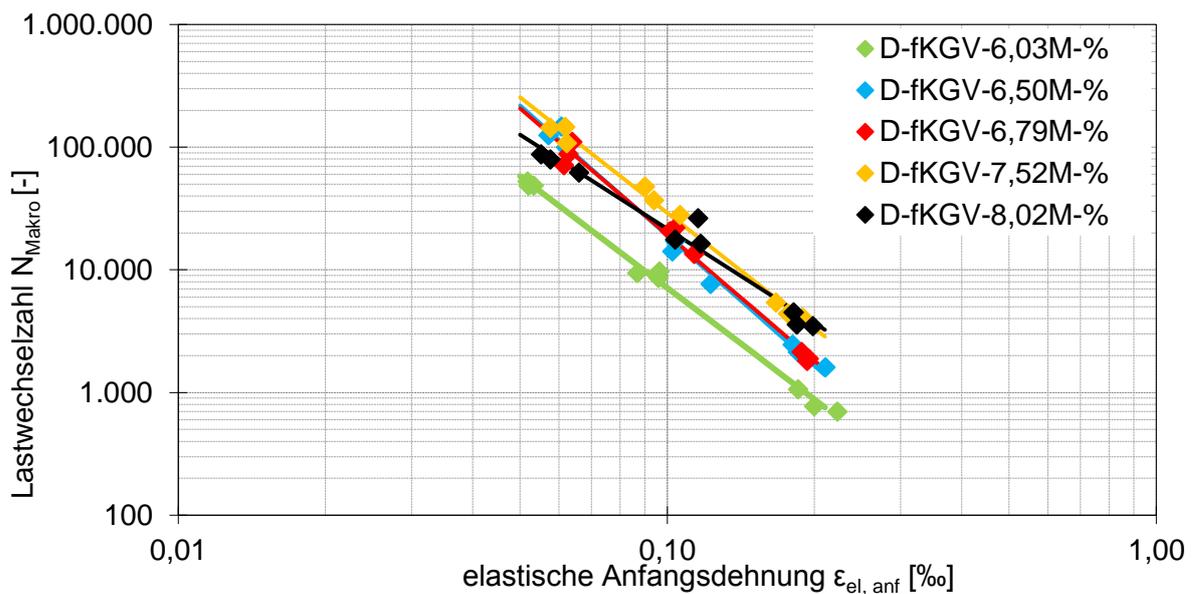


Abb. 4-5: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; feine Korngrößenverteilung

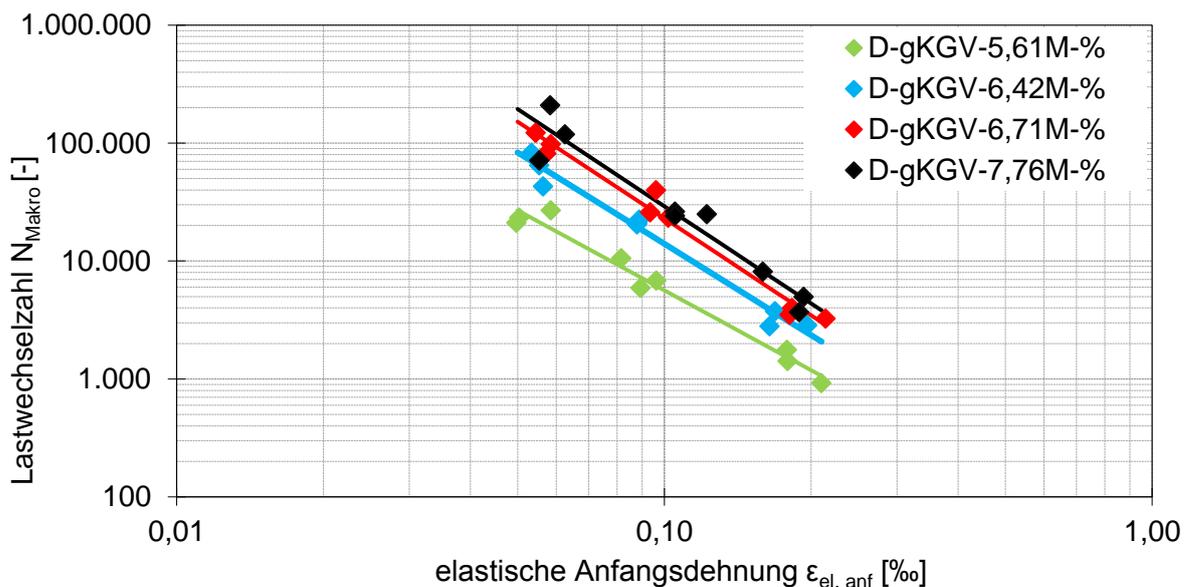


Abb. 4-6: Ermüdungsfunktion des SMA 11 S; grobe Korngrößenverteilung

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.

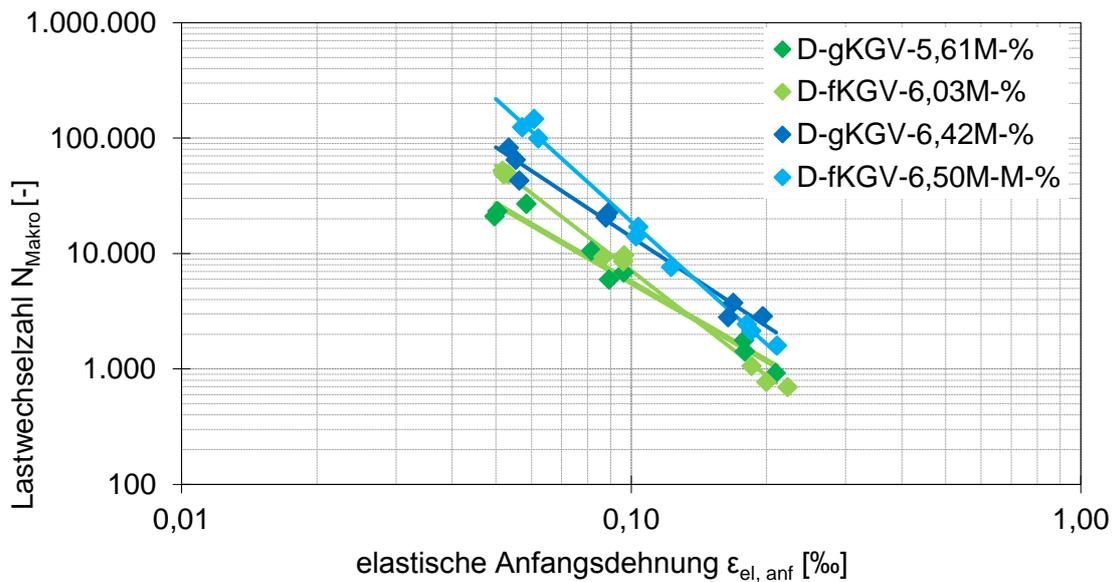


Abb. 4-7: Einfluss der Korngrößenverteilung der Deckschichtvarianten auf die Ermüdungsfunktion

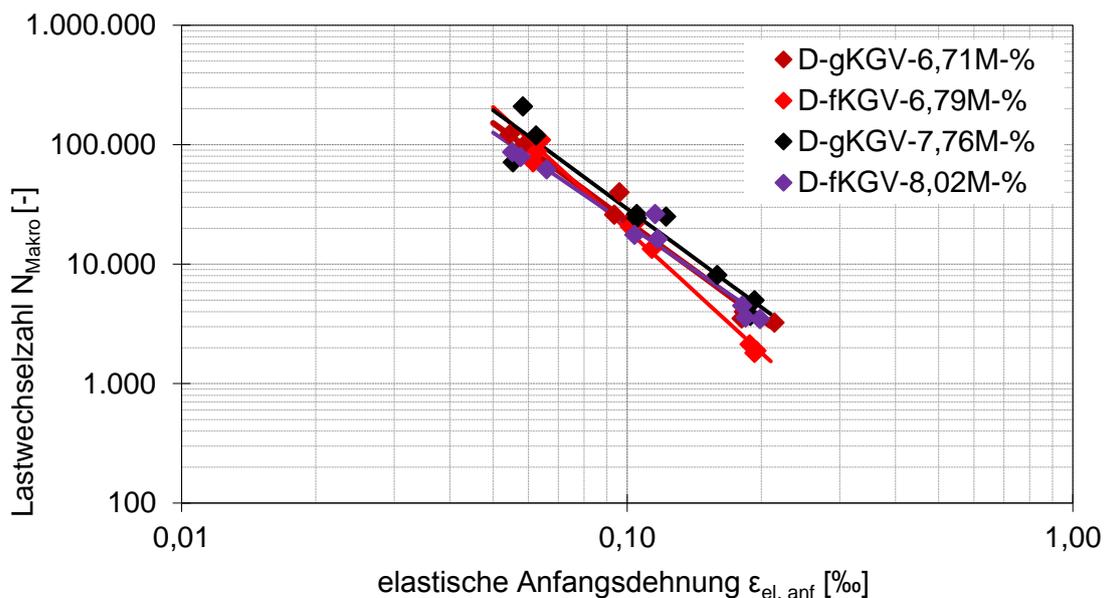


Abb. 4-8: Einfluss der Korngrößenverteilung der Deckschichtvarianten auf die Ermüdungsfunktion

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.

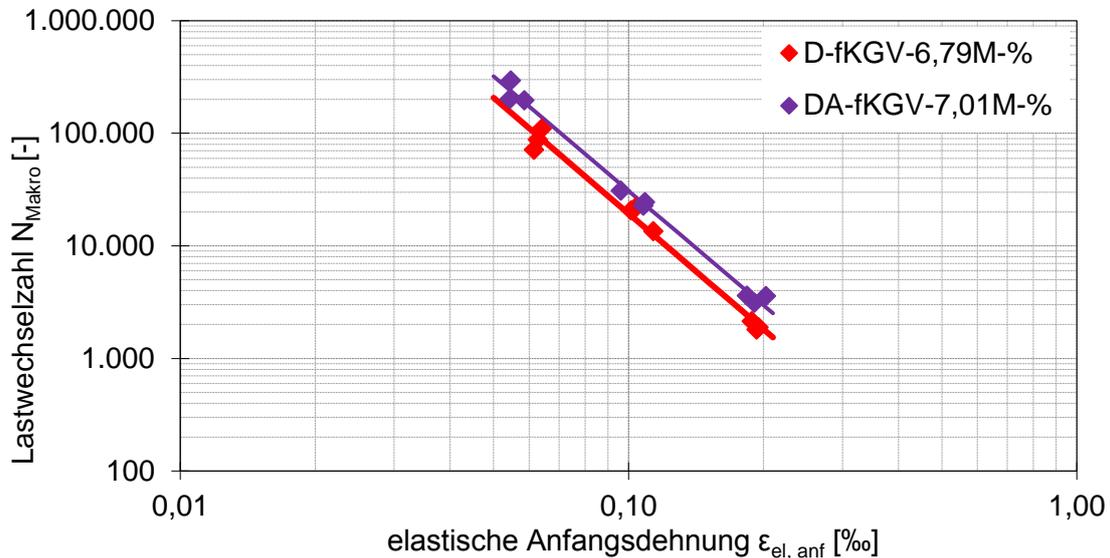


Abb. 4-9: Einfluss der Bitumensorte der Deckschichtvariante auf das Ermüdungsverhalten

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°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-%.

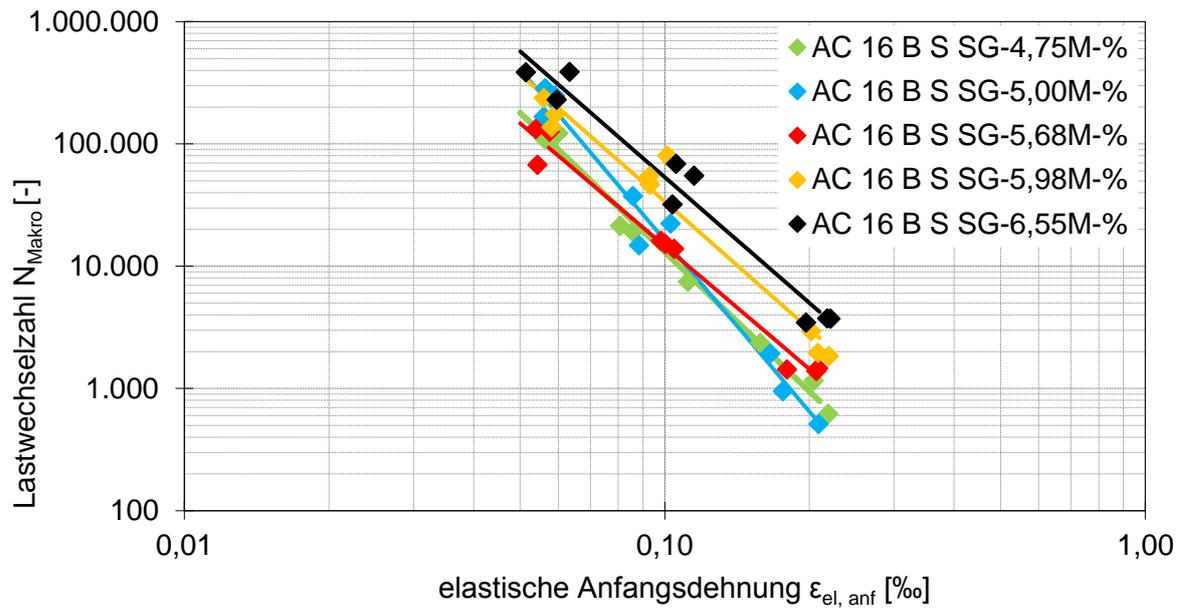


Abb. 4-10: Ermüdungsfunktion des AC 16 B S SG

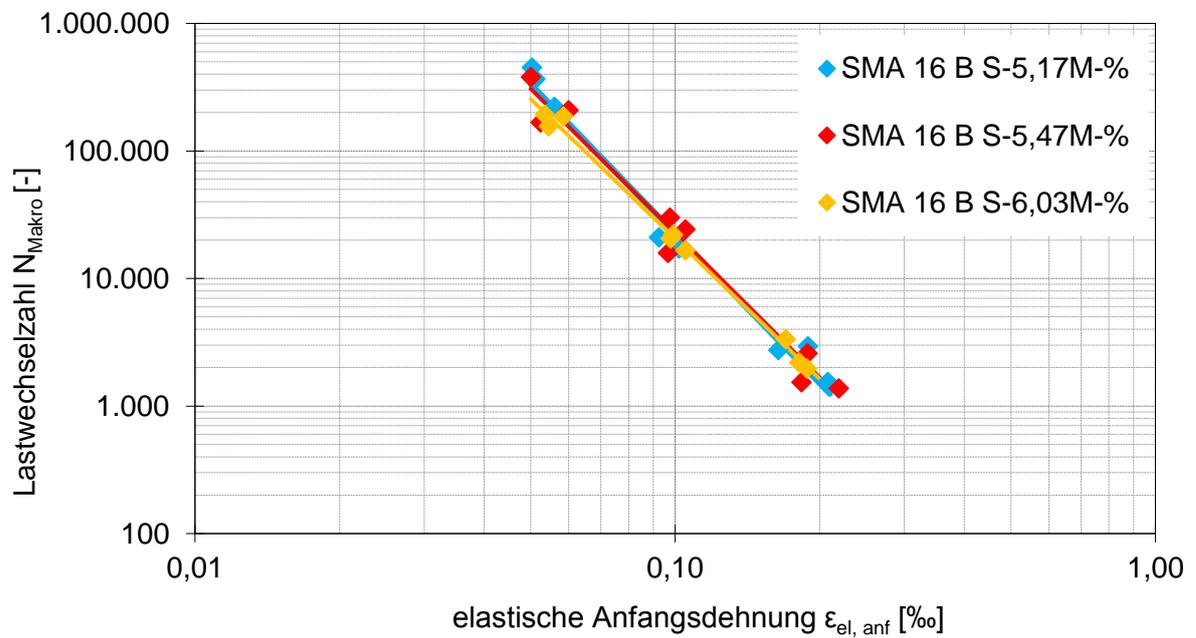


Abb. 4-11: Ermüdungsfunktion des SMA 16 B S

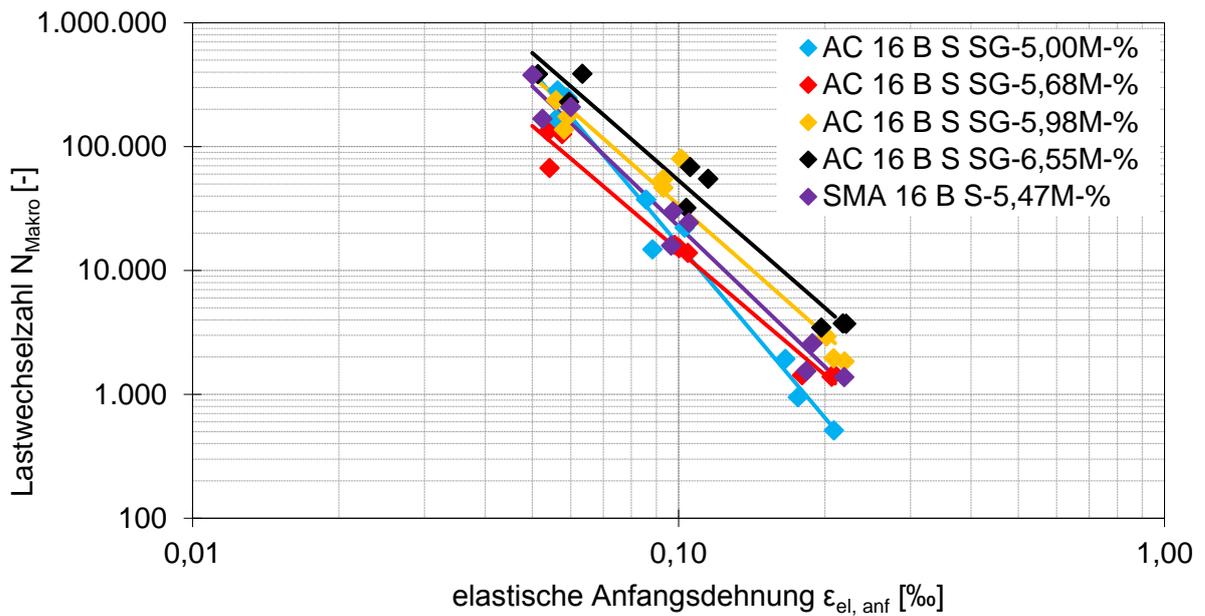


Abb. 4-12: Einfluss der Korngrößenverteilung der Binderschichtgemische

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 $\epsilon_{el, anf} \leq 0,12 \text{ ‰}$.

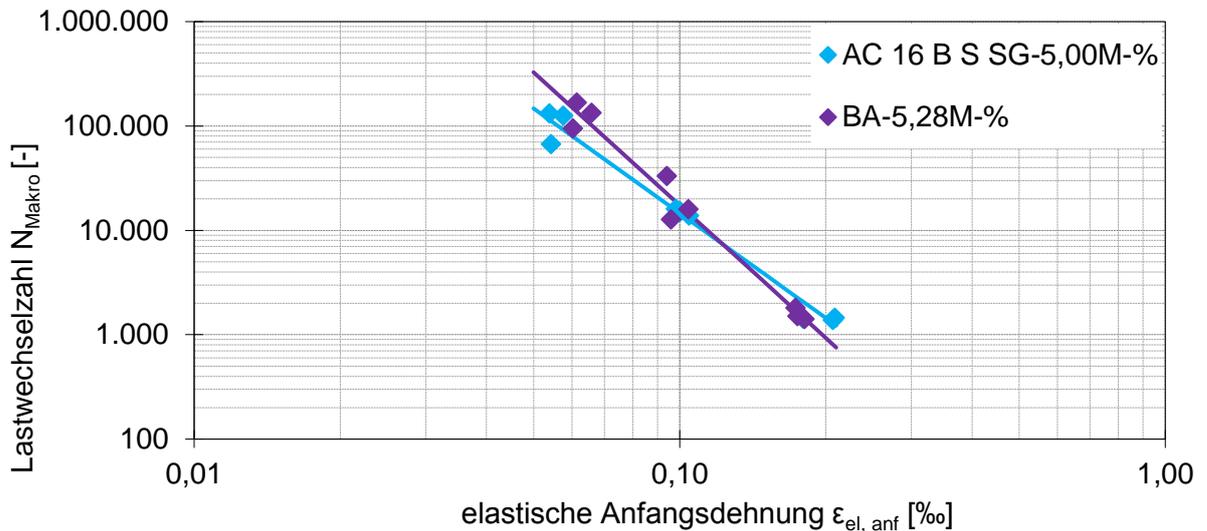


Abb. 4-13: Einfluss der Bitumensorte der Binderschichtvariante

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:

σ_{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:

ε_{Bruch} Bruchdehnung [‰]

σ_{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.

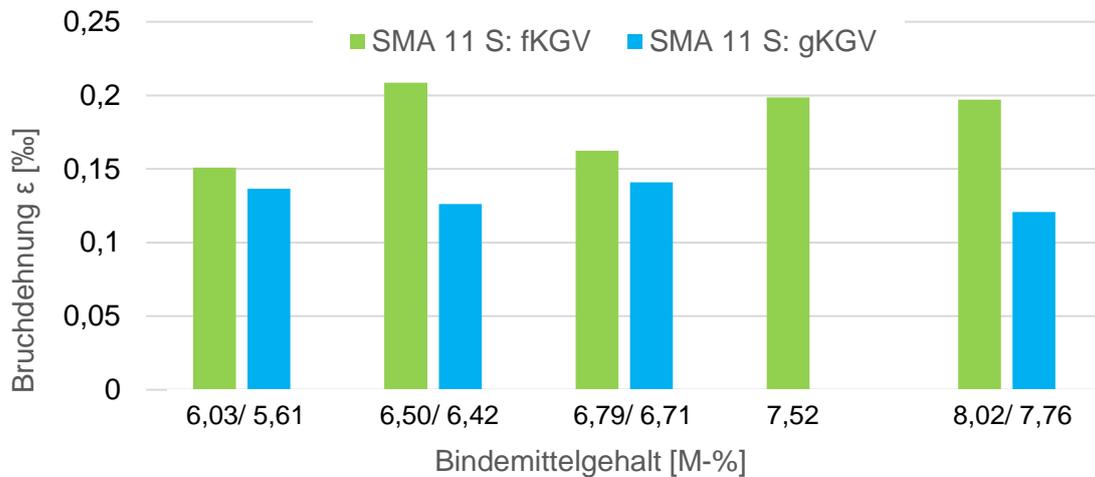


Abb. 4-14: ermittelte Bruchdehnungen der Deckschichtgemische

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.

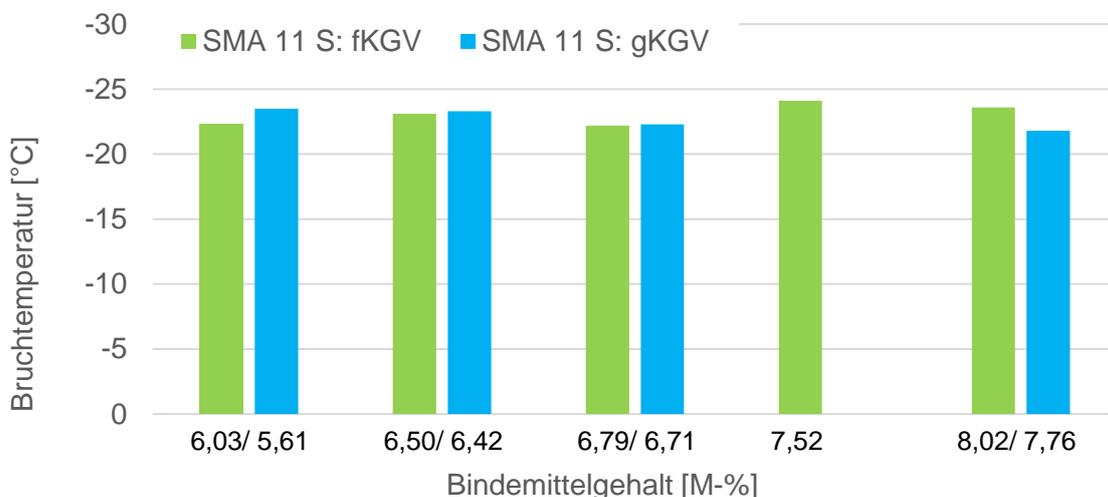


Abb. 4-15: Bruchtemperaturen der Deckschichtgemische

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.

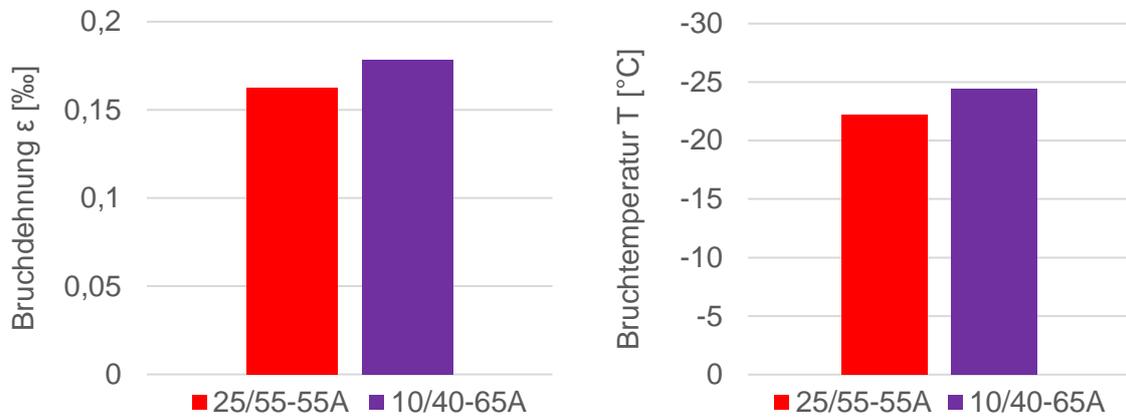


Abb. 4-16: Einfluss der Bitumensorte auf das Tieftemperaturverhalten beim SMA 11 S

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.

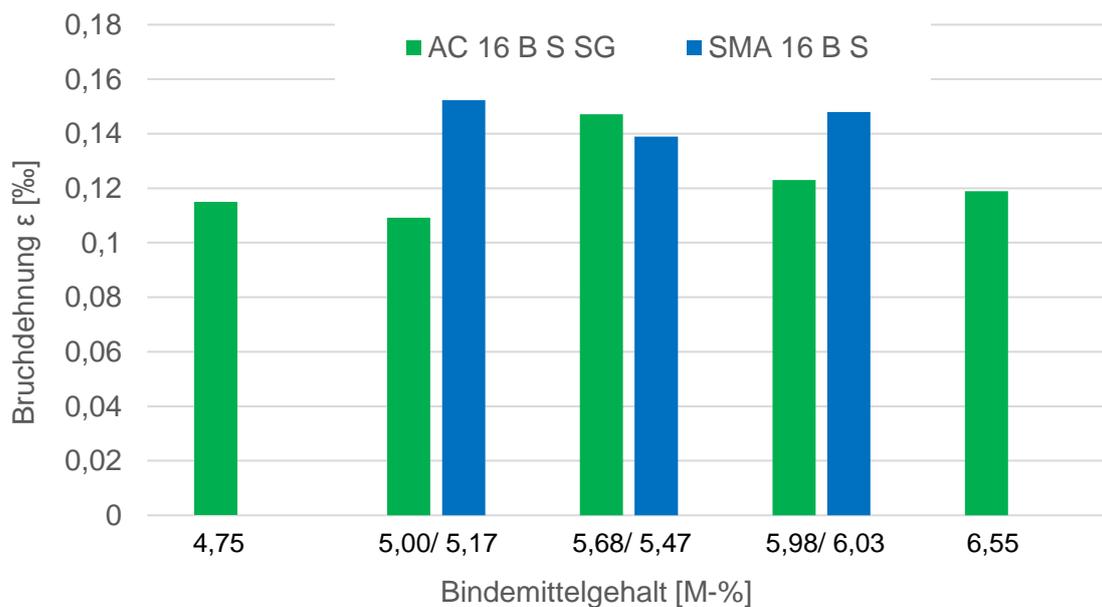


Abb. 4-17: ermittelte Bruchdehnungen der Binderschichtgemische

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.

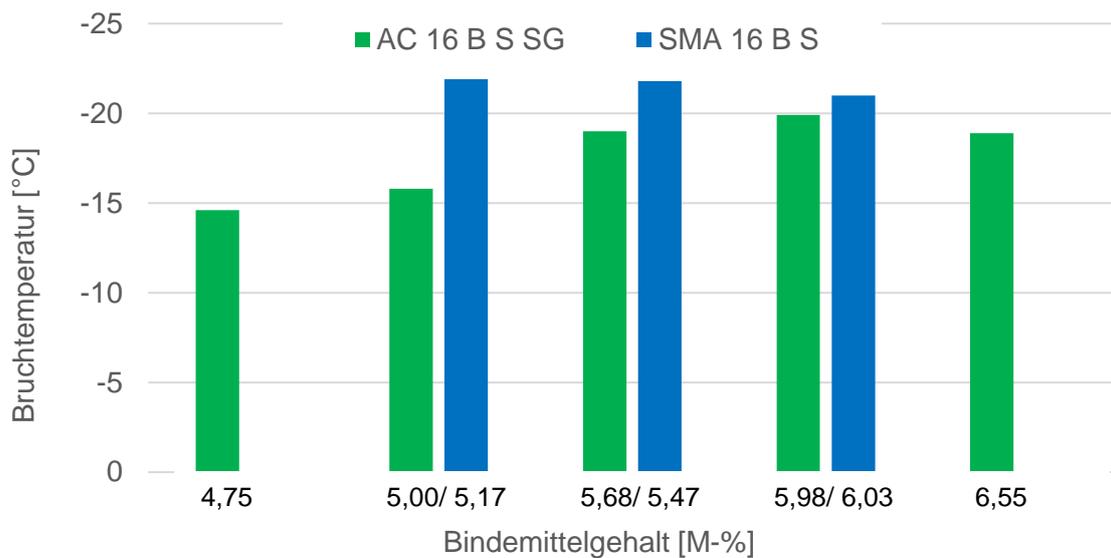


Abb. 4-18: Bruchtemperaturen der Binderschichtgemische

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.

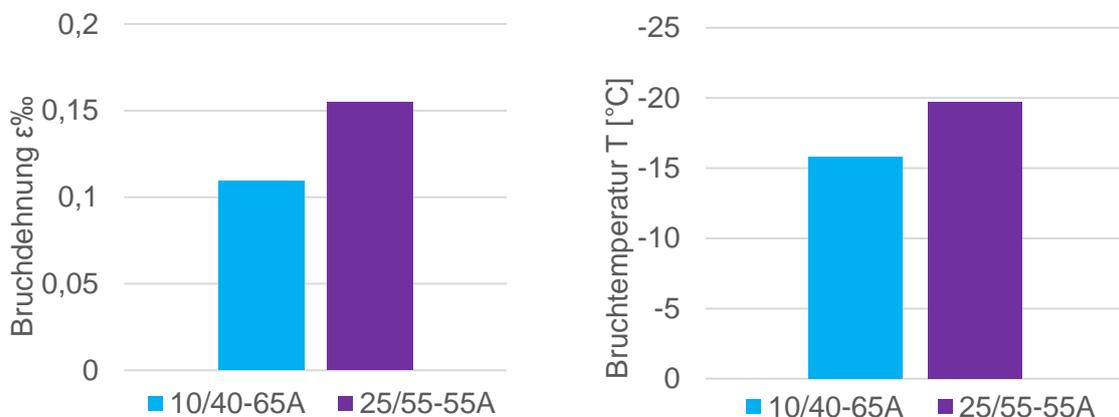


Abb. 4-19: Einfluss der Bitumensorte auf das Tieftemperaturverhalten beim AC 16 B S SG

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.

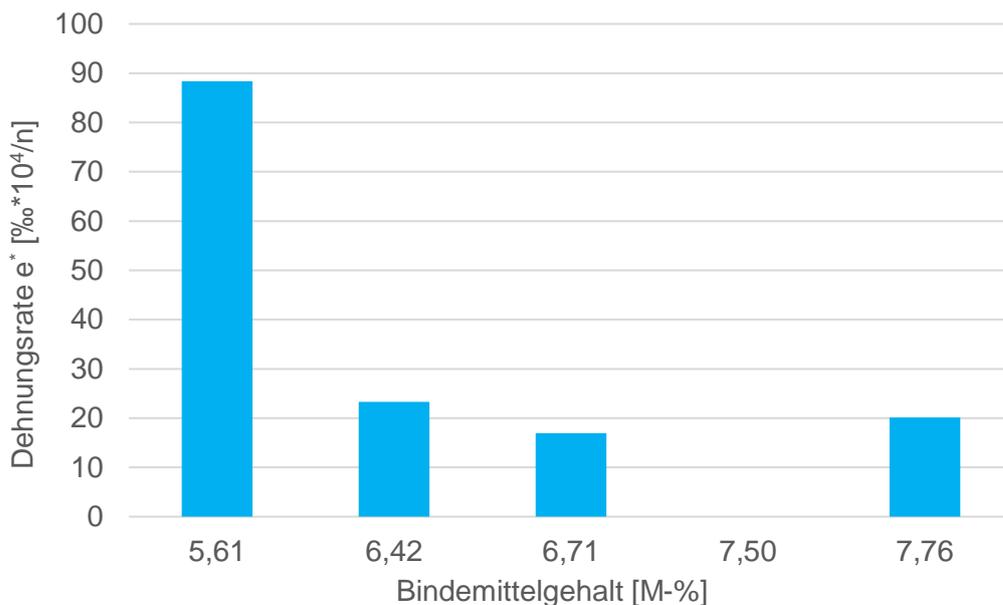


Abb. 4-20: Dehnungsraten im Wendepunkt für den SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung

Bindemittelgehalt [M-%]	5,61	6,42	6,71	7,76
Dehnung im WP [‰]	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 ‰ 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.

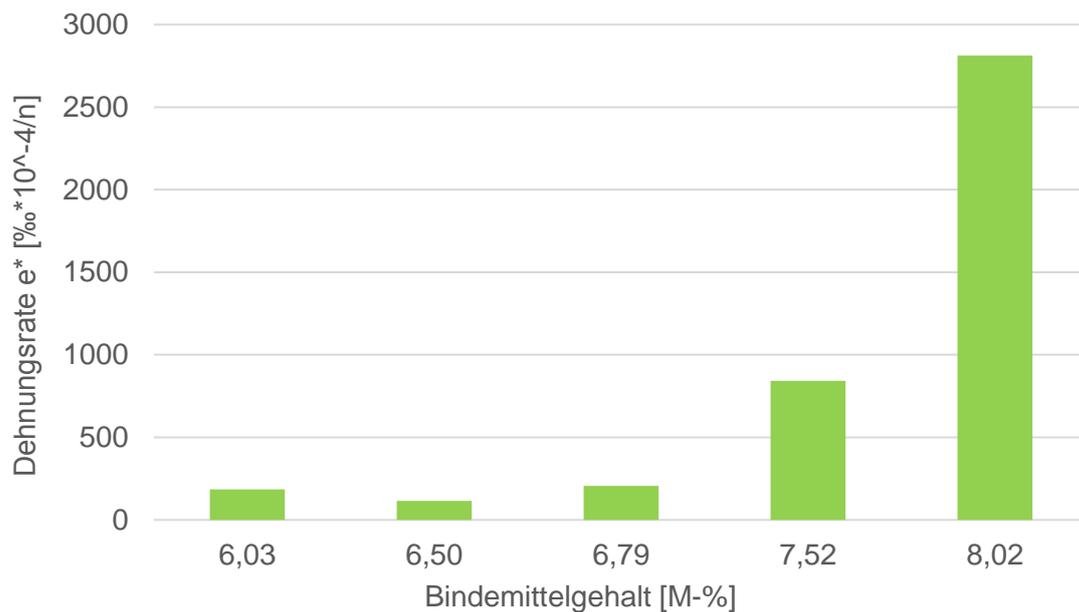


Abb. 4-21: Dehnungsraten bei einer Dehnung von 40 ‰ für den SMA 11 S: feine KGV

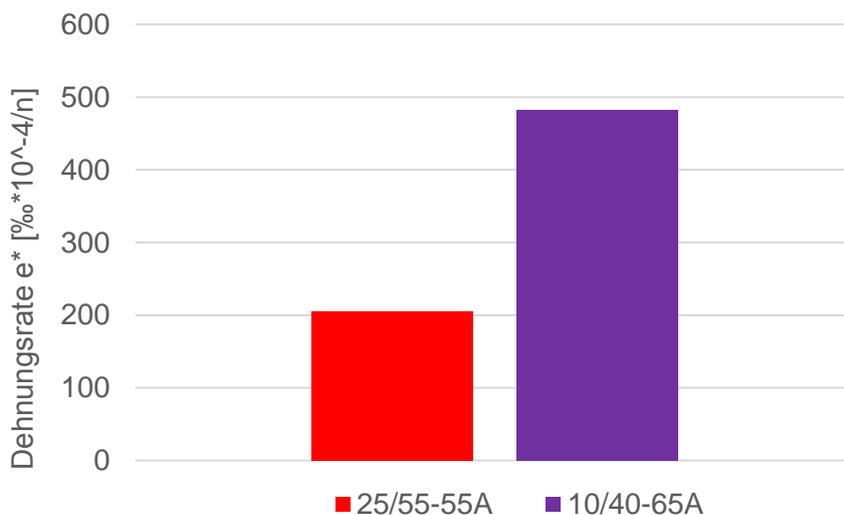


Abb. 4-22: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten des SMA 11 S

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.

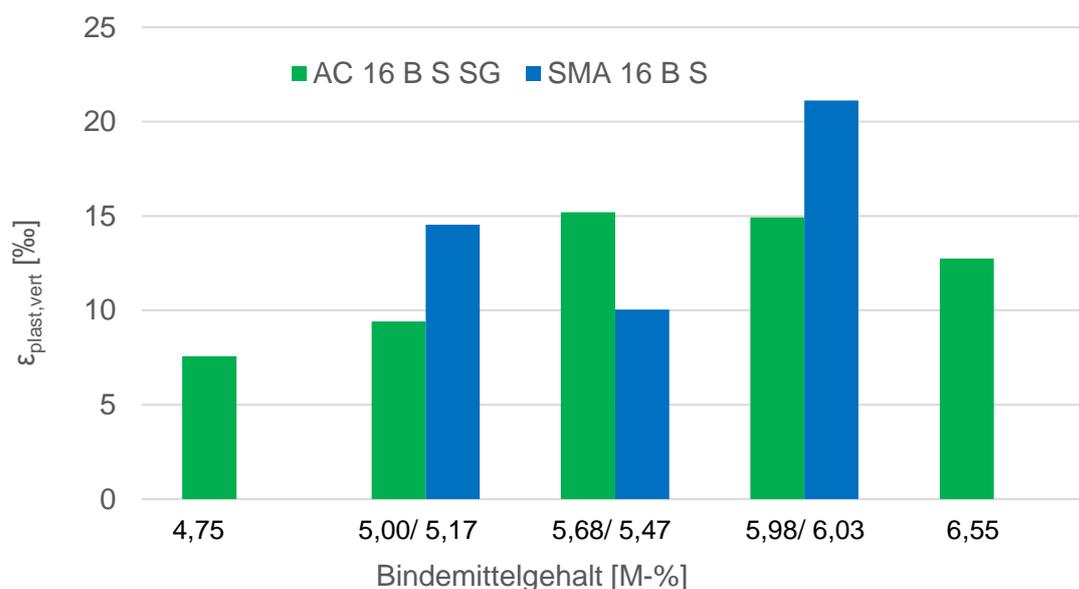


Abb. 4-23: plastische Gesamtdehnung am Versuchsende für die Binderschichtgemische

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

Tab. 4-2: Dehnungsraten am Versuchsende der Binderschichtgemische

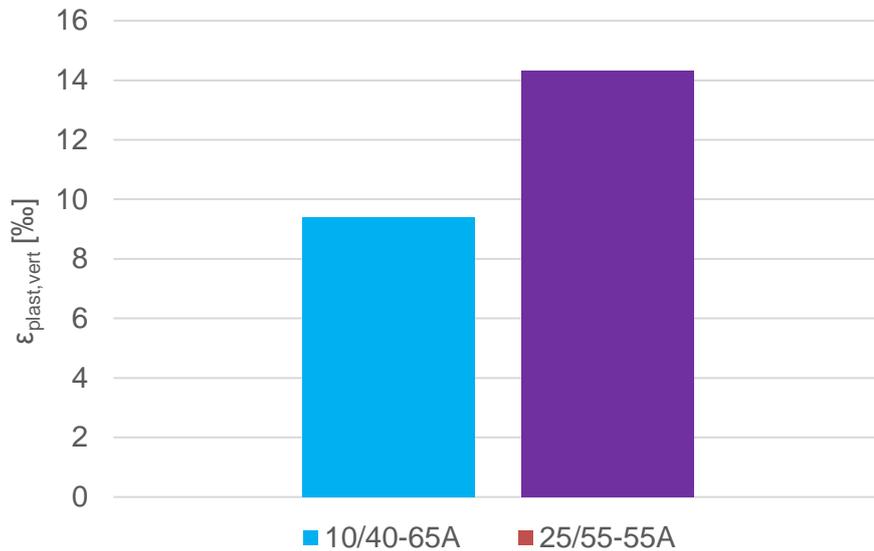


Abb. 4-24: Einfluss der Bitumensorte beim AC 16 B S SG

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 gröberen 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.

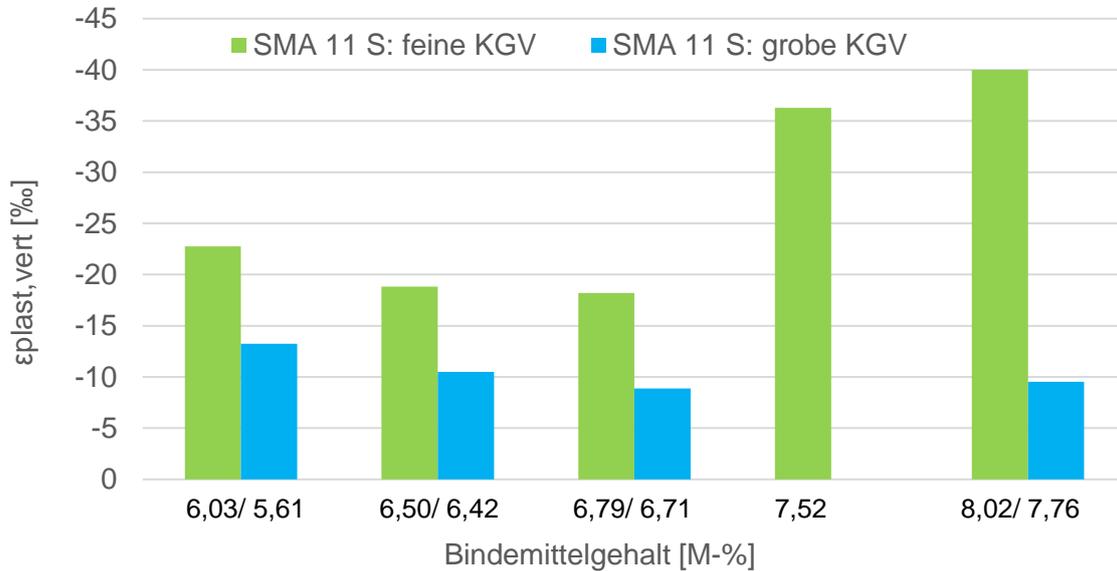


Abb. 4-25: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei $T=40^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,15 \text{ N/mm}^2$

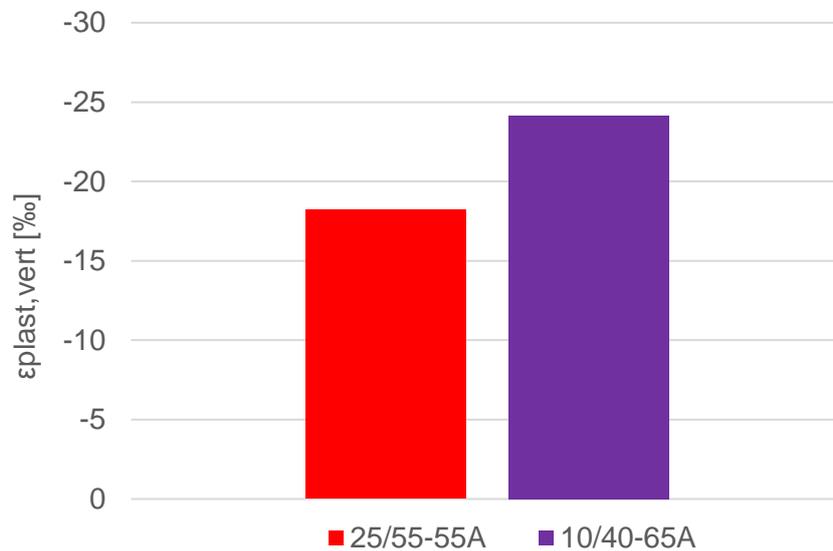


Abb. 4-26: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim SMA 11 S

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-%.

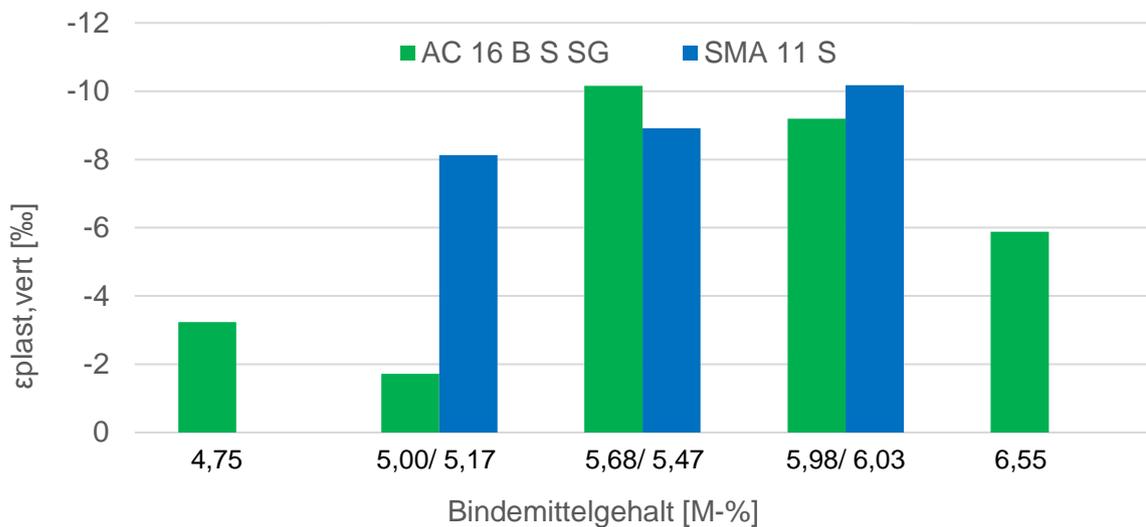


Abbildung 4-27: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei $T=50^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,20\text{ N/mm}^2$

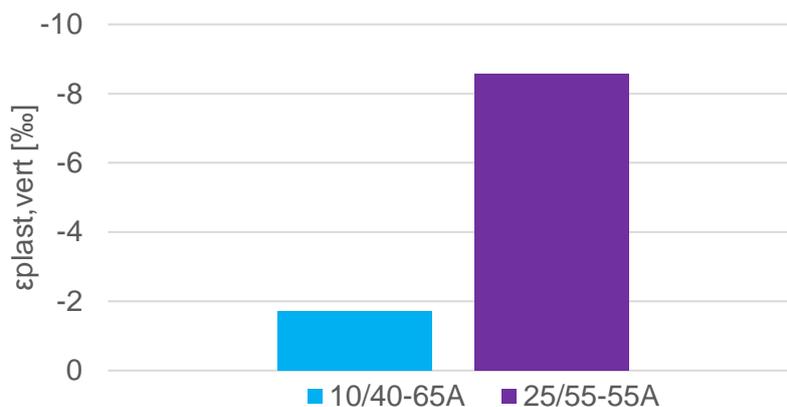


Abb. 4-28: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim AC 16 B S SG

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 5,68 M-%	AC 16 B S SG 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

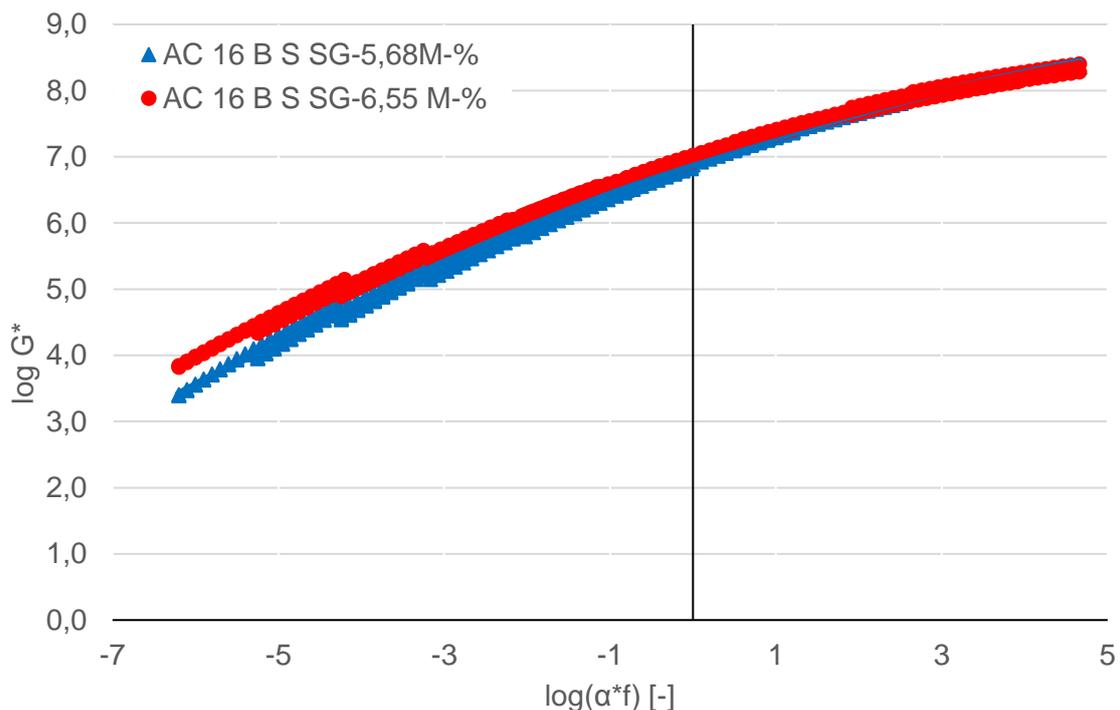


Abb. 4-29: Hauptkurve der extrahierten Bitumen

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)

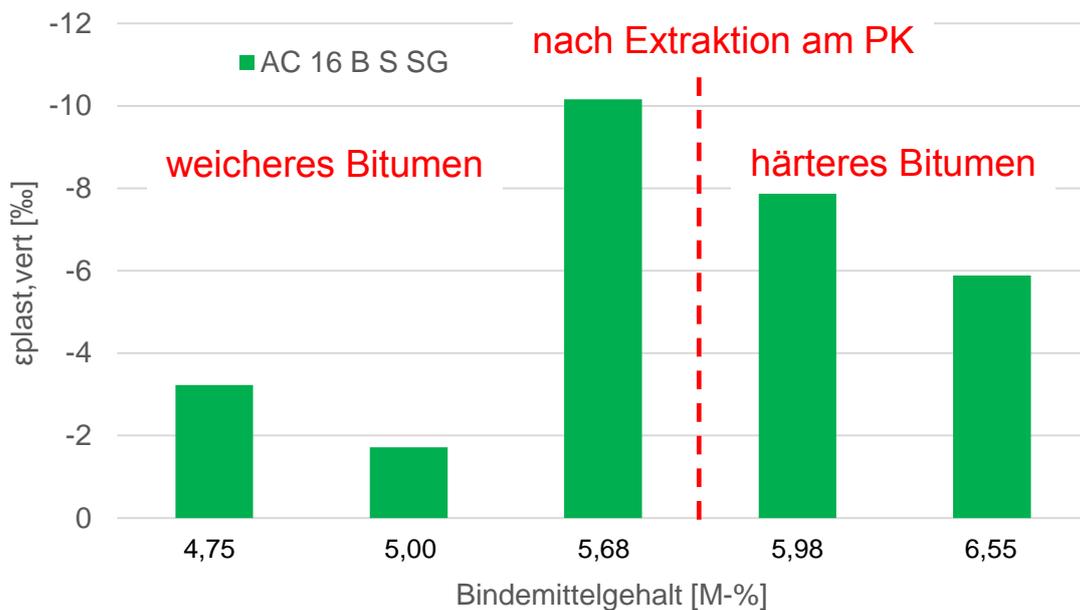


Abb. 4-30: Verhärtung des Bitumens bei der Variante AC 16 B S SG

4.4.3 Einaxiale Druck-Schwellversuche am gedrunghenen Probekörper

Die Ergebnisse des Druck-Schwellversuches am gedrunghenen 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.

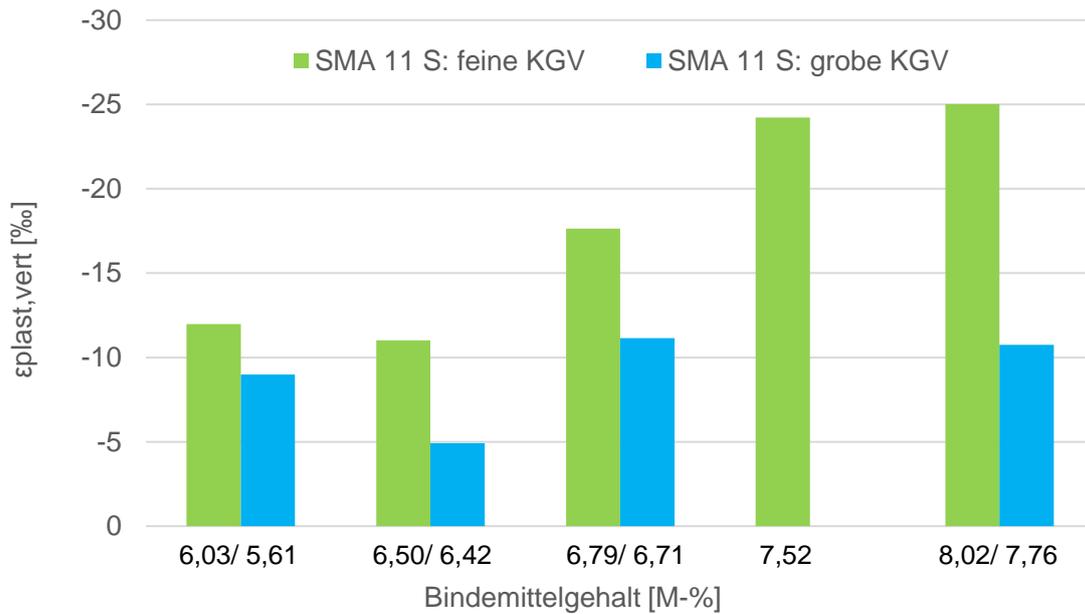


Abb. 4-31: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Deckschichtvarianten bei $T=30^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,20 \text{ N/mm}^2$

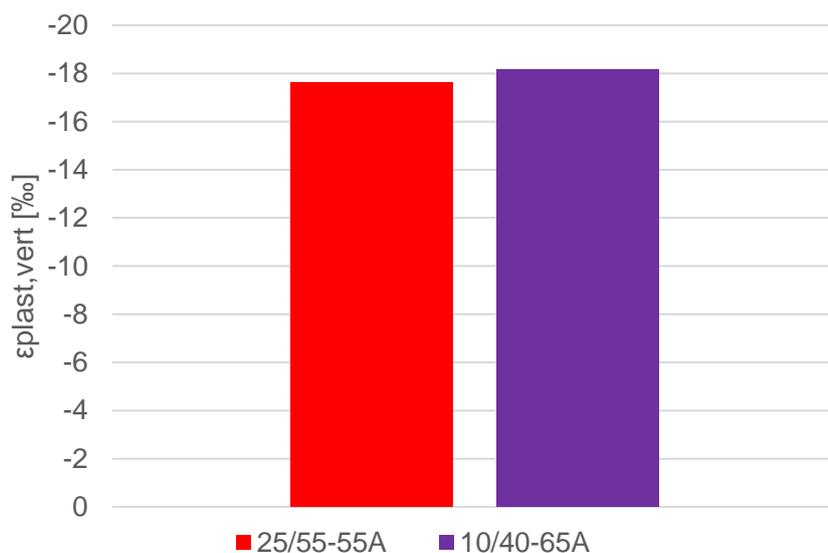


Abb. 4-32: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim SMA 11 S

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-%.

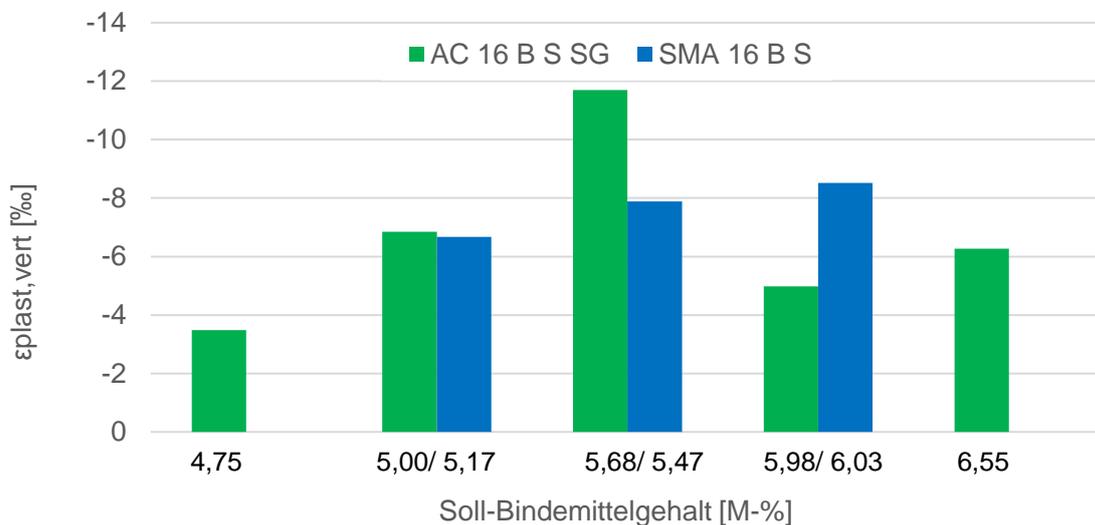


Abbildung 4-33: Ergebnisse des einaxialen Druck-Schwellversuchs der Binderschichtvarianten bei $T=50^{\circ}\text{C}$; $\sigma_0=0,20\text{ N/mm}^2$

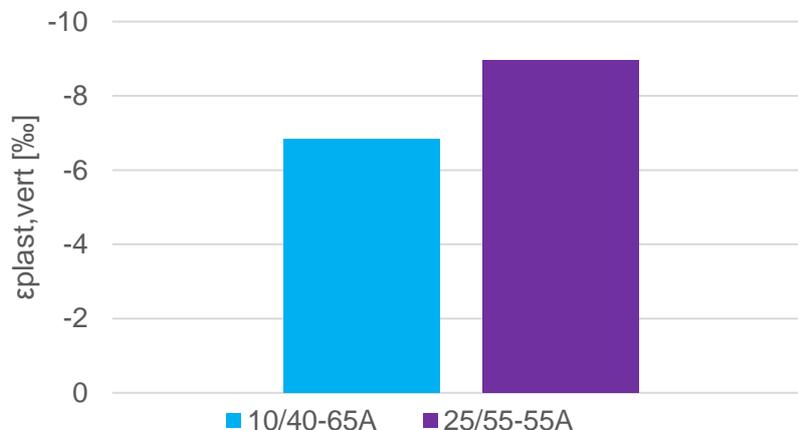


Abb. 4-34: Einfluss der Bitumensorte auf das Verformungsverhalten beim AC 16 B S SG

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.

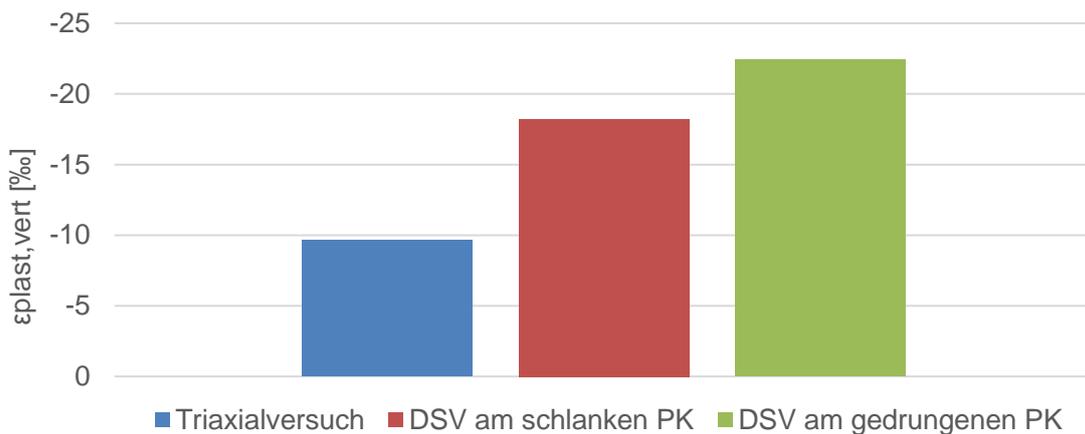


Abb. 4-35: Versuchsergebnisse des SMA 11 S mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten

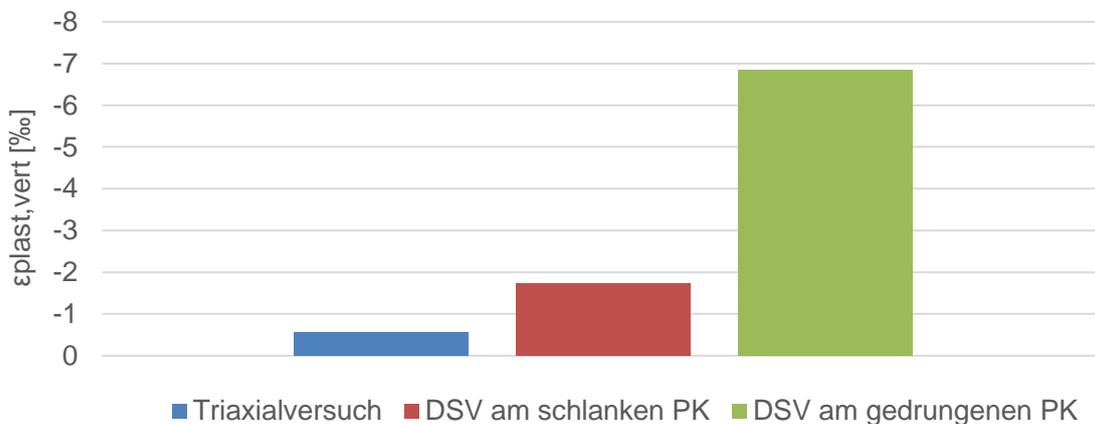


Abb. 4-36: Versuchsergebnisse des AC 16 B S SG mit den 3 unterschiedlichen Versuchsarten

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.

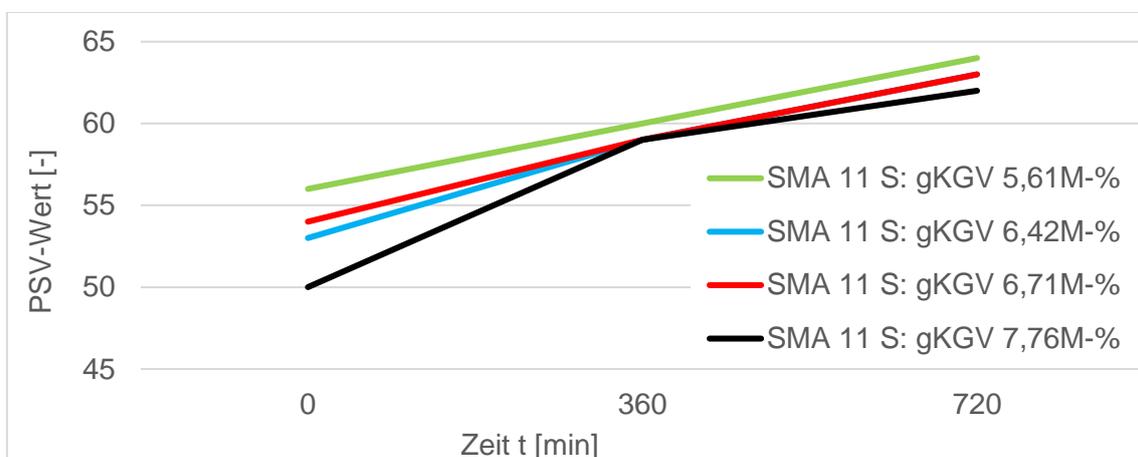


Abb. 4-37: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: grobe KGV

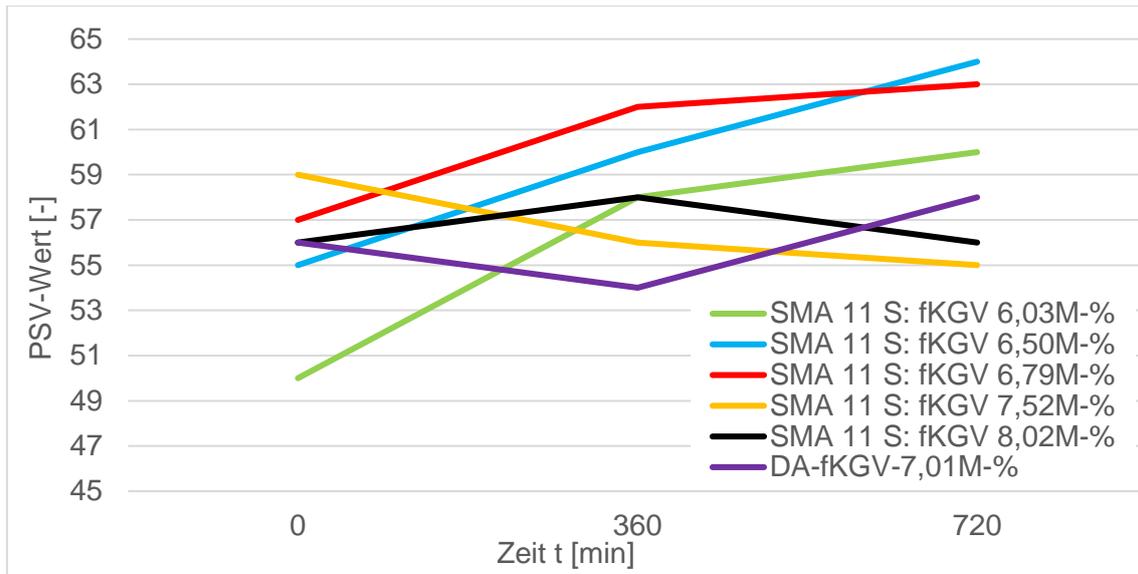


Abb. 4-38: Versuchsergebnis des Darmstädter Polierverfahren der SMA 11 S: feine KGV



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 α -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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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_{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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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:

ε_{el} elastische Dehnung [‰]

T Prüftemperatur [°C]

T_0 Referenztemperatur, bestimmt durch Regression [°C]

A Materialparameter [-]

a_1 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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 Varianz	H ₀ angenommen	H ₀ 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
ϵ	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.

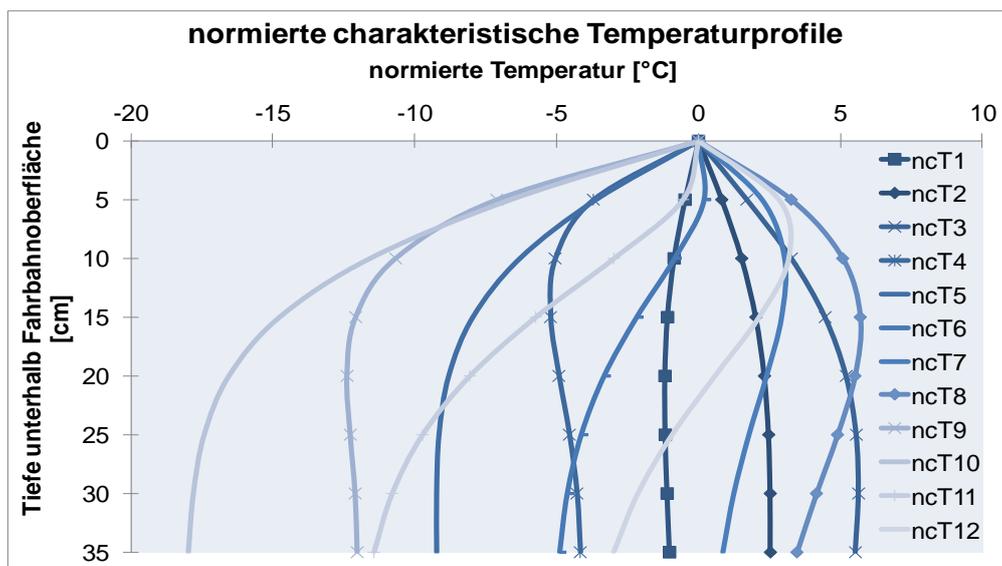


Abb. 6-1: normierte charakteristische Temperaturprofile [AP Klima und Verkehr]

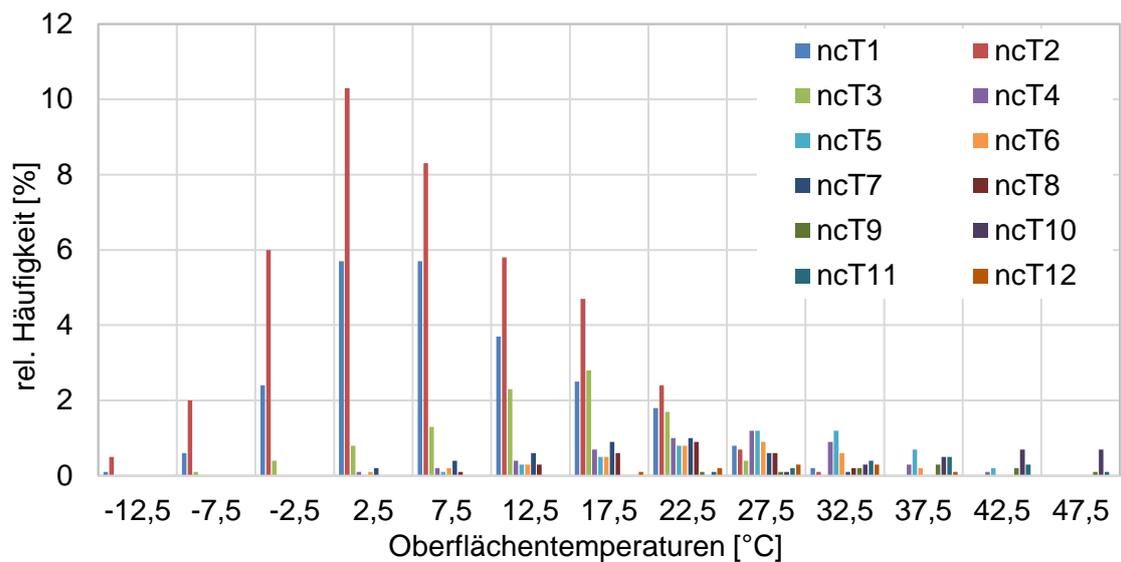


Abb. 6-2: Häufigkeitsverteilung der TOF für Zone 5 [AP Klima und Verkehr]

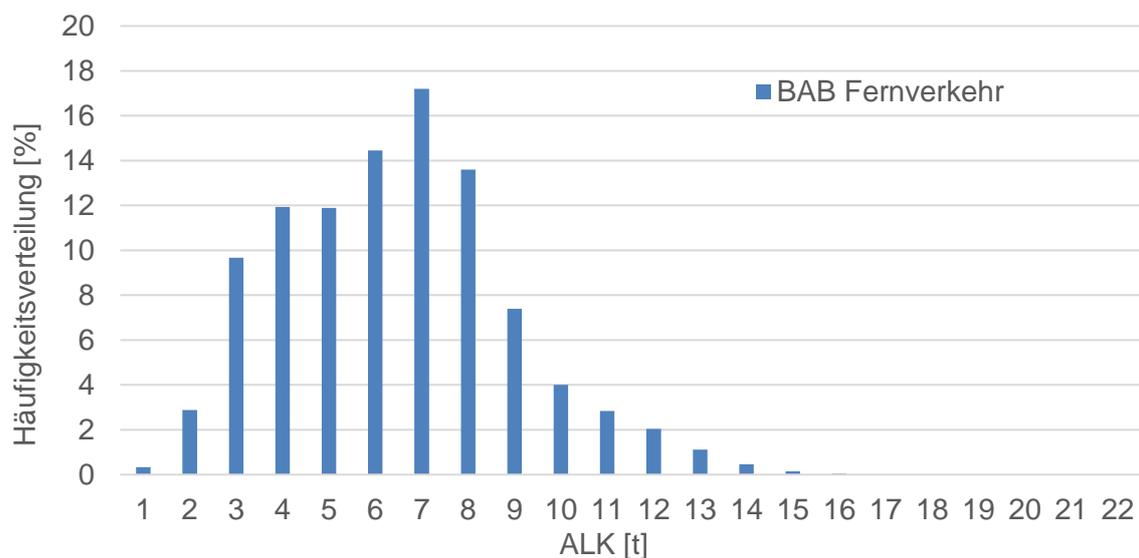


Abb. 6-3: Häufigkeitsverteilung des BAB Fernverkehrs [AP Klima und Verkehr]

DTV ^(SV)	10.000
f _A	4,5
f ₁	1,0
f ₂	1,0
f ₃	1,0
p _z	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 Asphalttschichten 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.

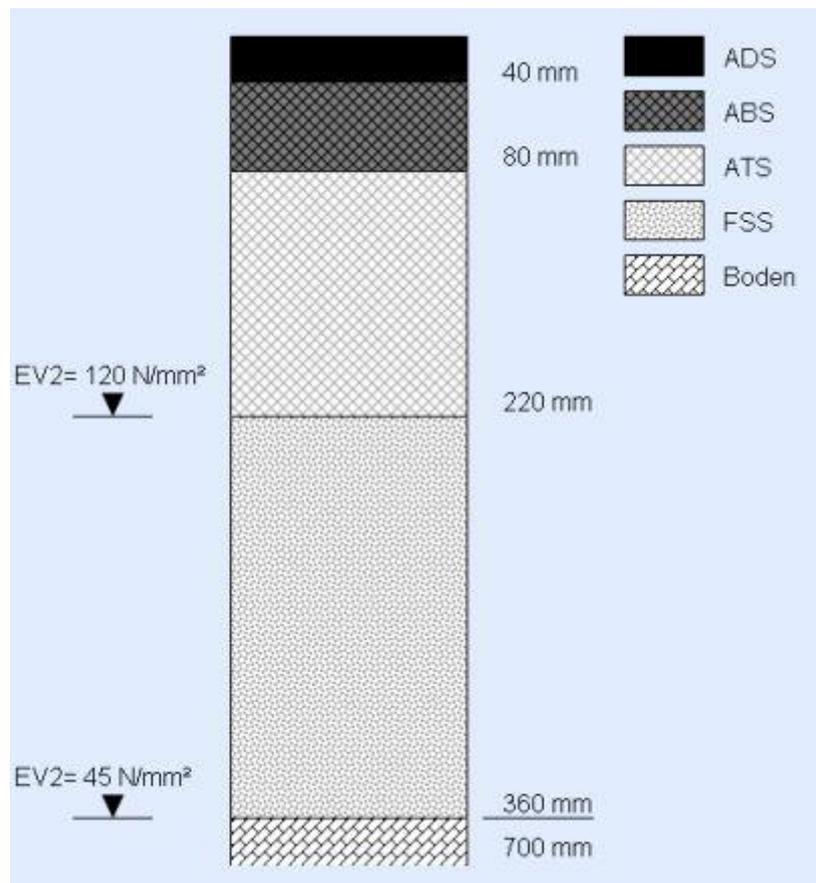


Abb. 6-4: gewählter Befestigungsaufbau nach RStO 12 (BK 100)

6.1.1 Betrachtung der horizontalen Zugdehnungen in der Asphaltdeckschicht

Bisher wurde bei den Prognoserechnungen ein vollständiger (starrer) Verbund zwischen allen Asphalttschichten, 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.

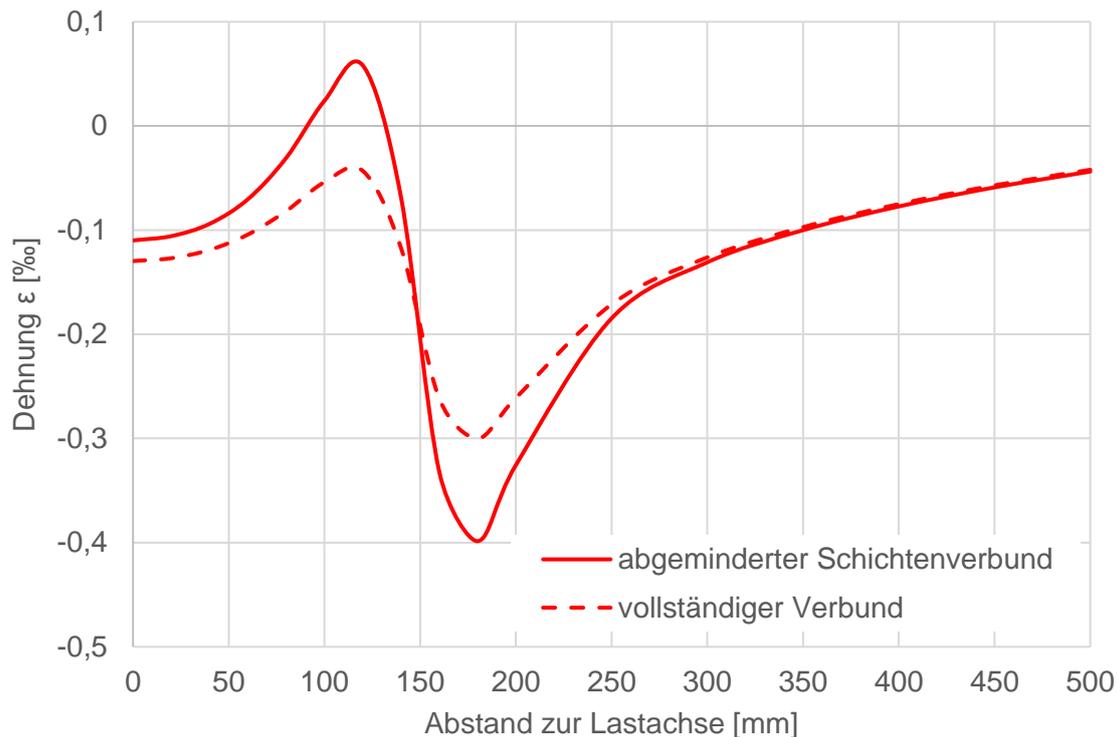


Abb. 6-5: Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltdeckschicht bei starren Verbund und abgeminderten Verbund

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

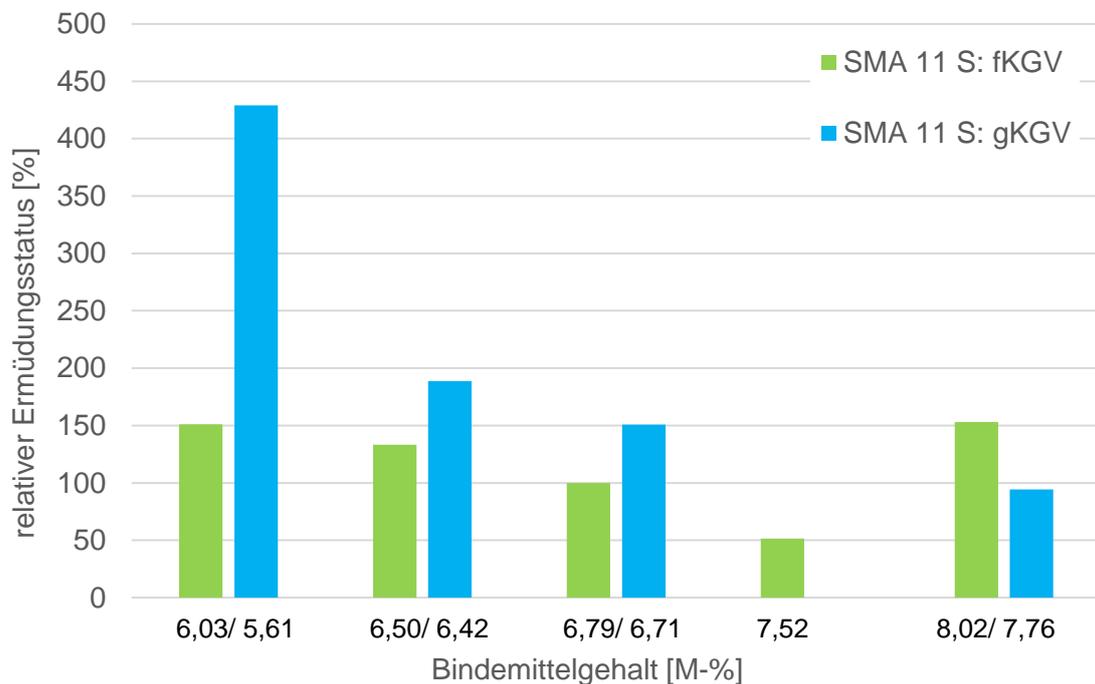


Abb. 6-6: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren

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

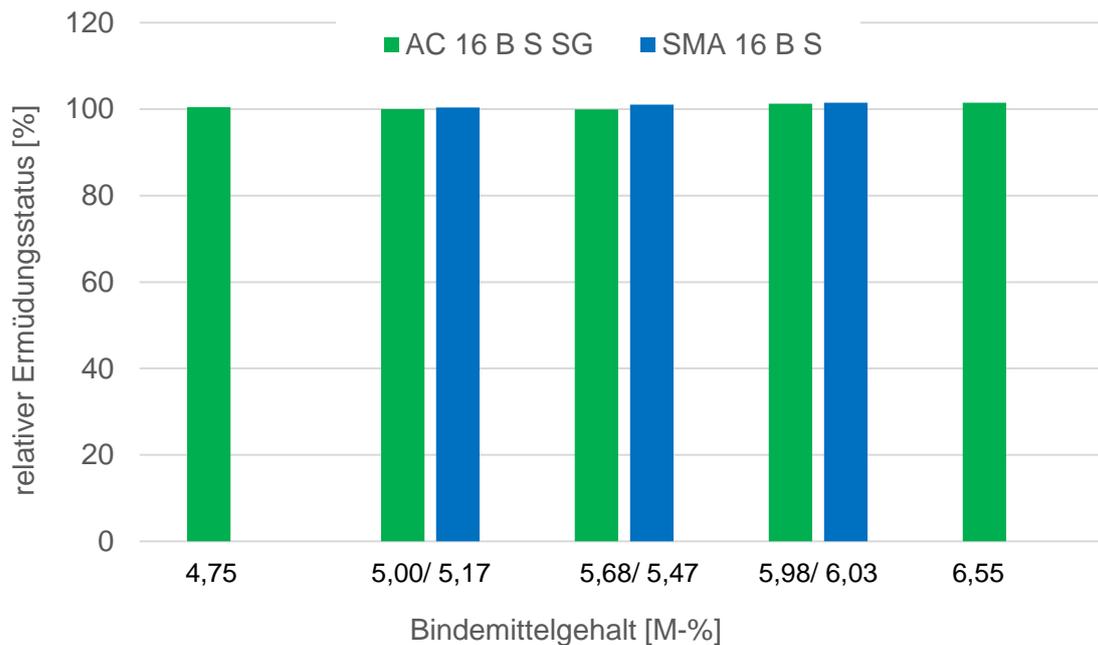


Abb. 6-7: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht unter Variation der Binderschichtgemische

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.

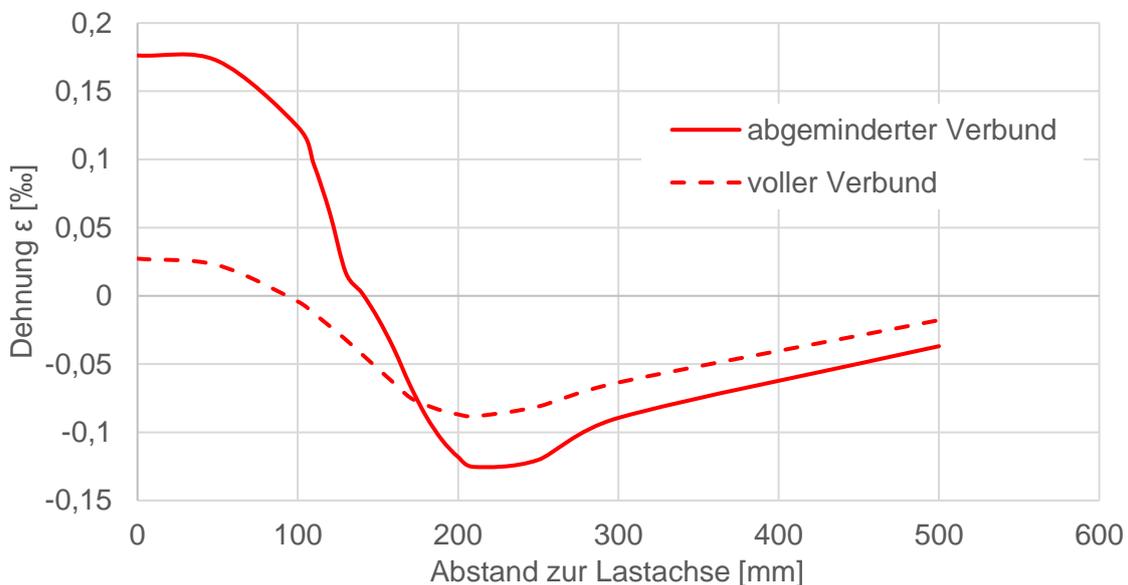


Abb. 6.8: Verlauf der horizontalen Dehnungen an der Unterseite der Asphaltbinderschicht bei starren Verbund und abgeminderten Verbund

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

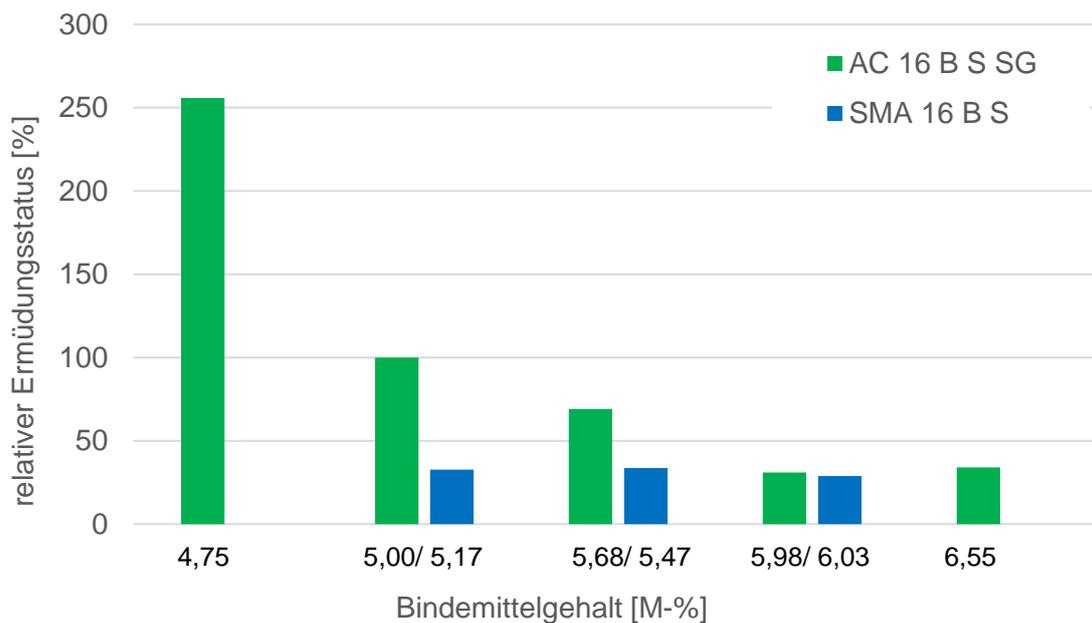


Abb. 6-9: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschichtgemische nach 30 Jahren

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

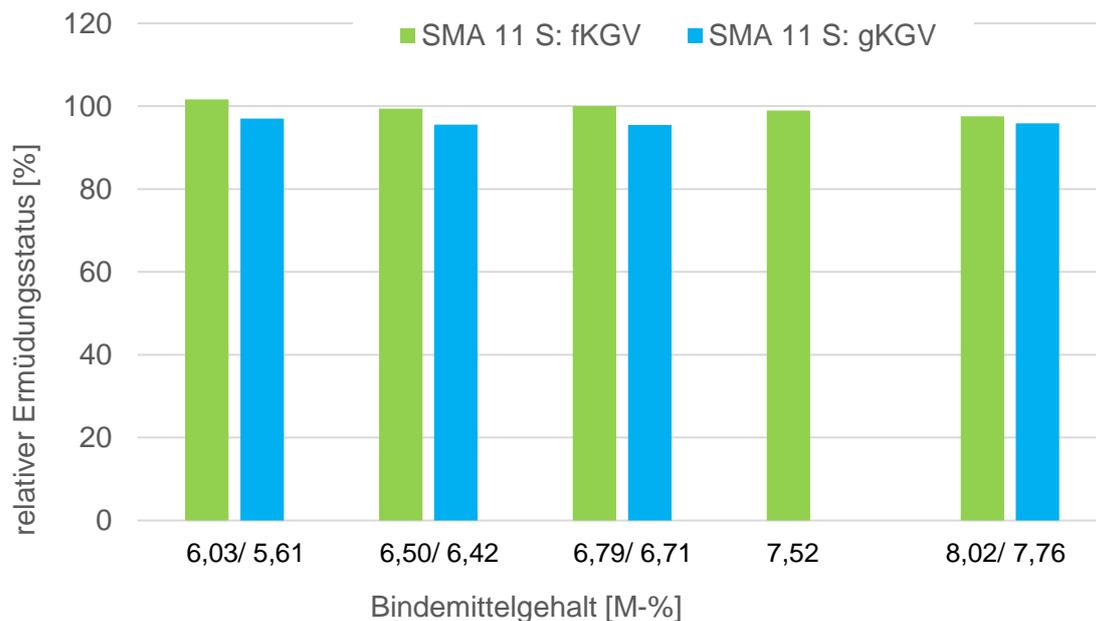


Abb. 6-10: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht unter Variation der Deckschichtgemische

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.

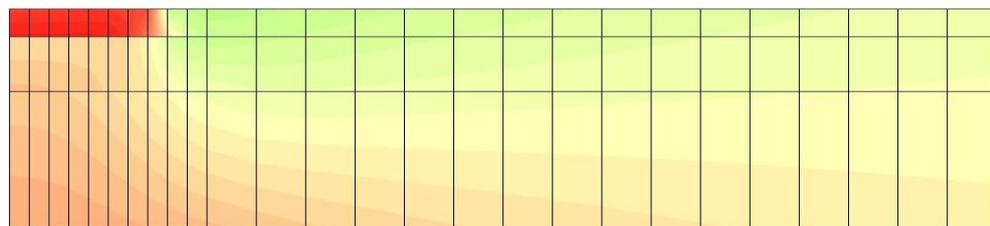


Abb. 6-11: Verlauf der vertikalen Dehnungen im Straßenquerschnitt

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

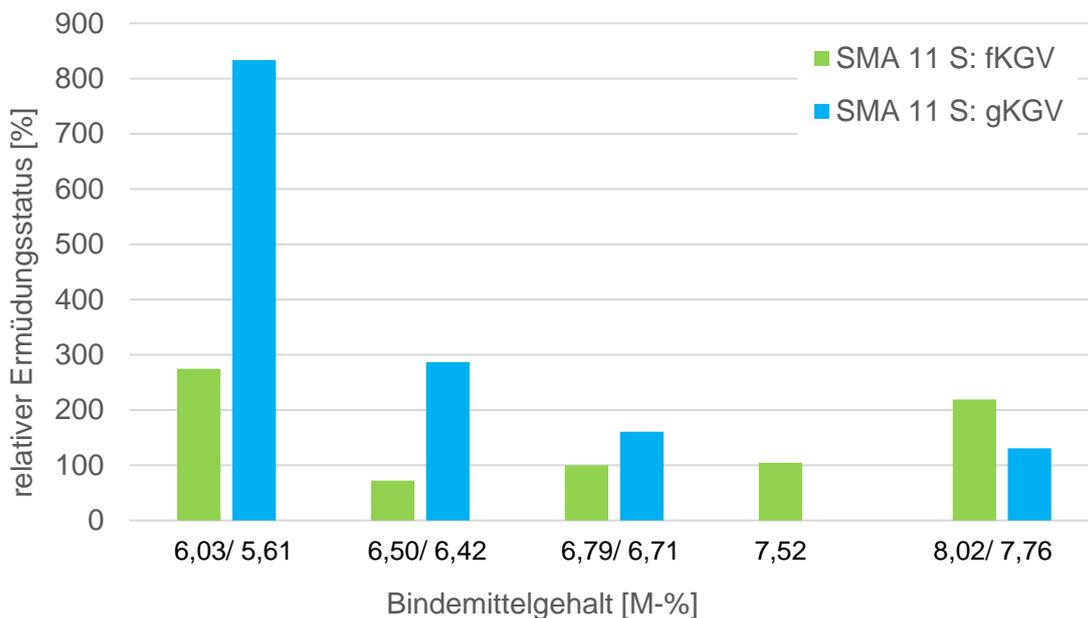


Abb. 6-12: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschichtgemische nach 30 Jahren

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

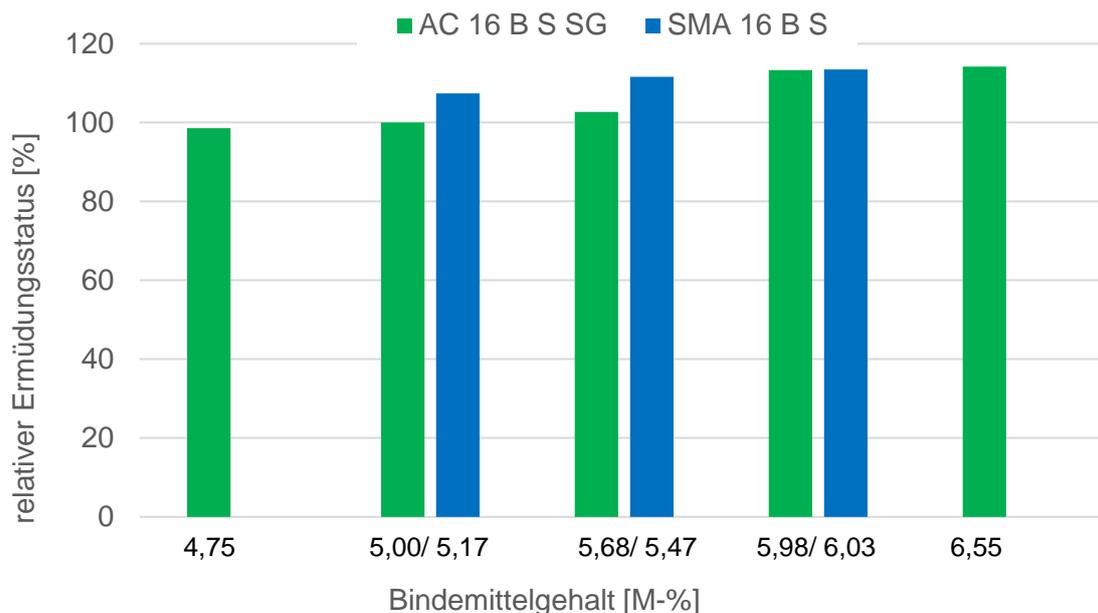


Abb. 6-13: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht unter Variation der Binderschichtgemische

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

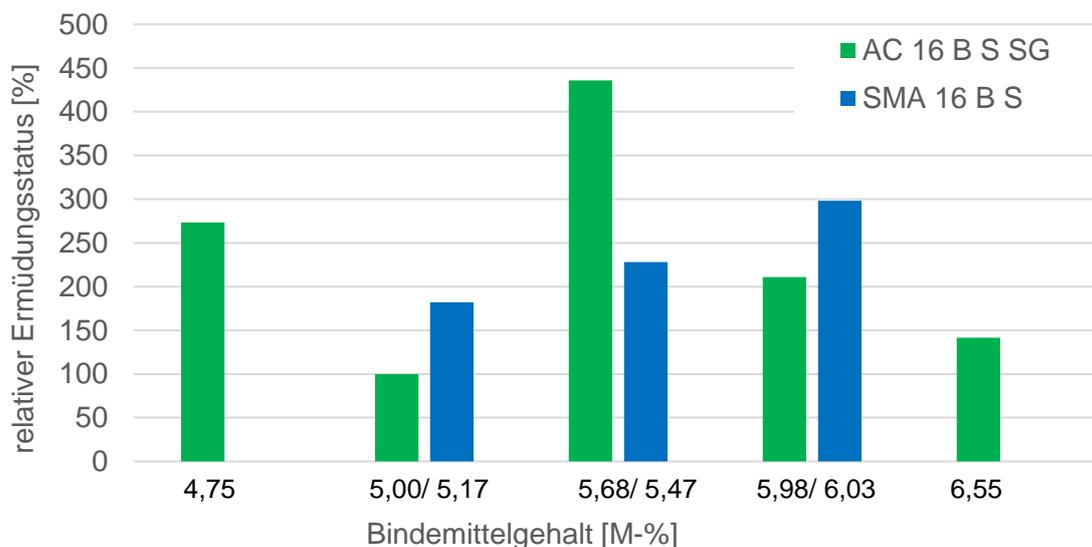


Abb. 6-14: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschichtgemische nach 30 Jahren

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

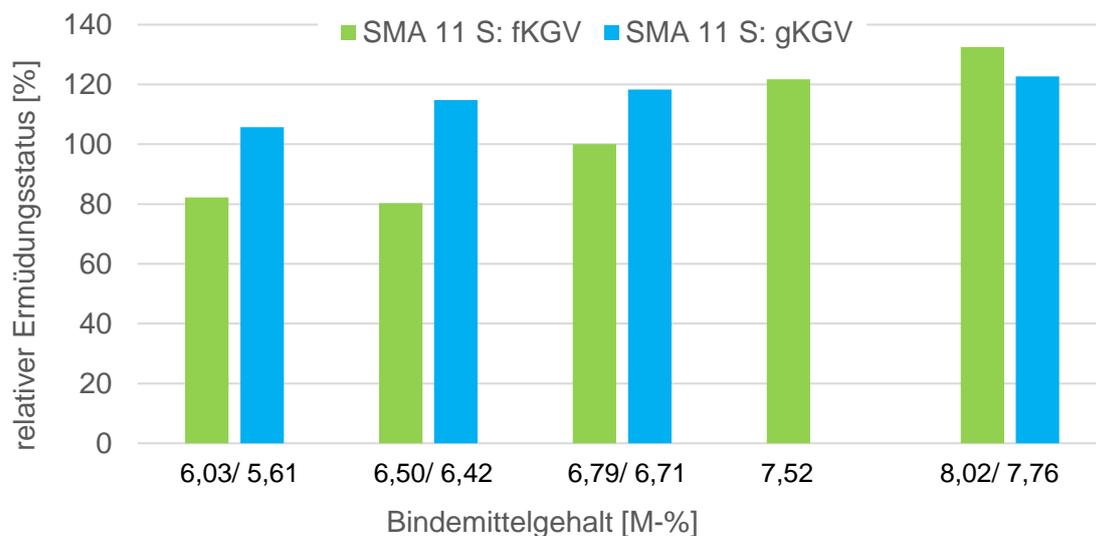


Abb. 6-15: relativer Ermüdungsstatus der Asphaltbinderschicht unter Variation der Deckschichtgemische

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:

ε_{plast} bleibende axiale Dehnungen [‰]

ε_{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.

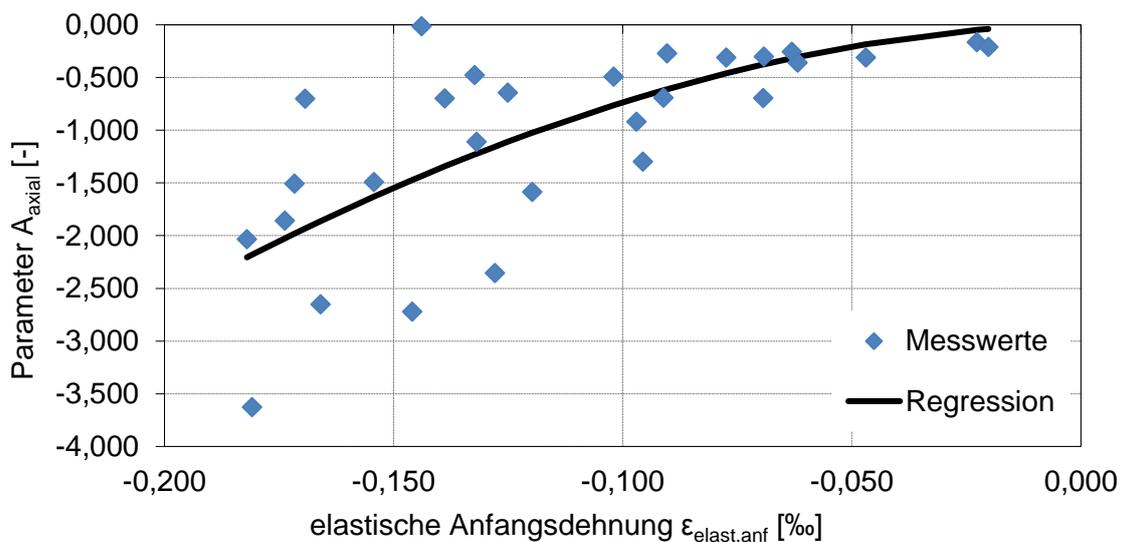


Abb. 6-16: Abhängigkeit des Materialparameters A von den elastischen Anfangsdehnungen AC 16 B S SG (DSV am schlanken Probekörper)

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.

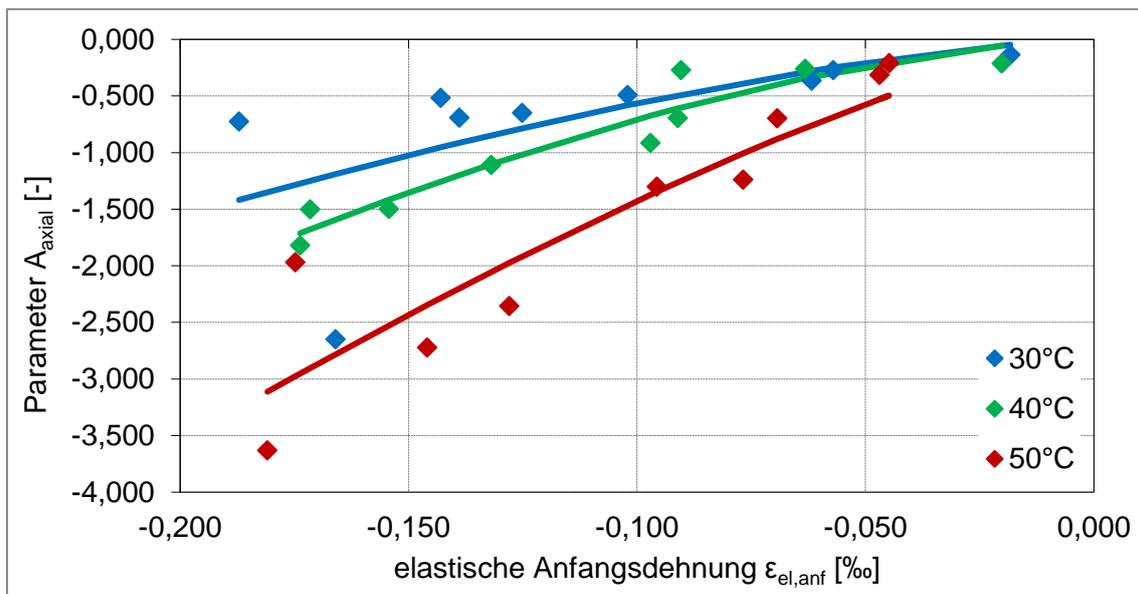


Abb. 6-17: Darstellung des Materialparameters A in Abhängigkeit zur elastischen Dehnung getrennt für die verschiedenen Prüftemperaturen

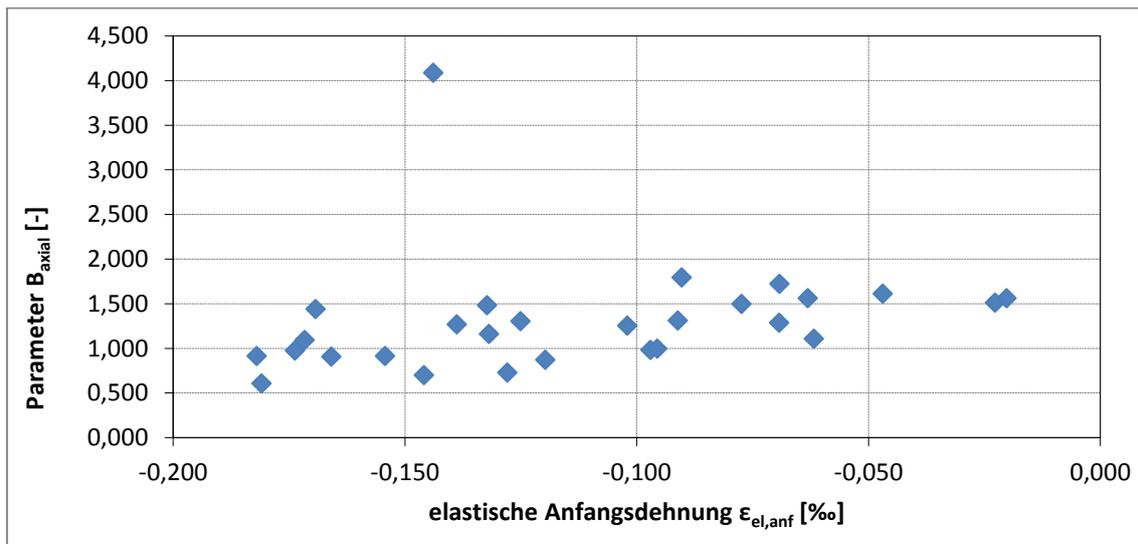


Abb. 6-18: Darstellung des Materialparameters B in Abhängigkeit zur elastischen Dehnung

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:

ε_{plast} bleibende axiale Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel [‰]

ε_{elast} elastische axiale Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel [‰]

T Prüftemperatur [°C]

a, b, c Regressionsparameter [-]

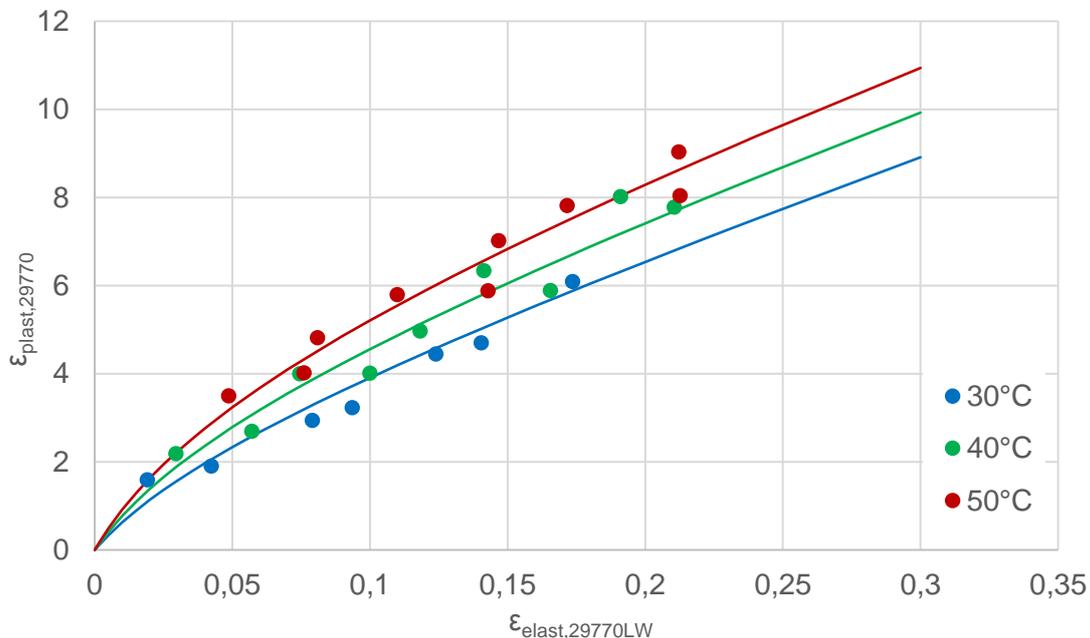


Abb. 6-19: Abhängigkeit der axialen plastischen Dehnungen von den axialen elastischen Dehnungen beim 29.970. Lastwechsel (DSV am schlanken Probekörper)

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:

ε_{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.

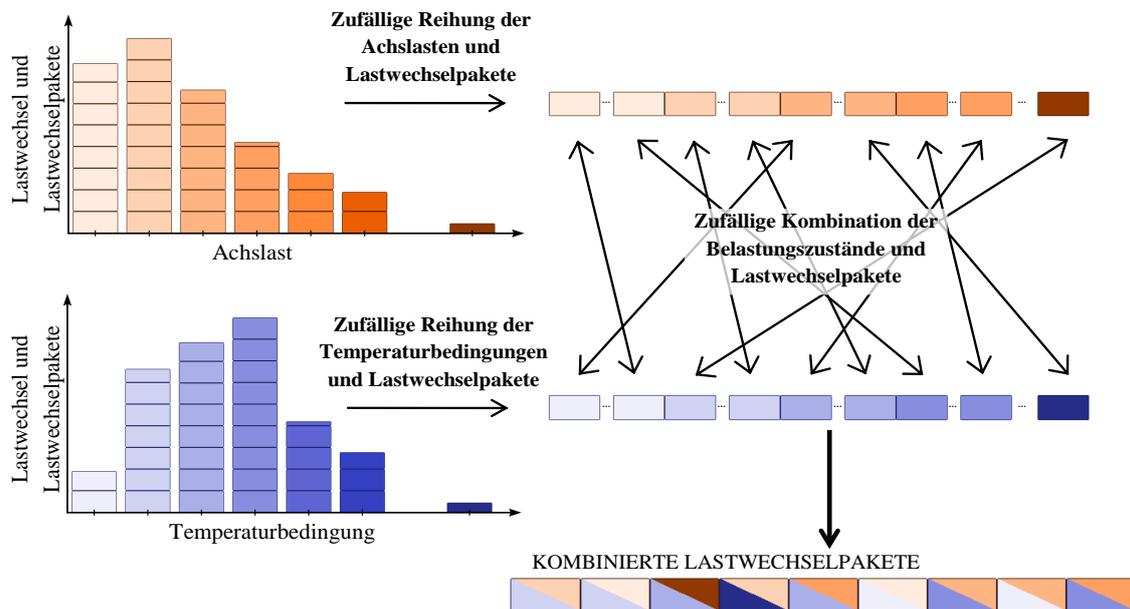


Abb. 6-20: Schematische Darstellung der zufälligen Reihung der Belastungszustände sowie der Zufallskombination der Belastungsgrößen [Kayser 2011]

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

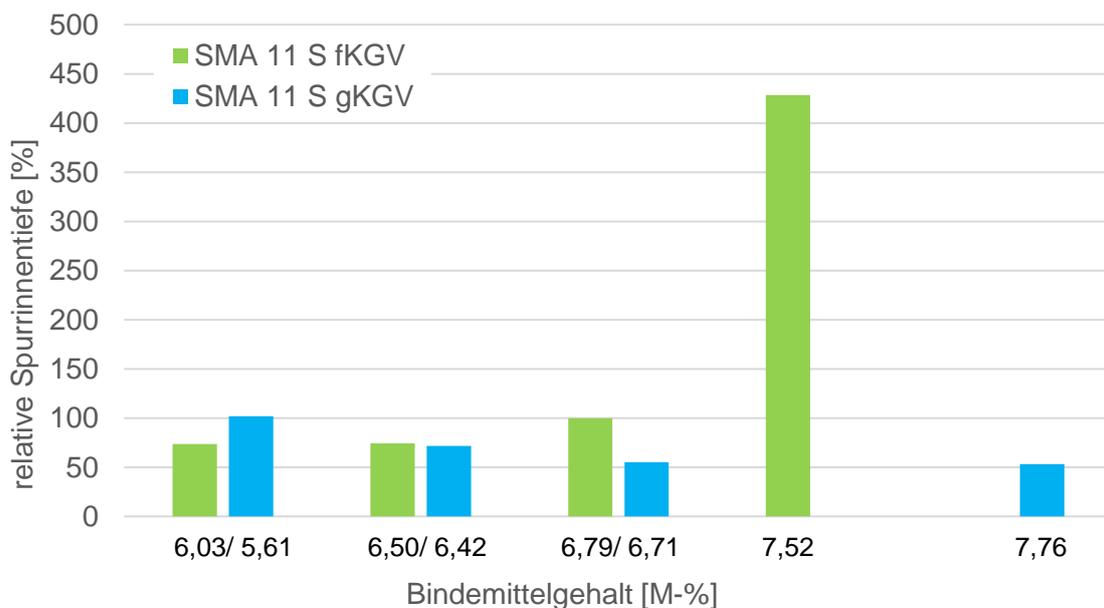


Abb. 6-21: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

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 Spurrinentiefe 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 Spurrinentiefe
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 Spurrinentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper

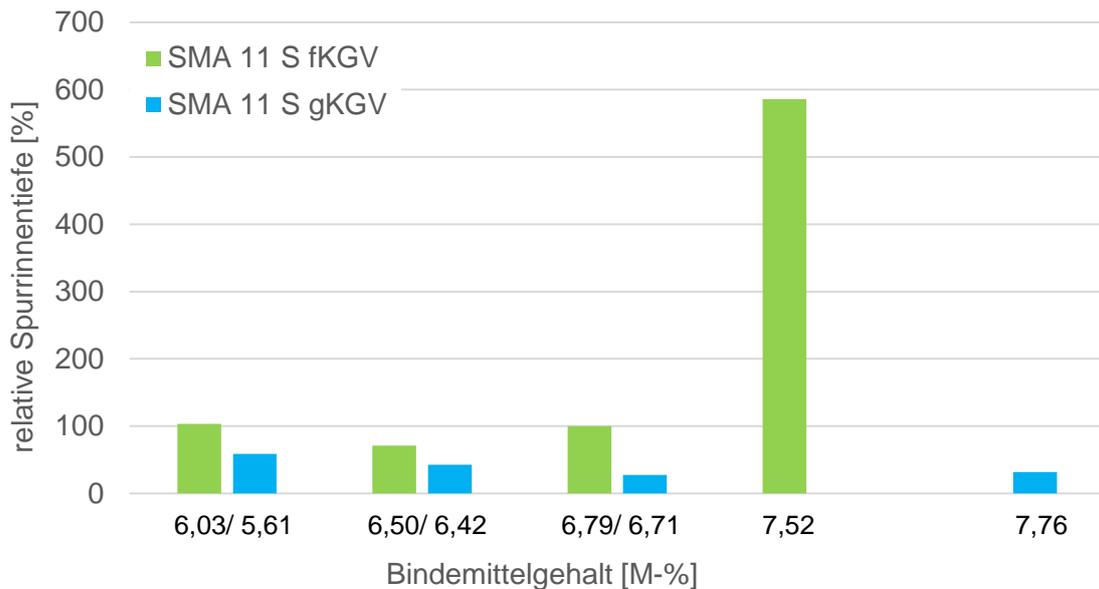


Abb. 6-22: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltdeckschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper

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

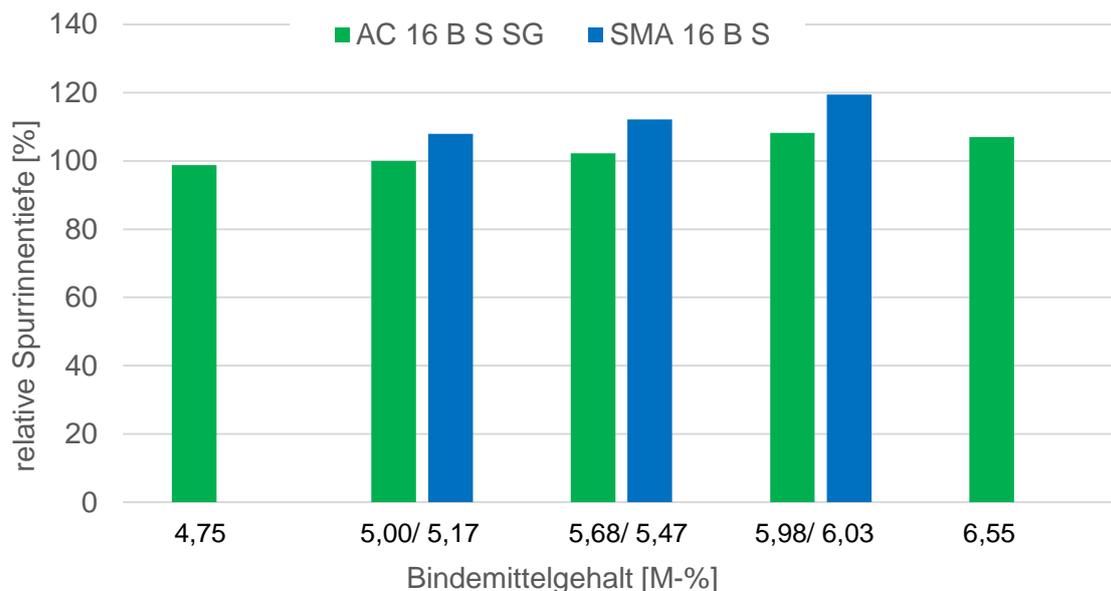


Abb. 6-23: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am schlanken Probekörper

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

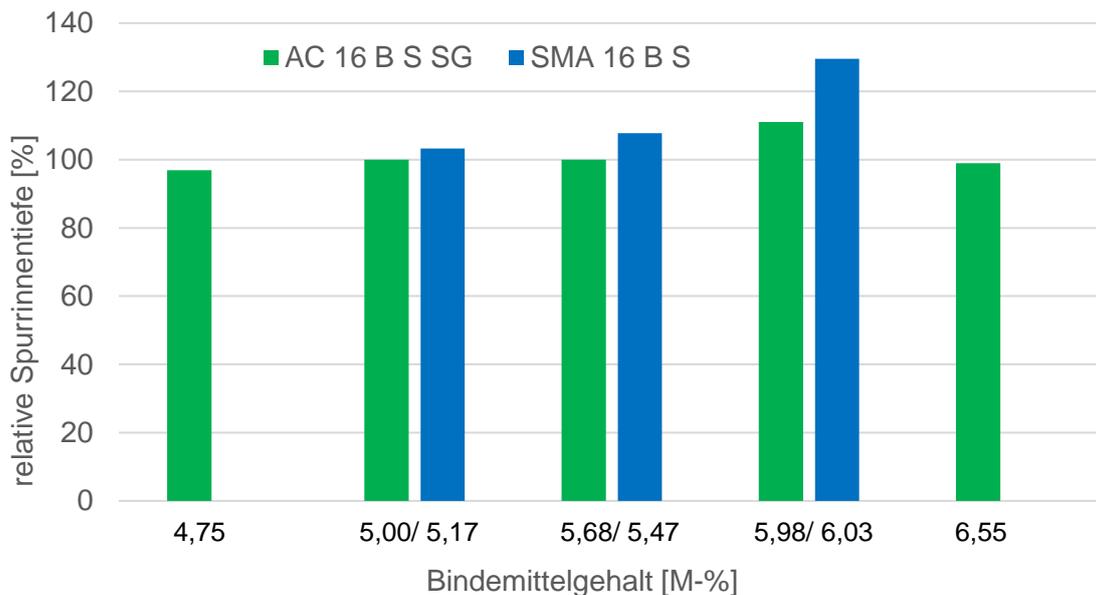


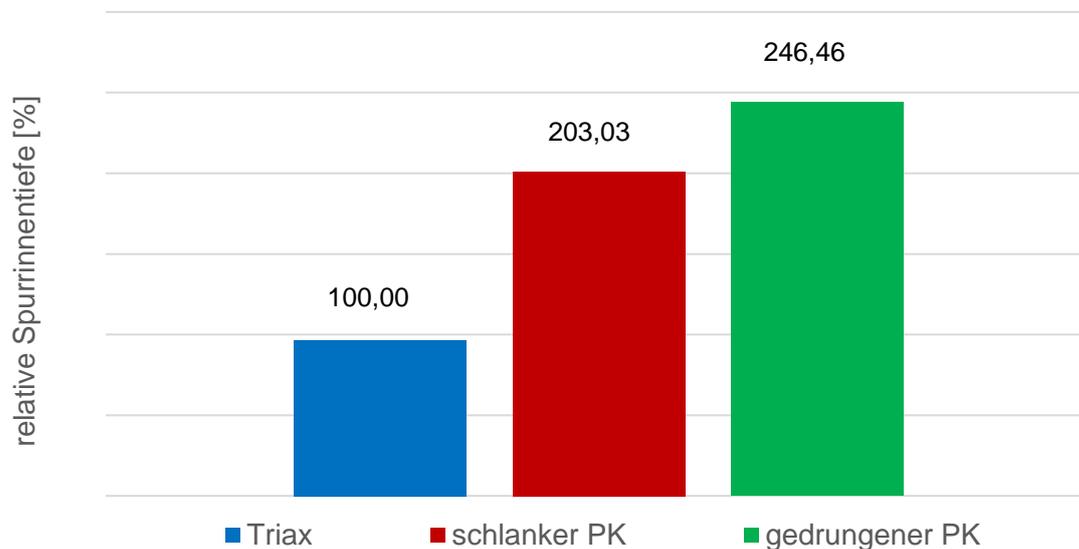
Abb. 6-24: relative Spurrinnentiefe der Fahrbahnkonstruktion unter Variation der Asphaltbinderschichtgemische anhand des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper

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.

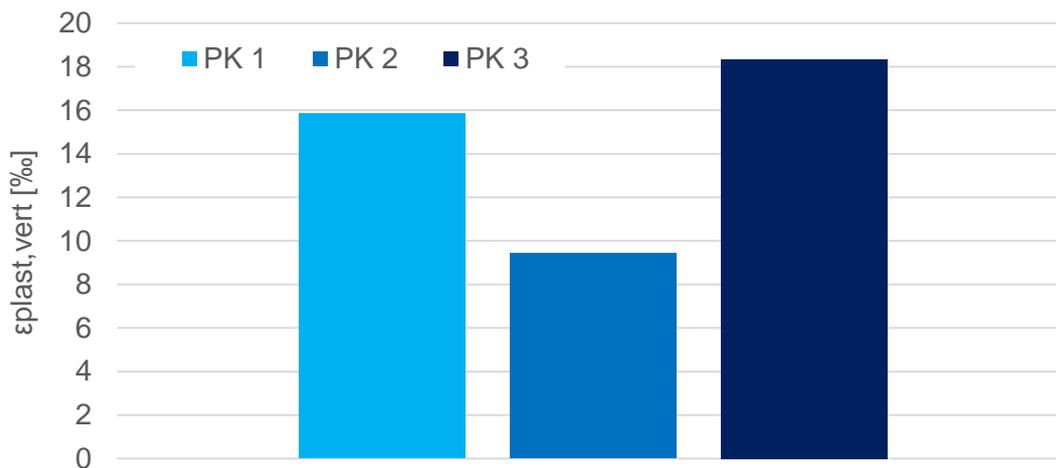


Abb. 6-26: Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schwellversuches am gedrunenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung

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 gebrauchungsverhaltensorientierten 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.

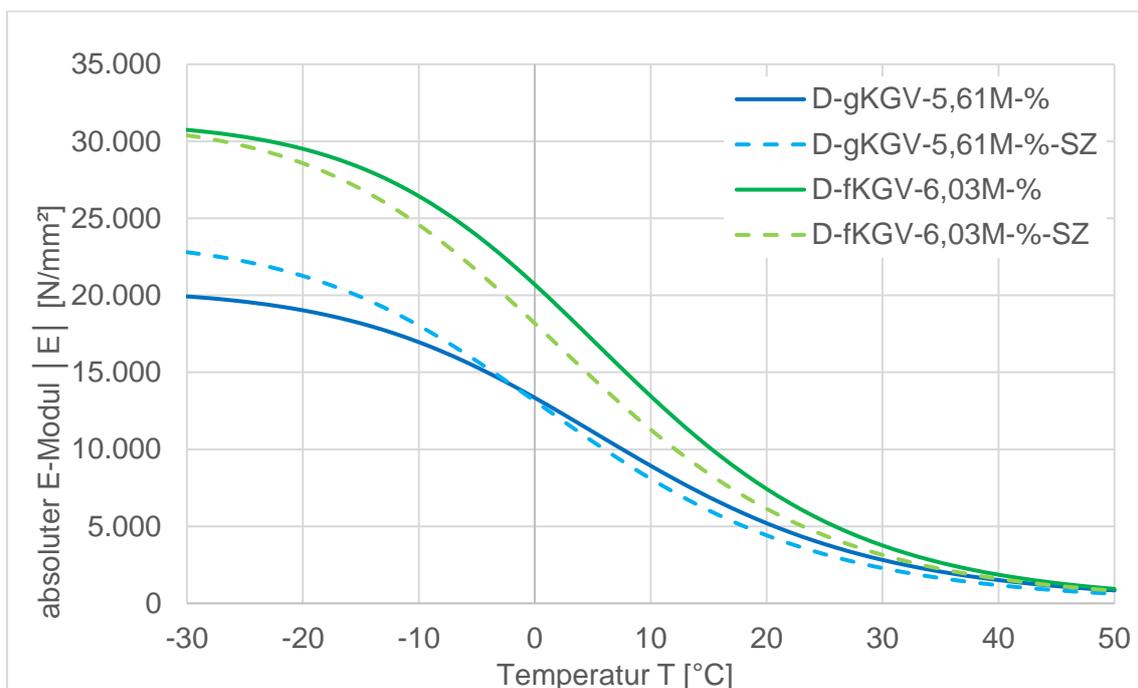


Abb. 7-1: Vergleich der Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion mittels der Ergebnisse des Druck-Schwellversuches und des Spaltzug-Schwellversuch

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.

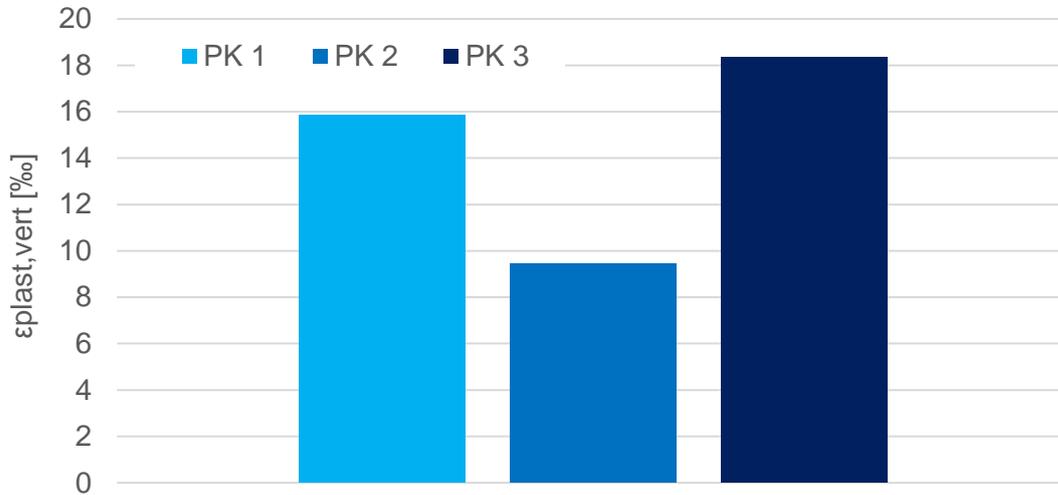
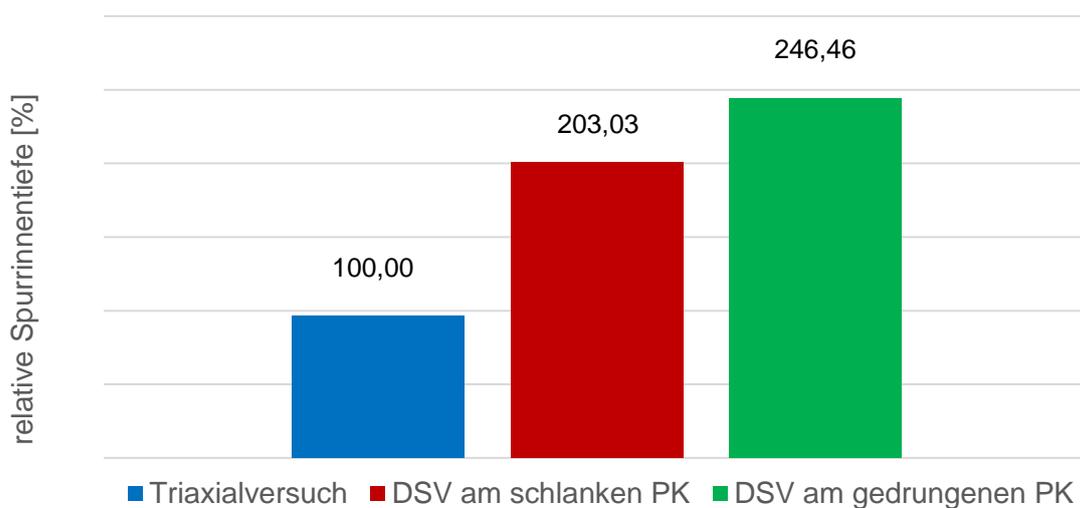


Abb. 7-2: Versuchsergebnisse eines Asphaltgemisches des Druck-Schwellversuches am gedrunghenen Probekörper bei gleicher Prüftemperatur und Oberspannung

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 Asphaltschichten. 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) $B_{\text{opt}} = 6,6 \text{ M-\%}$.

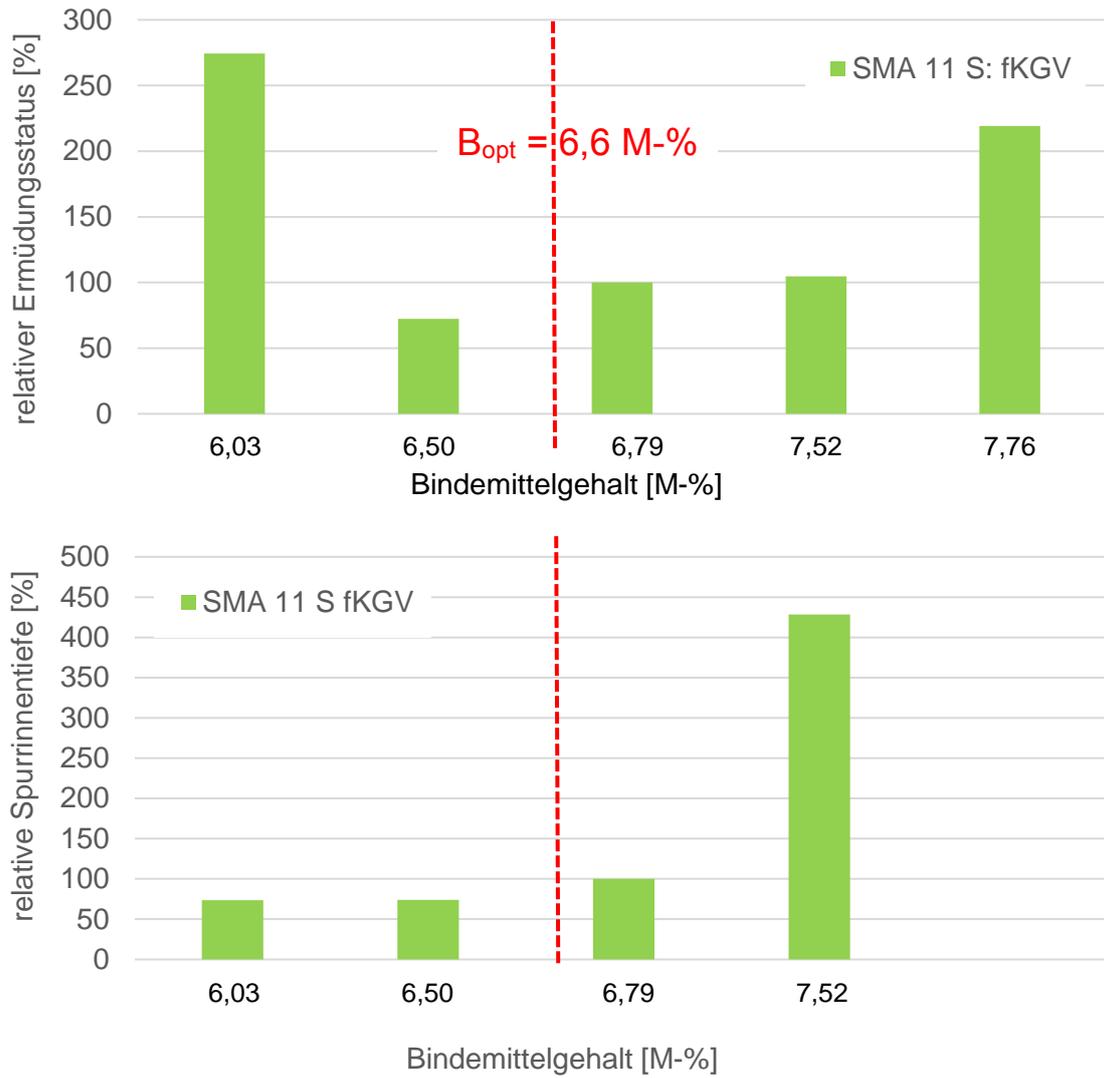


Abb. 7.4: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, feine KGV

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) $B_{opt} = 7,4 \text{ M-}\%$.

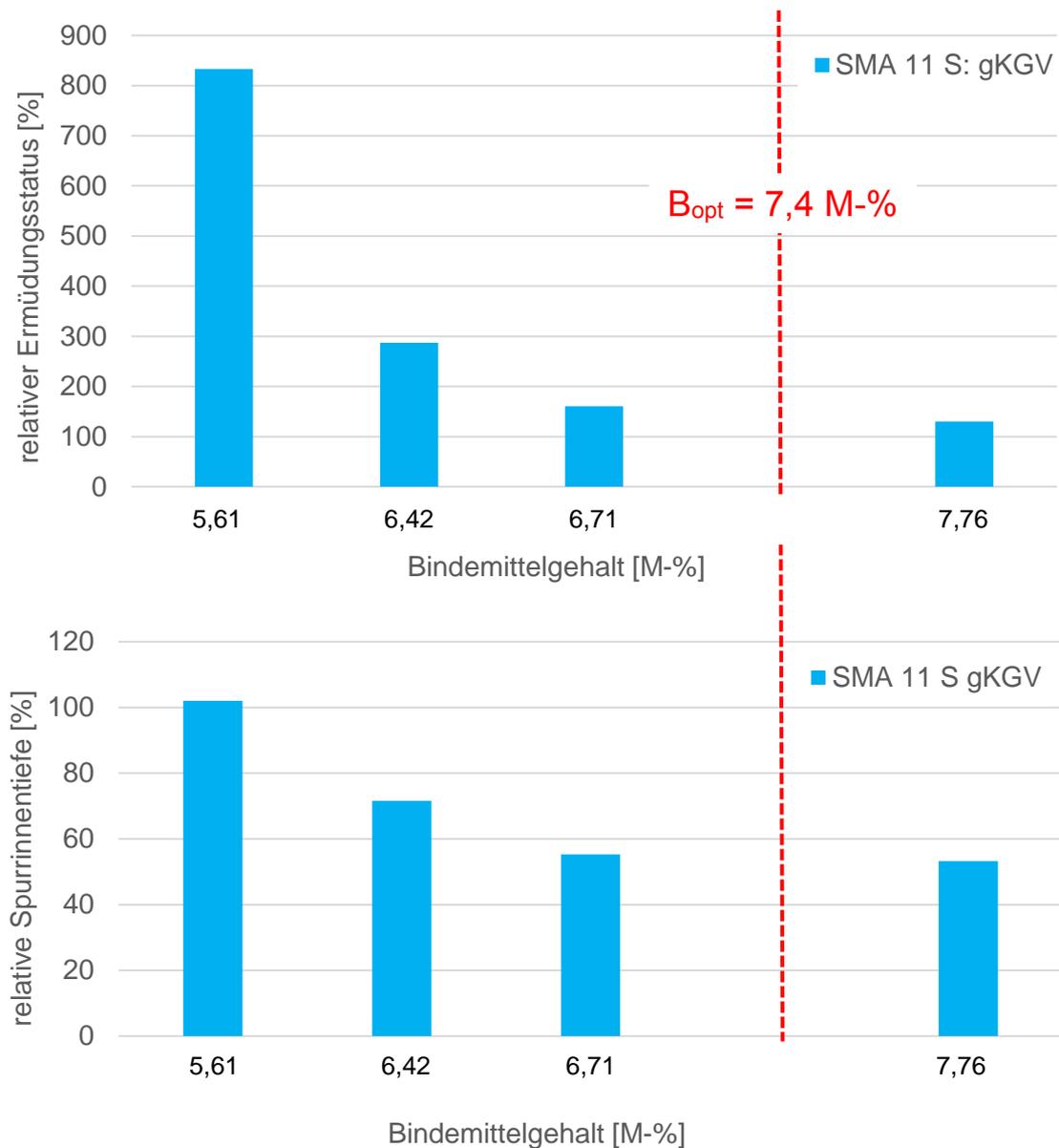


Abb. 7-5: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 11 S, grobe KGV

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).

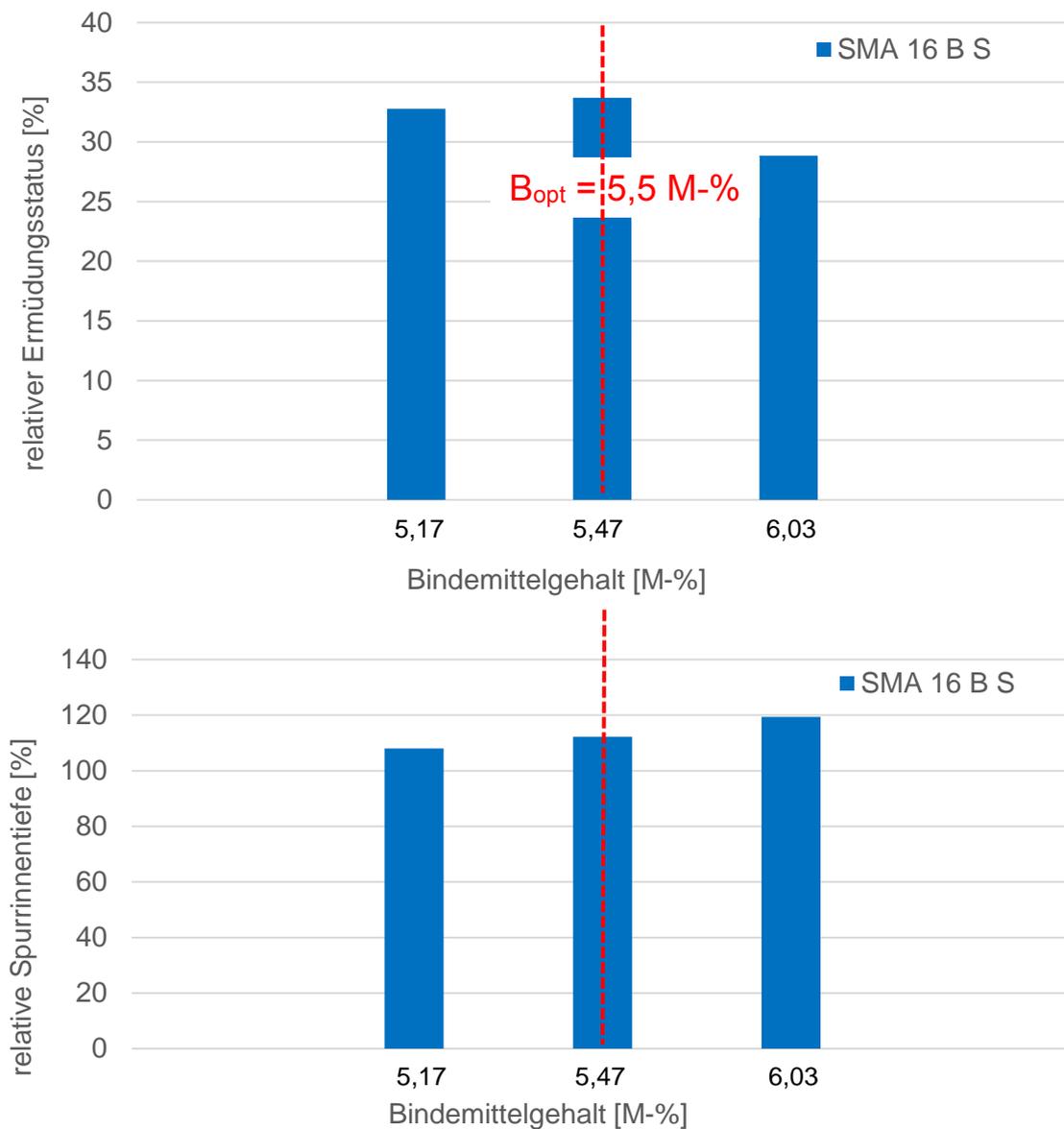


Abb. 7-6: Optimierung des Bindemittelgehaltes des SMA 16 B S

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: $B_{opt} = 6,2 \text{ M-}\%$.

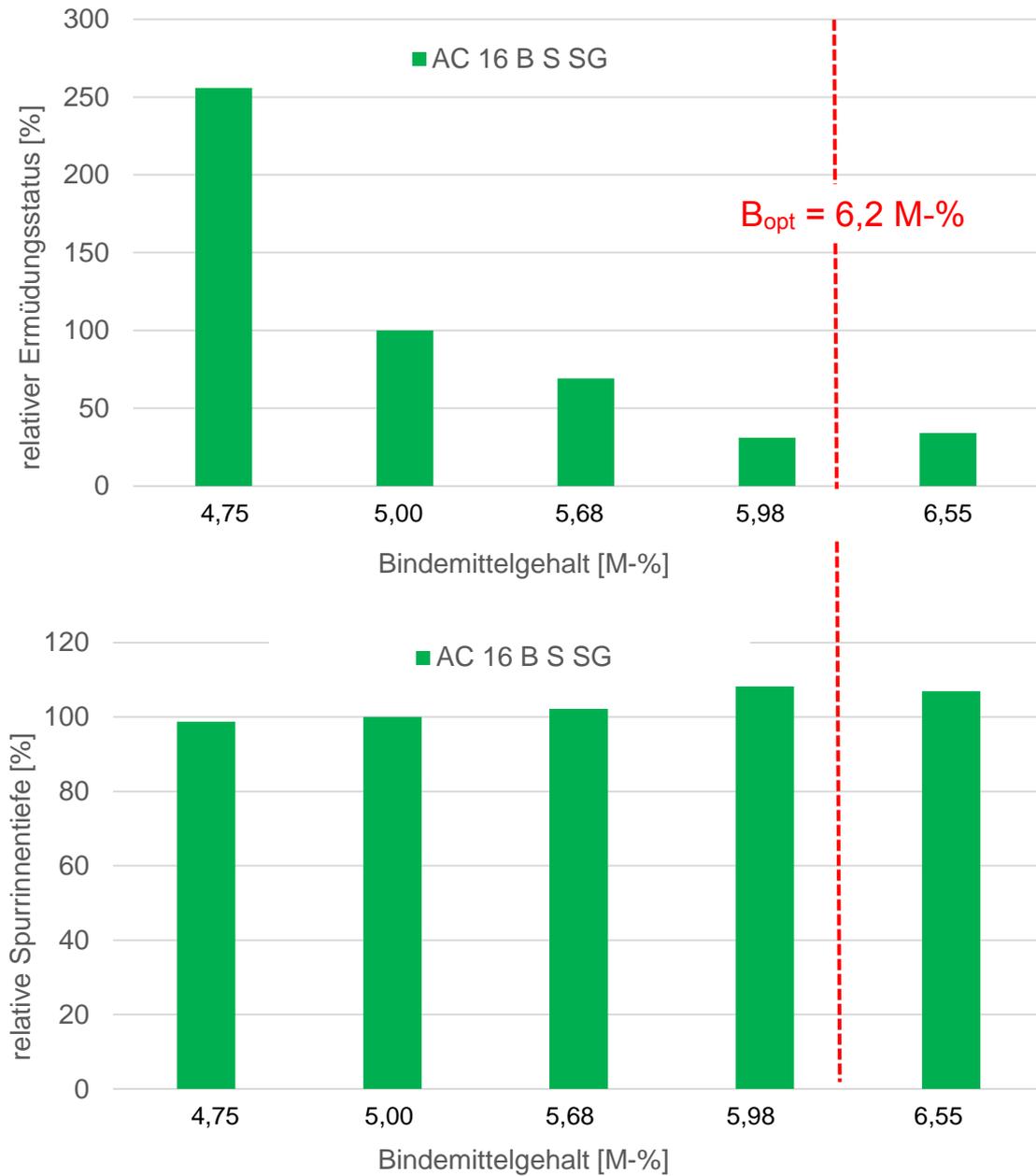


Abb. 7-7: Optimierung des Bindemittelgehaltes des AC 16 B S SG

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

[Bedeckovic 1957]

Bedeckovic, 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.; Lüthje, 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

[Lüthje 2000]

Nutzungsdauer von Asphalttschichten – Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

Lüthje, 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 [mm]	Durchgang [M-%]	Anforderung [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 ³]: 2,73		

Tab.A-1: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 11/16

Sieböffnung [mm]	Durchgang [M-%]	Anforderung [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 ³]: 2,73		

Tab.A-2: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 8/11

Sieböffnung [mm]	Durchgang [M-%]	Anforderung [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 ³]: 2,73		

Tab.A-3: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 5/8

Sieböffnung [mm]	Durchgang [M-%]	Anforderung [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 ³]: 2,72		

Tab.A-4: Korngrößenverteilung und Rohdichte der Lieferkörnung 2/5

Sieböffnung [mm]	Durchgang [M-%]	Anforderung [M-%]
4	100	100
2	85,3	85-99
0,063	8,6	≤16
Rohdichte [g/cm ³]: 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 [mm]	Gesteinsroh dichte [g/cm ³]	Masseanteil [M-%]	Spezifische Oberfläche [cm ² /cm ³]	Oberfläche Mineralstoffe [cm ² /g]	Anteil schlecht geformter Körner [M-%/100]	Faktor schlecht geformter Körner [cm ² /100]	Bitumen- filmdicke [g/cm ² *100]	Bindemittel- bedarf [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 [mm]	Gesteinsroh dichte [g/cm ³]	Masseanteil [M-%]	Spezifische Oberfläche [cm ² /cm ³]	Oberfläche Mineralstoffe [cm ² /g]	Anteil schlecht geformter Körner [M-%/100]	Faktor schlecht geformter Körner [cm ² /100]	Bitumen- filmdicke [g/cm ² *100]	Bindemittel- bedarf [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 [mm]	Gesteinsroh dichte [g/cm ³]	Masseanteil [M-%]	Spezifische Oberfläche [cm ² /cm ³]	Oberfläche Mineralstoffe [cm ² /g]	Anteil schlecht geformter Körner [M-%/100]	Faktor schlecht geformter Körner [cm ² /100]	Bitumen- filmdicke [g/cm ² *100]	Bindemittel- bedarf [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 [mm]	Gesteinsroh dichte [g/cm ³]	Masseanteil [M-%]	Spezifische Oberfläche [cm ² /cm ³]	Oberfläche Mineralstoffe [cm ² /g]	Anteil schlecht geformter Körner [M-%/100]	Faktor schlecht geformter Körner [cm ² /100]	Bitumen- filmdicke [g/cm ² *100]	Bindemittel- bedarf [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 [mm]	SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung (Bitumen 25/55-55A)					
	Soll	1. Variante	2. Variante	3. Variante	4. Variante	5. 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 [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 [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 [mm]	AC 16 B S SG (Bitumen 10/40-65A)					
	Soll	1. Variante	2. Variante	3. Variante	4. Variante	5. 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 [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 [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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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\mm²]
 E_max 31.308 [N\mm²]
 m 25.531 [-]
 b1 -0,66275688 [-]
 b2 1,83275181 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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\mm²]
 E_max 24.881 [N\mm²]
 m 23.348 [-]
 b1 -0,666037 [-]
 b2 1,62763846 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
E_max 26.917 [N/mm²]
m 27.361 [-]
b1 -0,6341691 [-]
b2 1,83822575 [-]
R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 23.844 [N/mm²]
 m 26.144 [-]
 b1 -0,7193542 [-]
 b2 1,9942869 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 20.864 [N/mm²]
 m 24.769 [-]
 b1 -0,7534528 [-]
 b2 2,03094733 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
E_max 27.004 [N/mm²]
m 25.714 [-]
b1 -0,6933735 [-]
b2 1,82386017 [-]
R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 20397 [N/mm²]
 m 24267 [-]
 b1 -0,653304 [-]
 b2 1,74423523 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 27.860 [N/mm²]
 m 29.084 [-]
 b1 -0,4123559 [-]
 b2 2,14235441 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 24.380 [N/mm²]
 m 26.159 [-]
 b1 -0,4875126 [-]
 b2 2,0710788 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 28.954 [N/mm²]
 m 27.755 [-]
 b1 -0,4610748 [-]
 b2 2,28798676 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 28.048 [N/mm²]
 m 25.791 [-]
 b1 -0,4118101 [-]
 b2 1,17253445 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 29.768 [N/mm²]
 m 27.579 [-]
 b1 -0,4244998 [-]
 b2 1,2361237 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 28.673 [N/mm²]
 m 25.322 [-]
 b1 -0,5469448 [-]
 b2 1,28318623 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
E_max 32.322 [N/mm²]
m 29.066 [-]
b1 -0,4388743 [-]
b2 1,60810851 [-]
R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
E_max 36.259 [N/mm²]
m 29.152 [-]
b1 -0,4045114 [-]
b2 1,77528492 [-]
R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 35.574 [N/mm²]
 m 28.820 [-]
 b1 -0,428294 [-]
 b2 1,63258287 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 29.411 [N/mm²]
 m 27.663 [-]
 b1 -0,4867545 [-]
 b2 1,37242185 [-]
 R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
E_max 28.539 [N/mm²]
m 27.920 [-]
b1 -0,497384 [-]
b2 1,42272376 [-]
R² 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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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 ²]	[promille]	[N/mm ²]	[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/mm²]
 E_max 26.906 [N/mm²]
 m 27.327 [-]
 b1 -0,5622268 [-]
 b2 1,39727394 [-]
 R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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
R² 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 ²]	[-]	[promille]	[N/mm ²]
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

R² 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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
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/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
-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/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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 ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/oo				
Lastwechselzahl bei 40 o/oo	323	486	1772	860,333333
Dehnung (MW) bei 40 o/oo	40,022805	40,0065585	40,0163265	40,01523
Dehnung (Reg) bei 40 o/oo	40,4042983	39,9521244	39,4270731	39,9278319
Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo	372,210458	213,969503	31,0204082	205,733456
Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo	327,124718	194,247901	35,7584772	185,710365
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/oo				
Lastwechselzahl bei 40 o/oo	-	672	695	683,5
Dehnung (MW) bei 40 o/oo	-	40	40	40
Dehnung (Reg) bei 40 o/oo	-	39,4372127	39,9391163	39,6881645
Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo	-	129,005059	135,204082	132,10457
Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo	-	111,263413	120,897977	116,080695
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/oo				
Lastwechselzahl bei 40 o/oo	102	102	102	102
Dehnung (MW) bei 40 o/oo	44,2496381	48,615435	41,5809769	44,81535
Dehnung (Reg) bei 40 o/oo	44,0502522	48,3090215	41,8185661	44,7259466
Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo	2814,05823	3034,57316	2646,20823	2831,6132
Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo	2796,31711	3019,43352	2623,24107	2812,99724
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/oo				
Lastwechselzahl bei 40 o/oo	252	301	310	287,666667
Dehnung (MW) bei 40 o/oo	40,0704462	40,040309	40	40,0369184
Dehnung (Reg) bei 40 o/oo	40,3516786	40,5153634	40,2970223	40,3880215
Dehnungsrate (MW) bei 40 o/oo	633,176786	487,907289	449,503311	523,529129
Dehnungsrate (Reg) bei 40 o/oo	568,203225	456,874797	421,992363	482,356795
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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
Ergebnisse bei 40 o/00				
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
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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
Ergebnisse bei 40 o/00				
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
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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
Ergebnisse bei 40 o/00				
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
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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
Ergebnisse bei 40 o/00				
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
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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

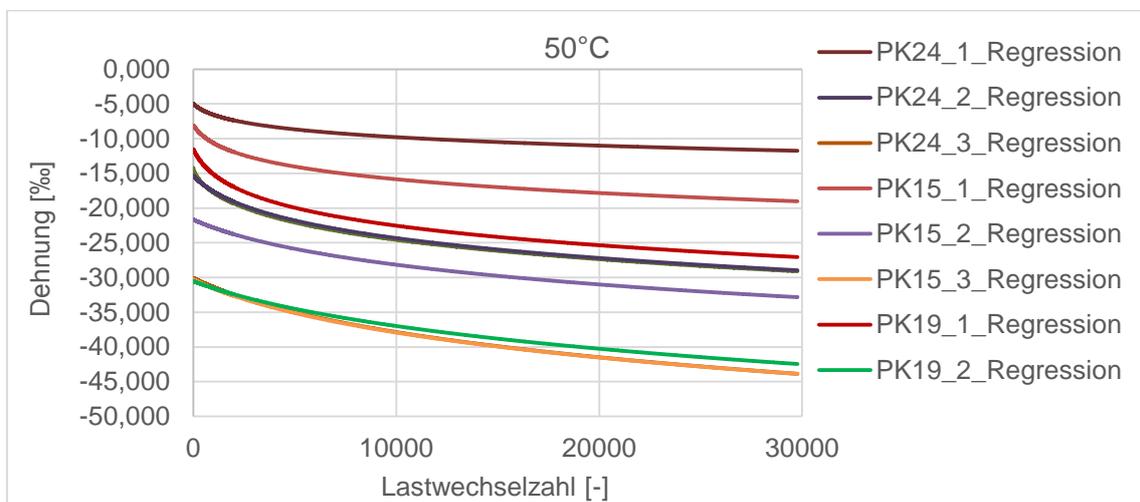
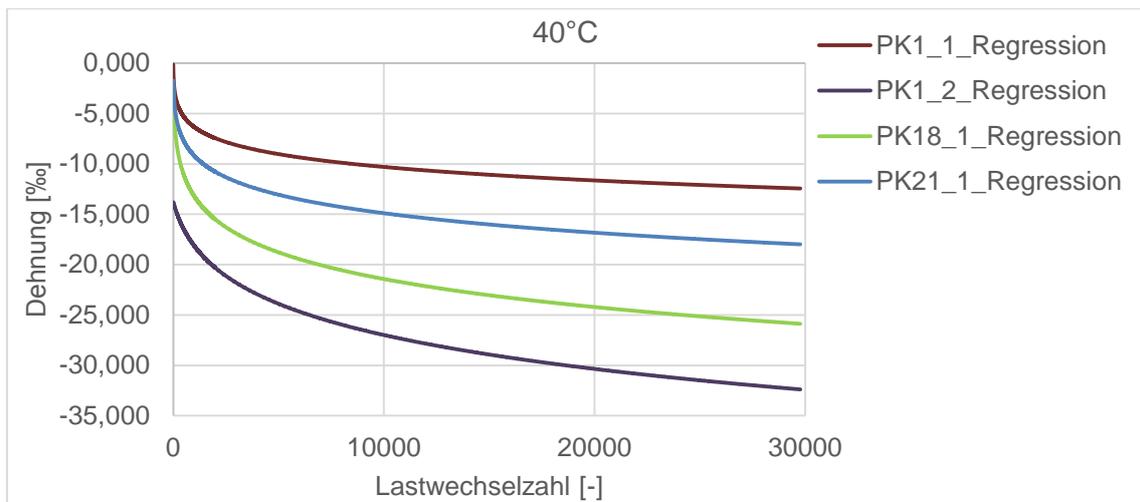
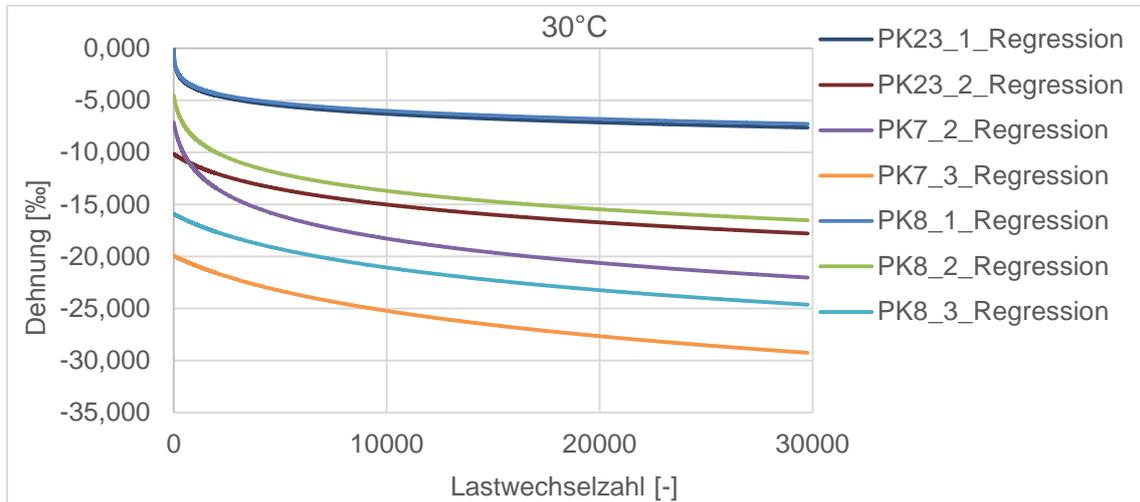
SMA 16 B S: 6,03 M-%

	B1-3-05	B1-3-06	B1-3-14	Mittelwert
Ergebnisse im Wendepunkt				
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!
Ergebnisse bei 40 o/00				
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!
Ergebnisse bei 9.900 LW				
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

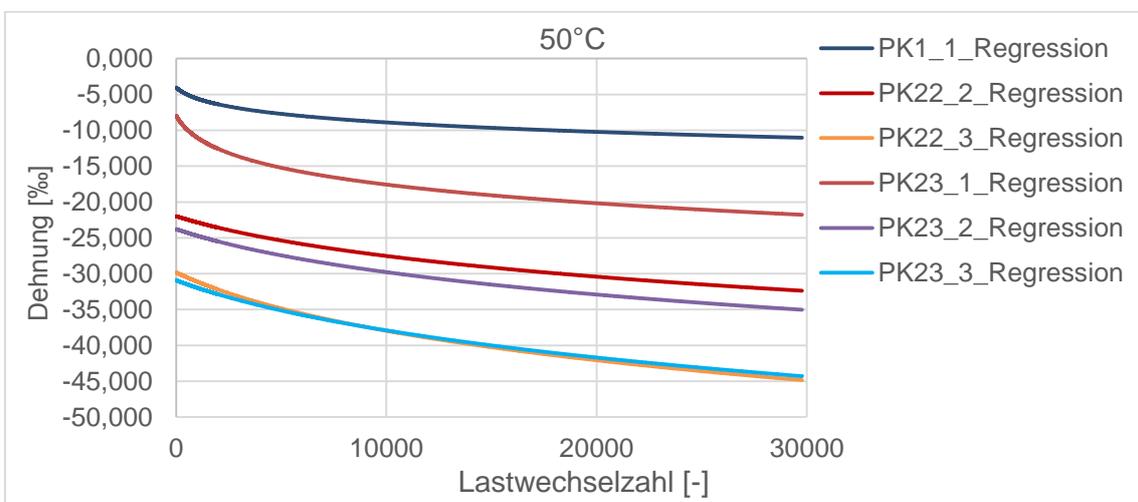
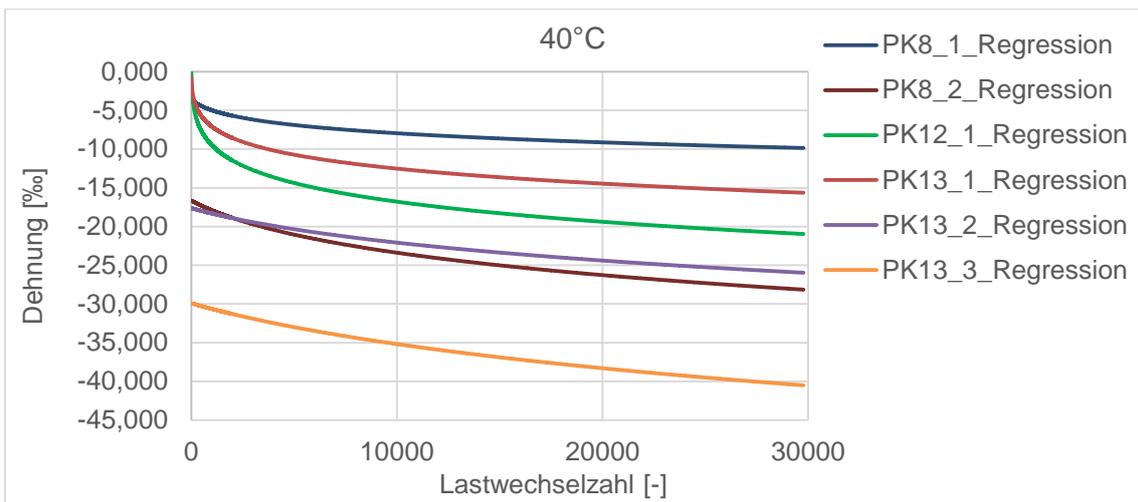
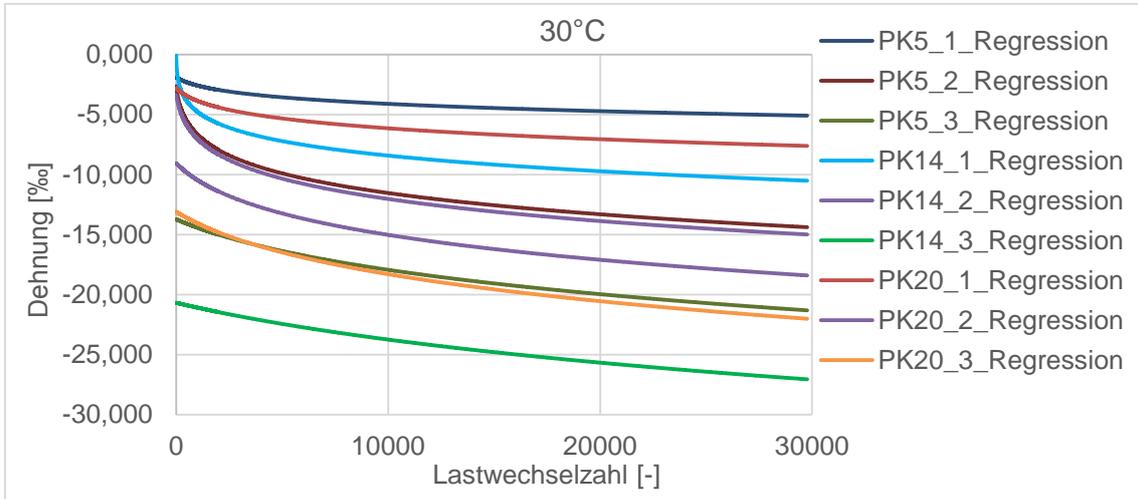
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,03 M-%

a1	-0,035015	b	1,68531429		
a2	0,599561	T₀	-153,06706	R²	0,97438212



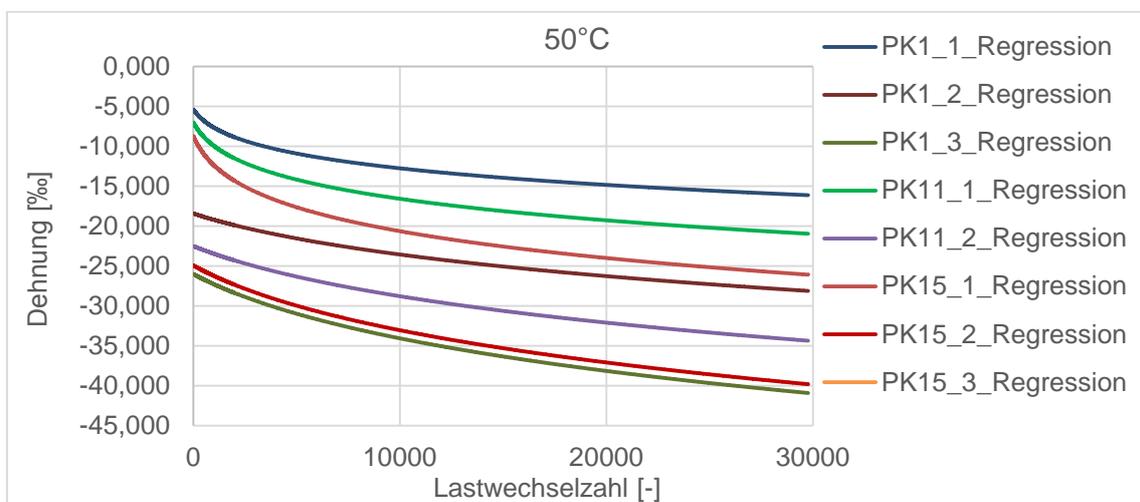
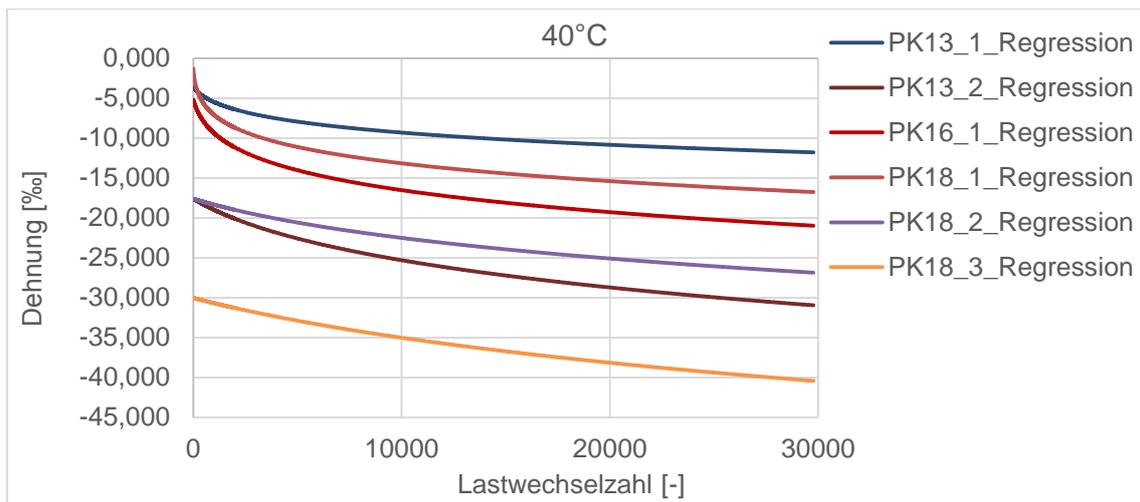
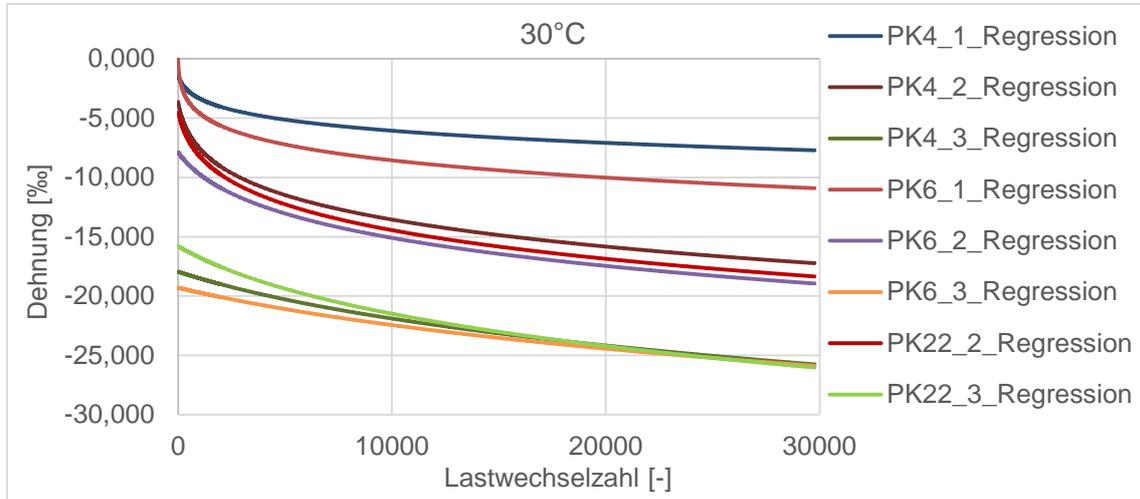
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,50 M-%

a1 -0,0679695 **b** 1,98223503
a2 0,71376929 **T₀** -29,85778 **R²** 0,97699878



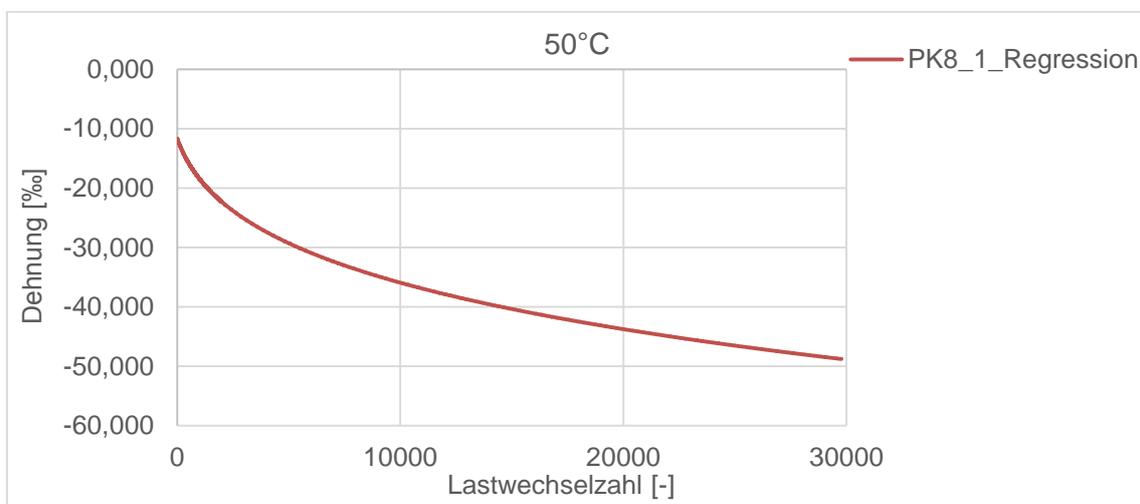
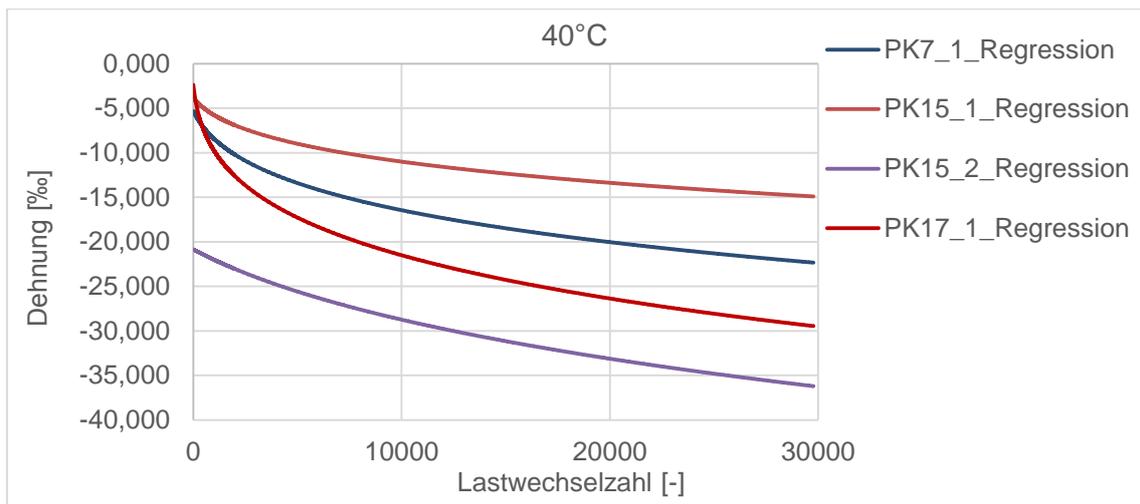
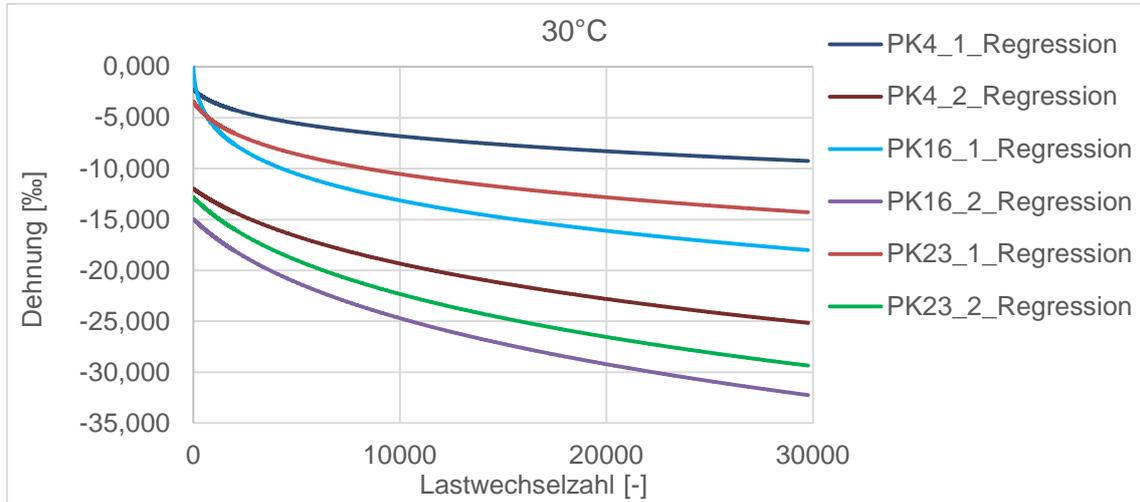
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,79 M-%

a1 -0,0393830 **b** 2,16614504
a2 0,67135199 **T₀** -43,077685 **R²** 0,97458078



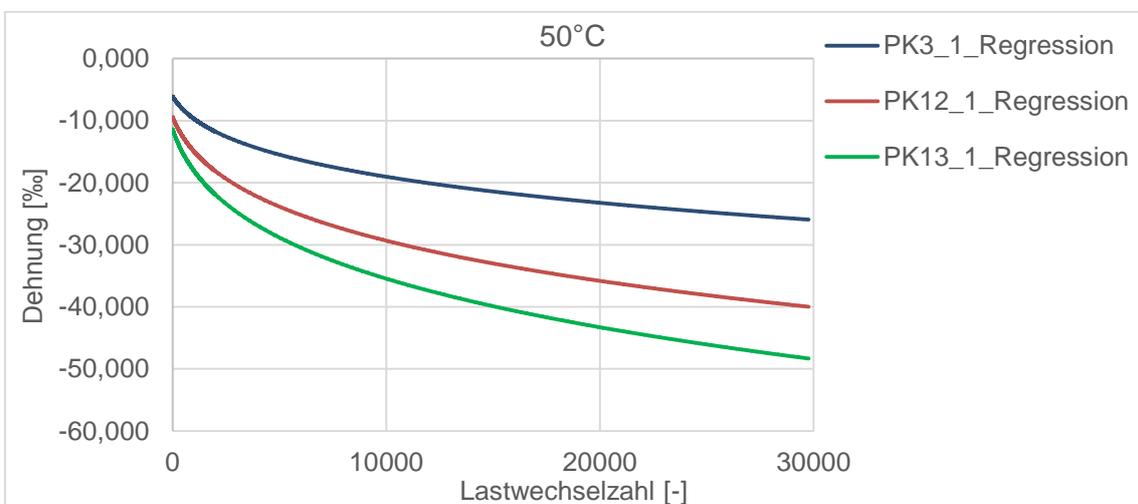
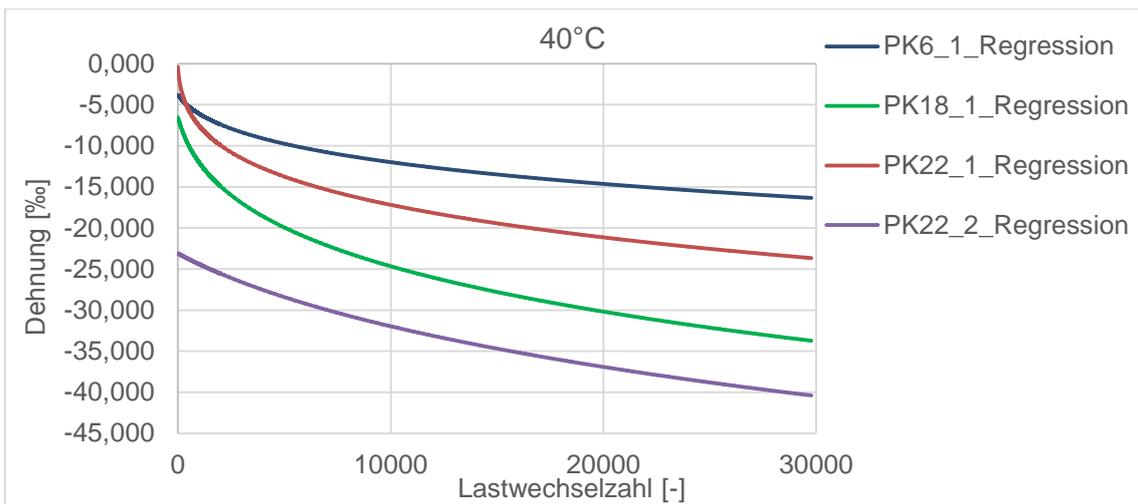
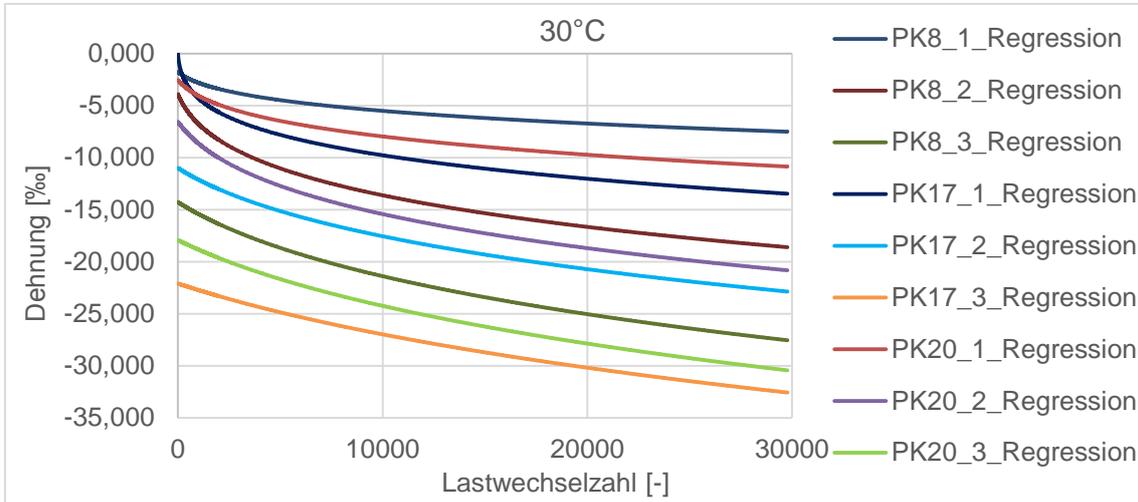
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 7,52 M-%

a1 -0,1096052 **b** 2,82382103
a2 0,79186817 **T₀** 11,261532 **R²** 0,95904491



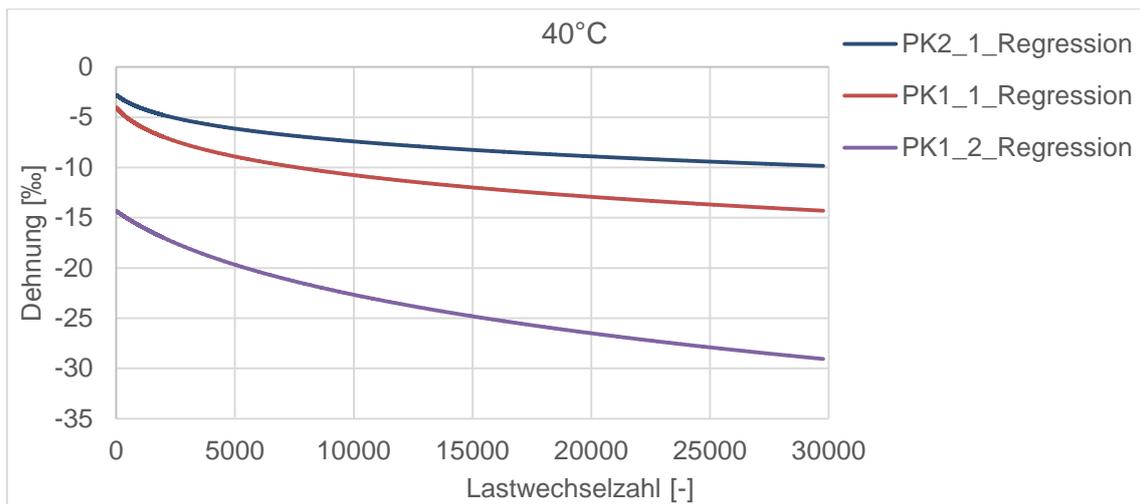
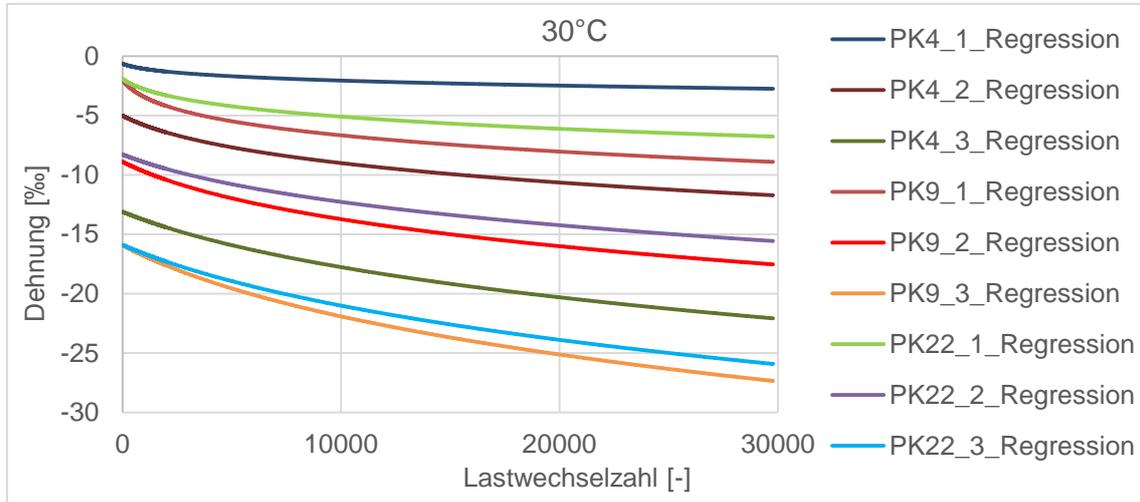
SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A; 7,01 M-%

a1 -0,0893896 **b** 2,86031286
a2 0,76490663 **T₀** 12,4422899 **R²** 0,94275606



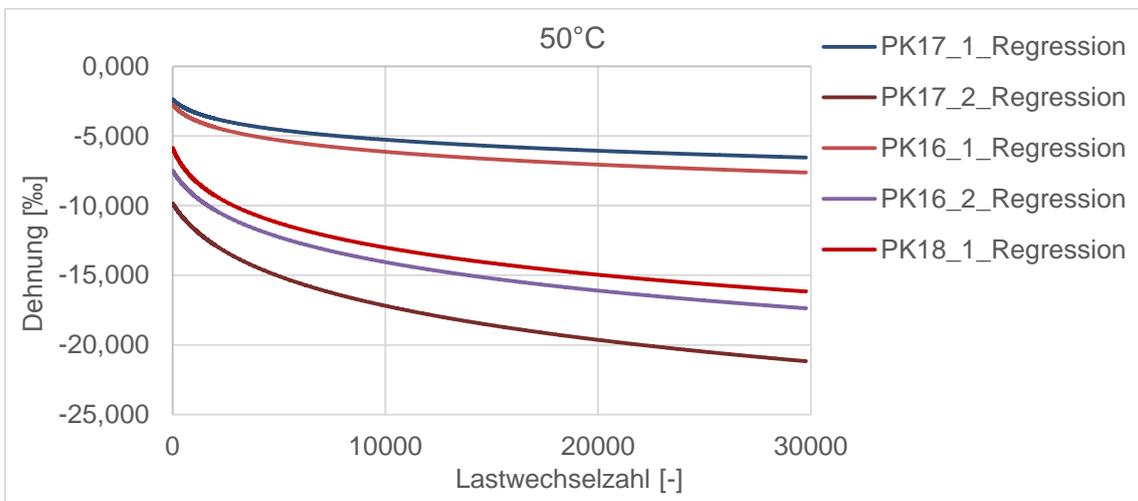
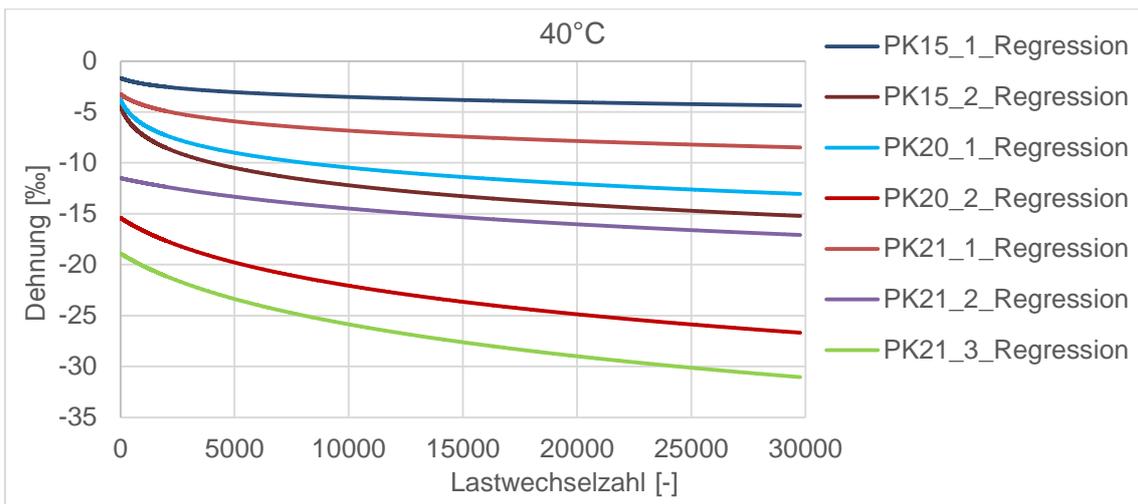
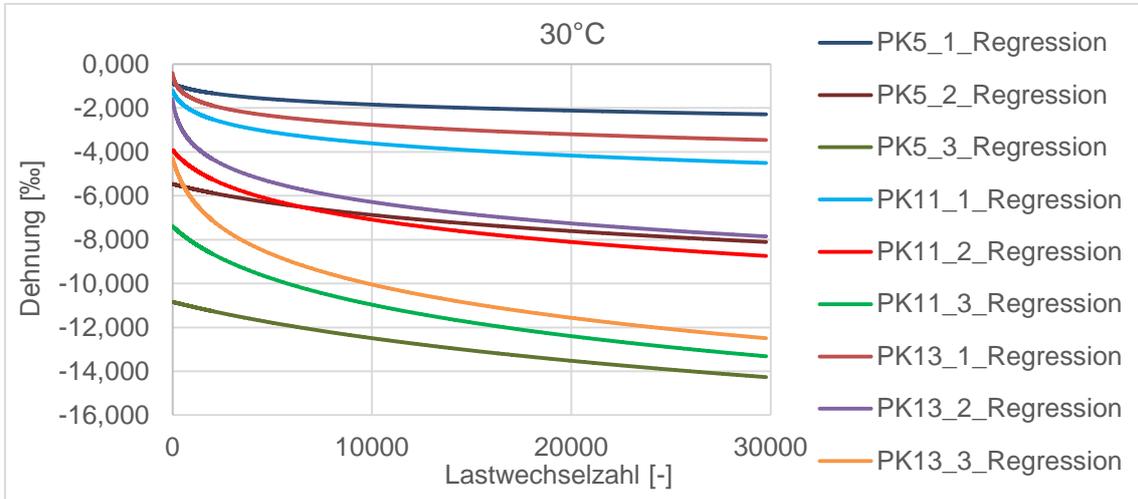
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

a1 -0,0335639 **b** 2,64468838
a2 0,88703426 **T₀** -12,247871 **R²** 0,99299126



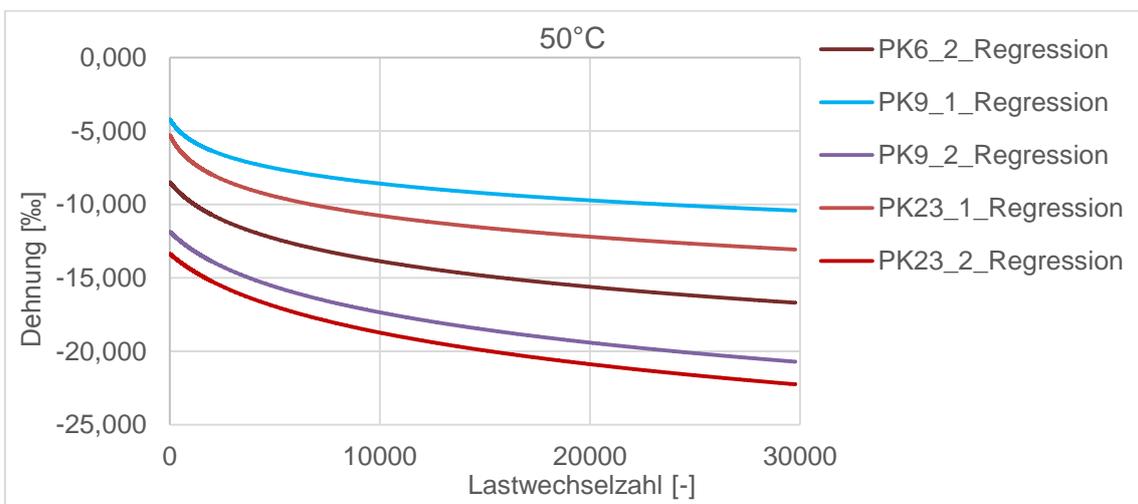
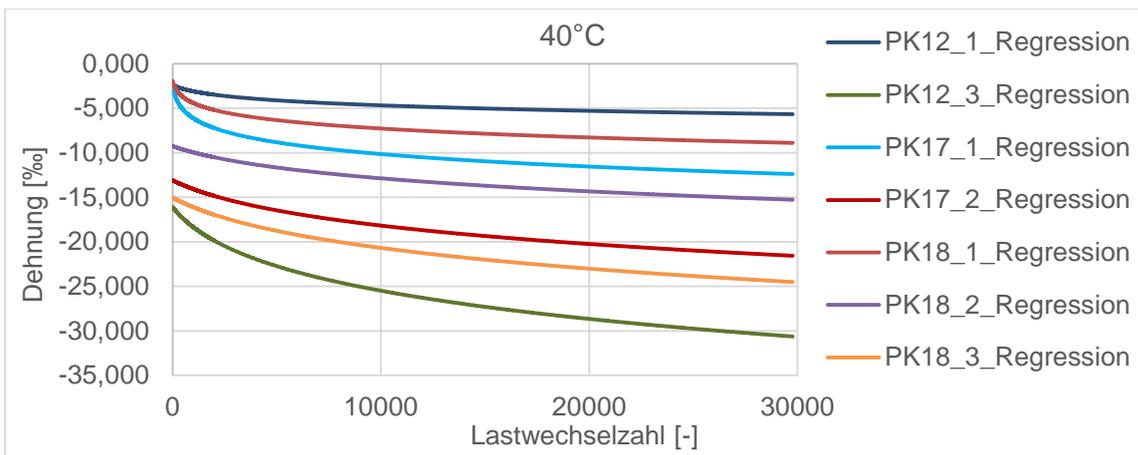
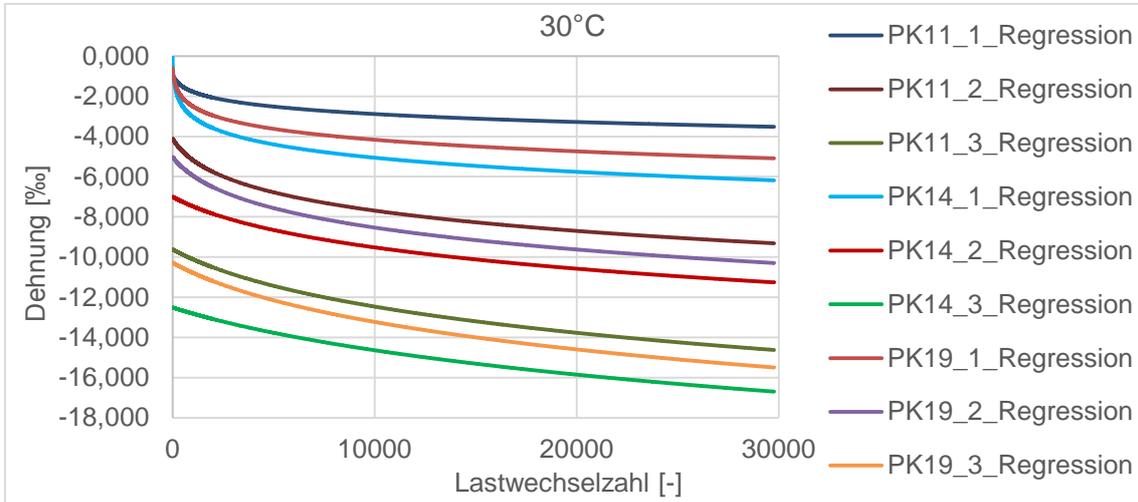
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

a1 -0,1264568 **b** 2,0043024
a2 0,96419076 **T₀** 7,63614796 **R²** 0,96885756



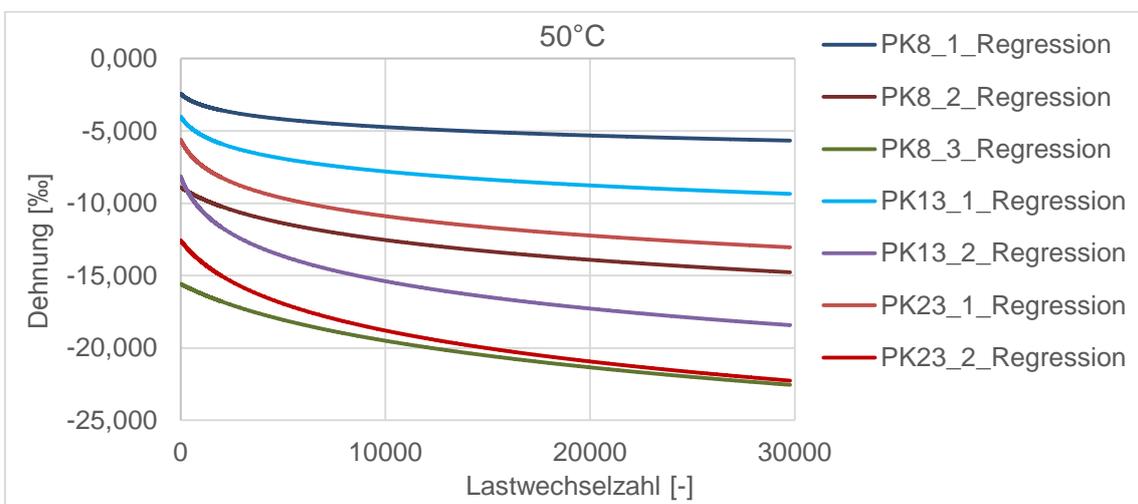
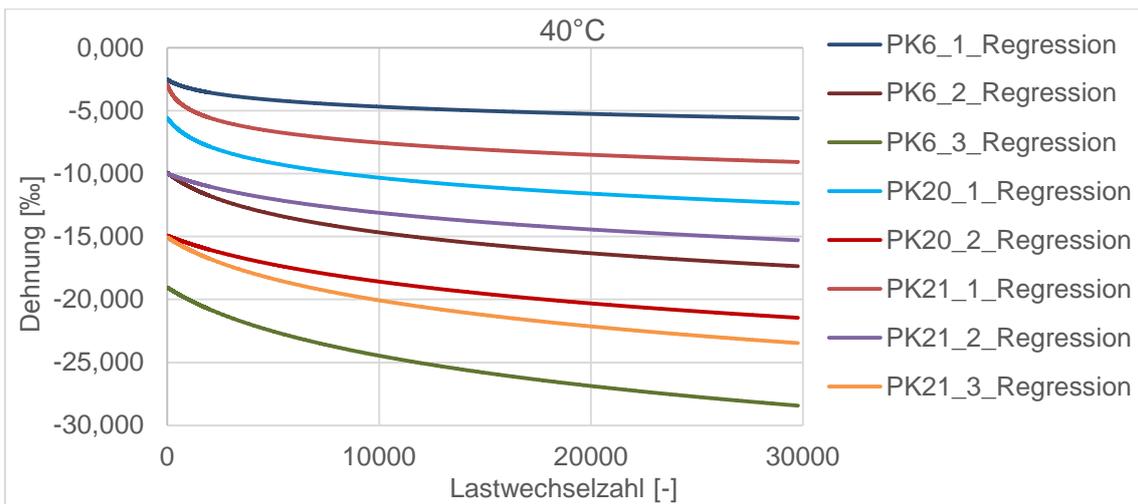
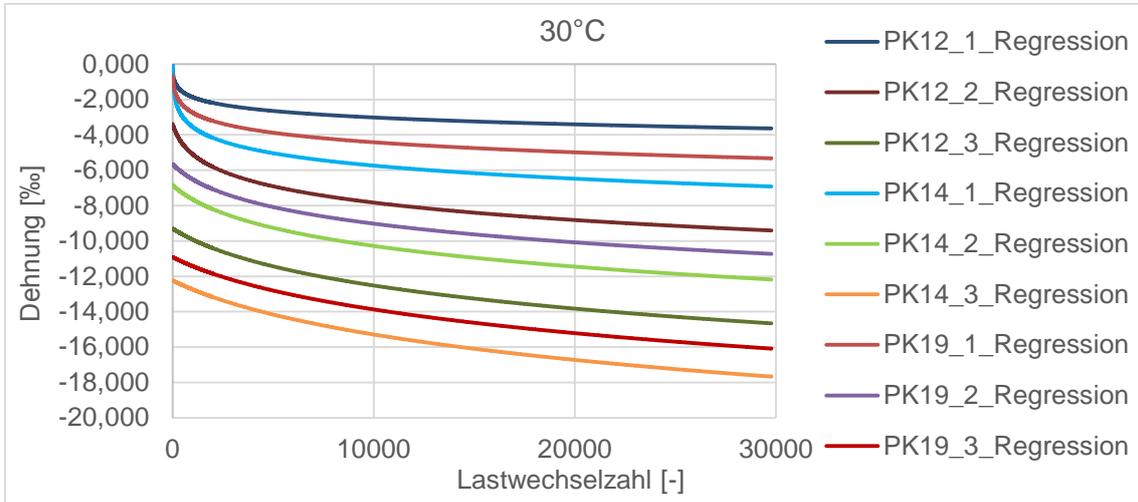
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

a1 -0,0686584 **b** 1,79399616
a2 0,77323955 **T₀** -12,514904 **R²** 0,99591868



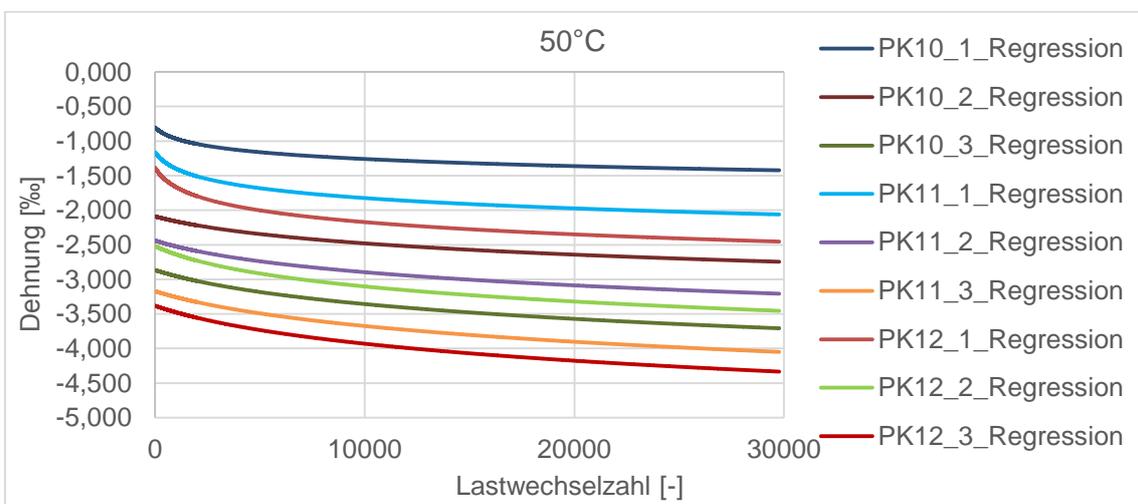
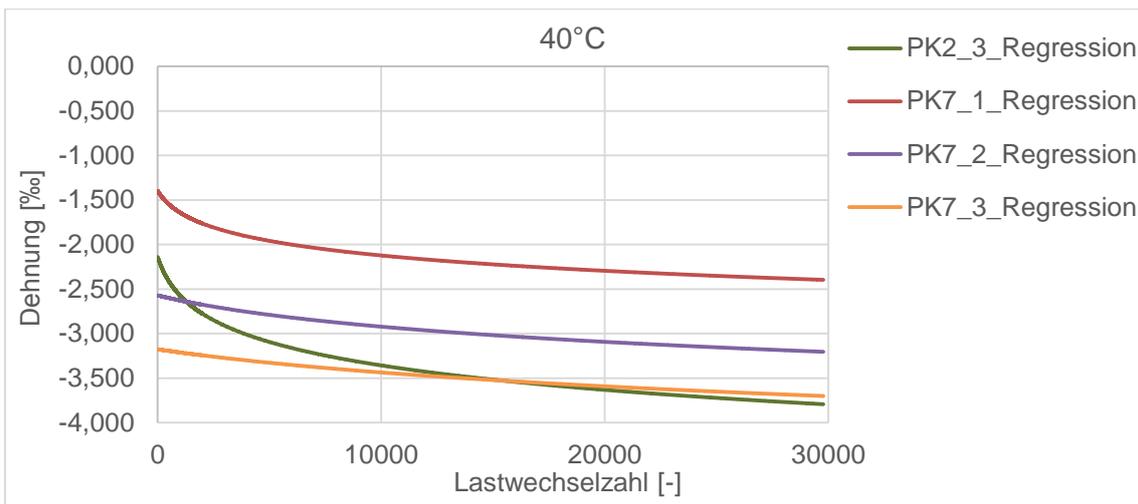
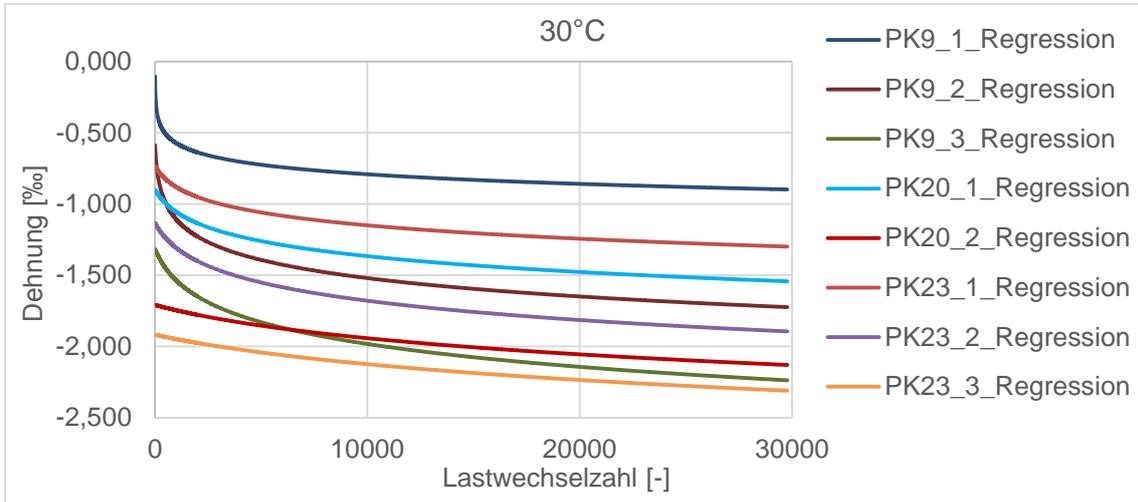
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

a1 -0,0567393 **b** 1,66844244
a2 0,76623611 **T₀** -33,098747 **R²** 0,98428542



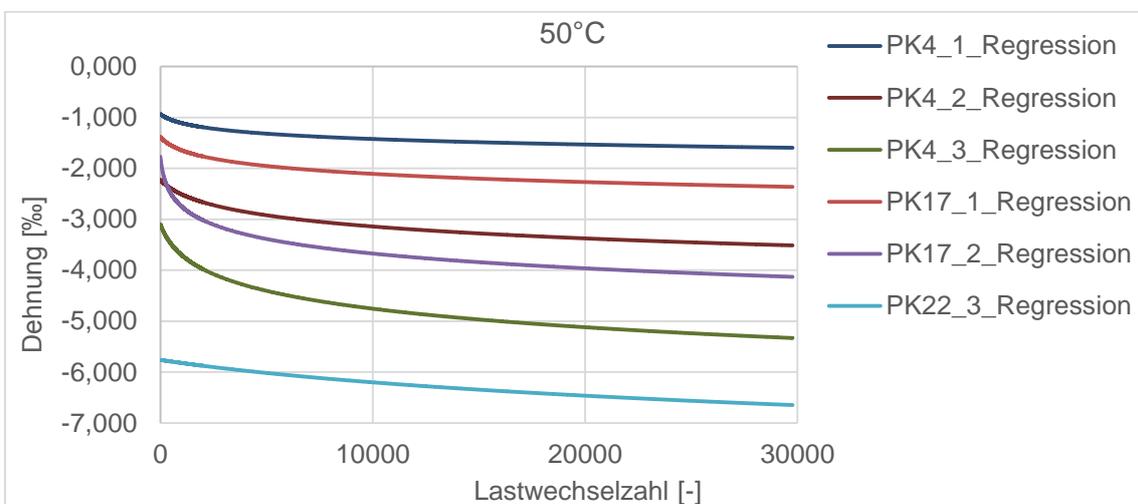
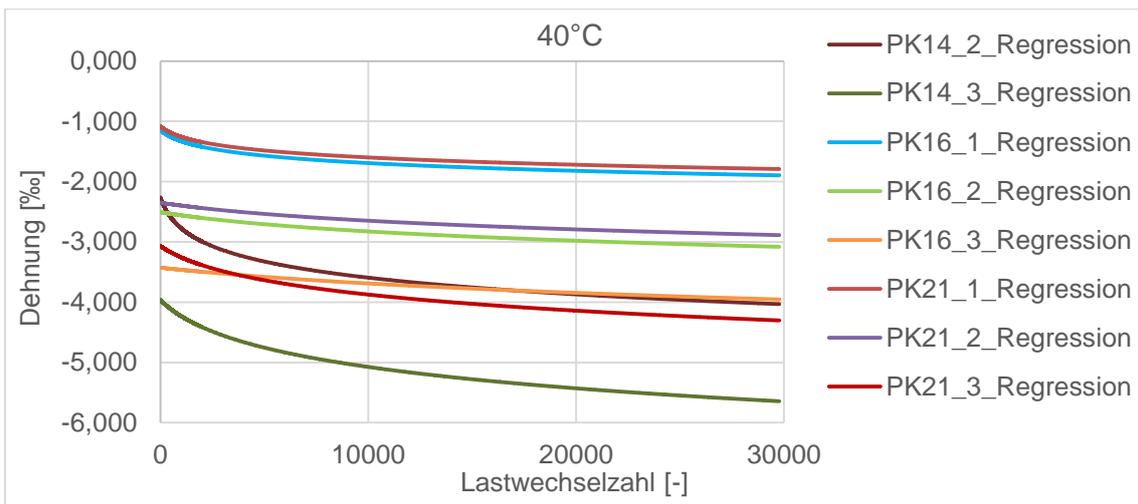
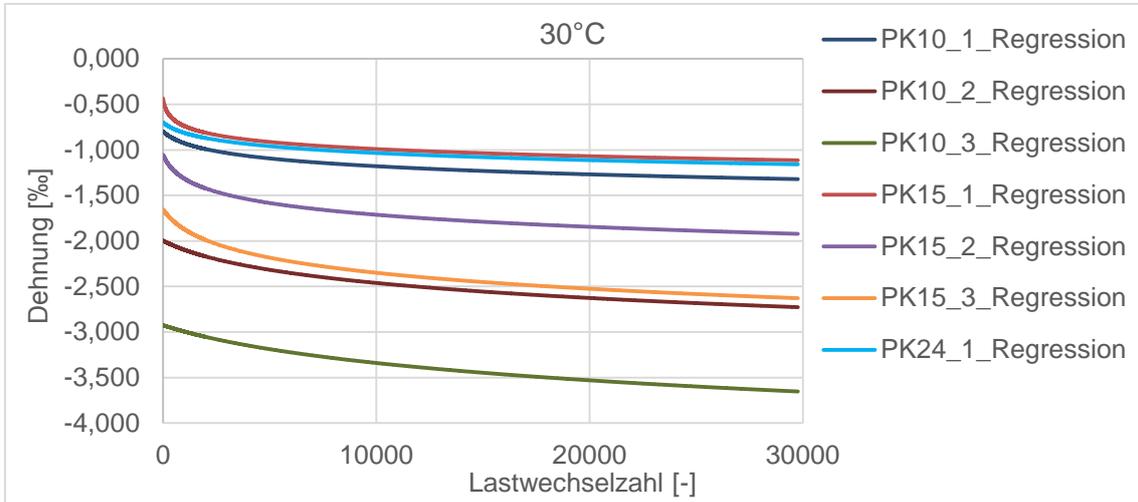
AC 16 B S SG: 4,75 M-%

a1 -0,0490007 **b** 1,12666272
a2 0,60130619 **T₀** -4,6776168 **R²** 0,97082071



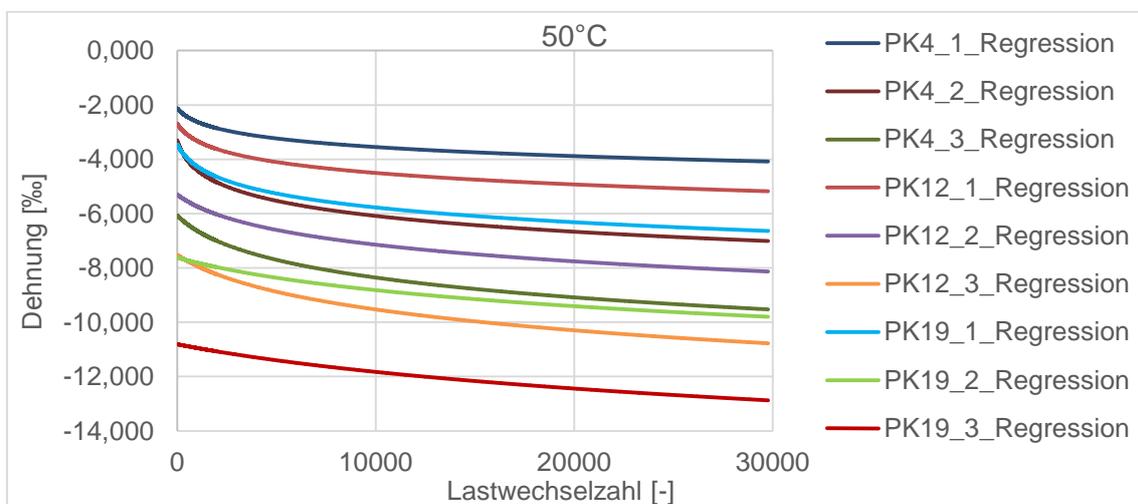
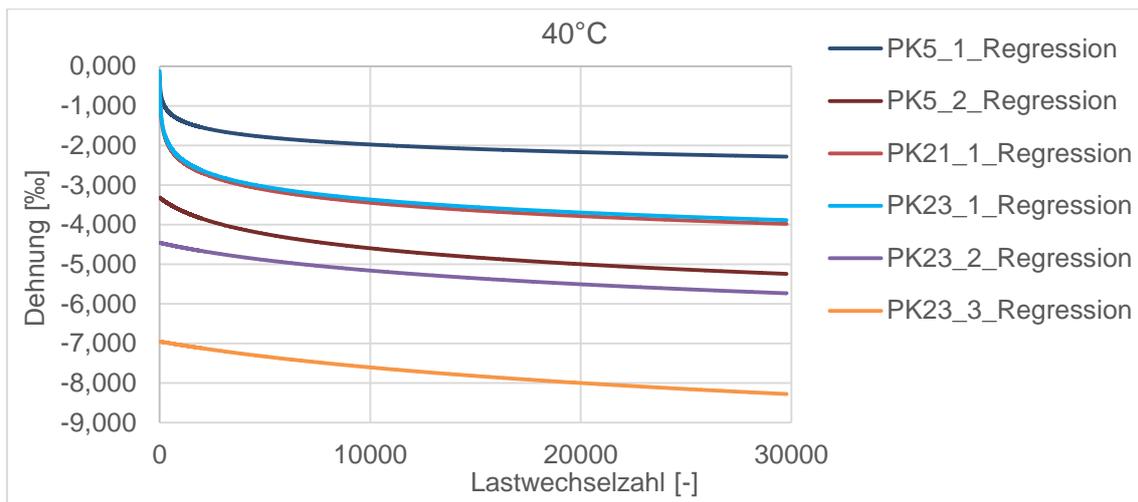
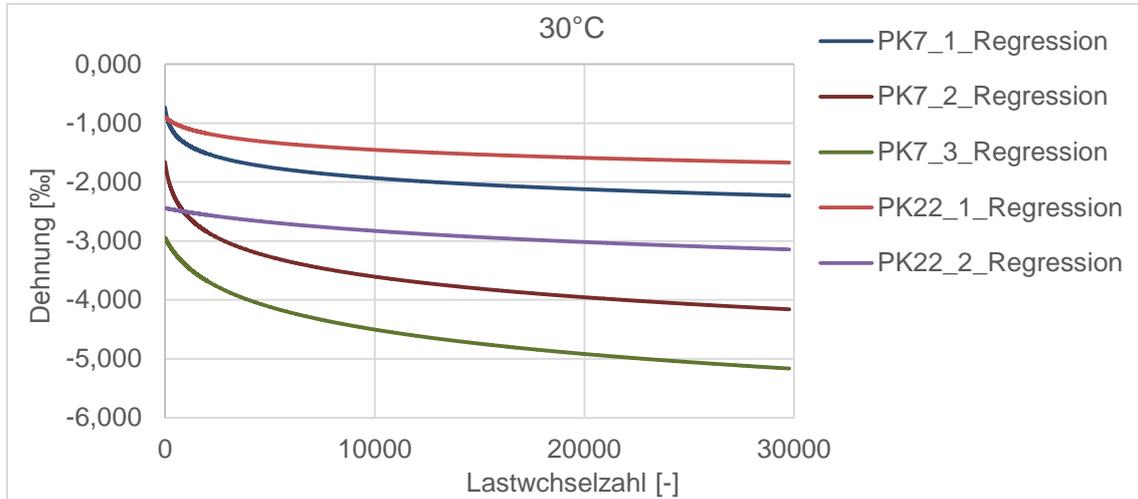
AC 16 B S SG: 5,00 M-%

a1 -0,1244754 **b** 1,05528142
a2 0,94924772 **T₀** -8,9224660 **R²** 0,96581418



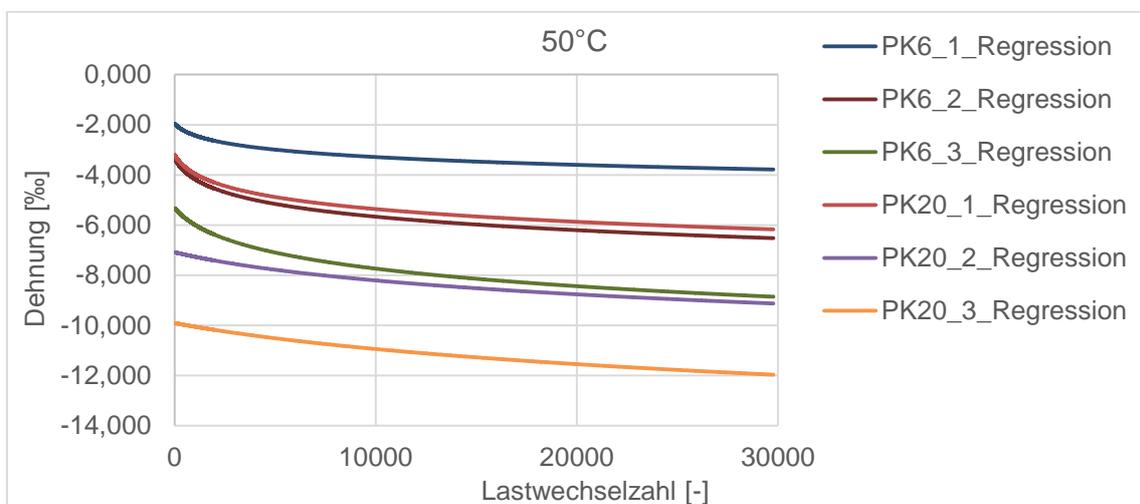
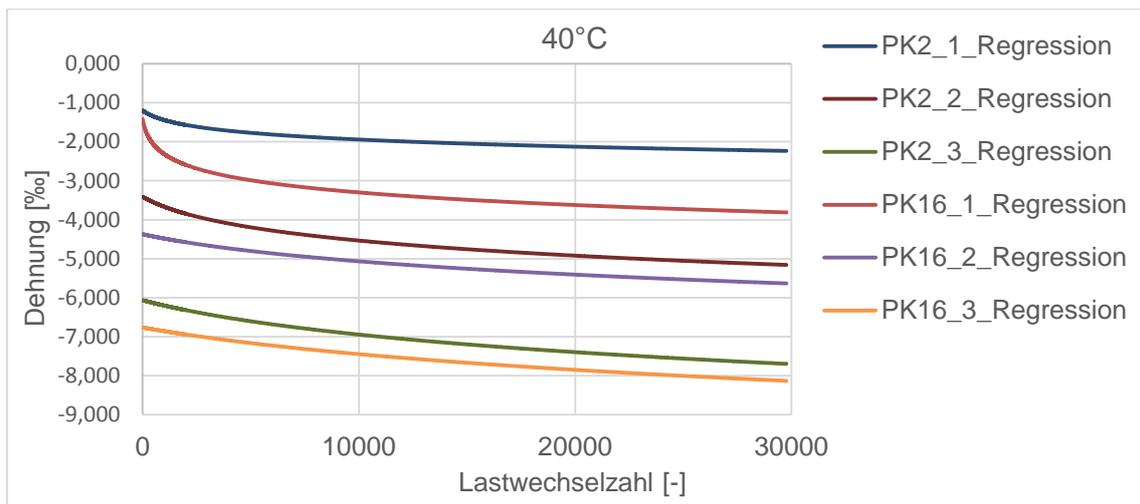
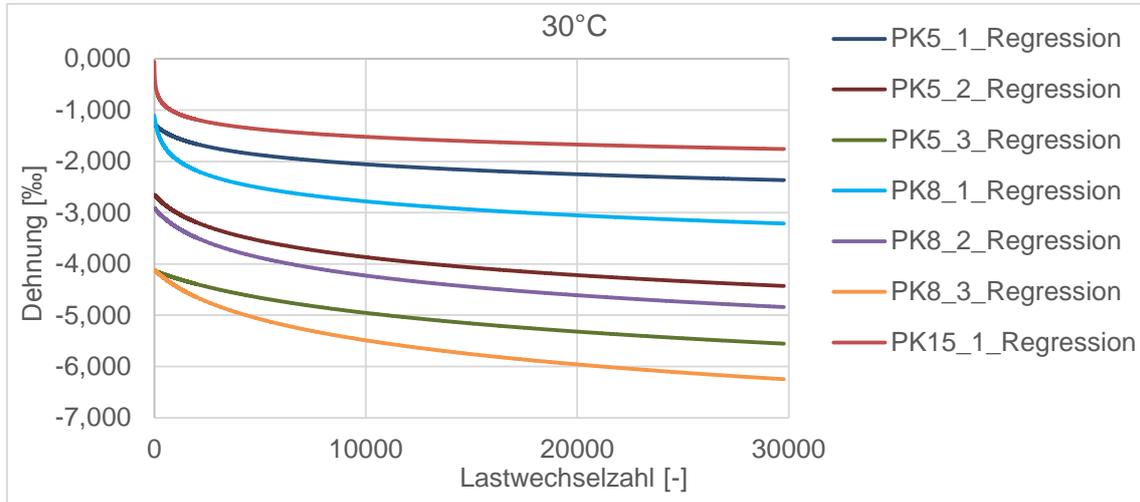
AC 16 B S SG: 5,68 M-%

a1 -0,0666928 **b** 1,28843783
a2 0,63833092 **T₀** -10,963202 **R²** 0,96782893



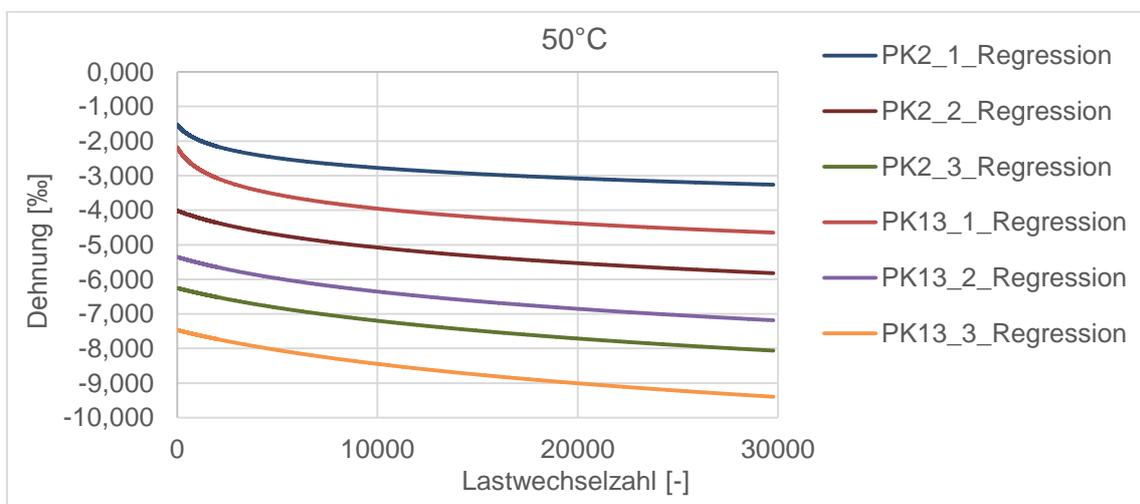
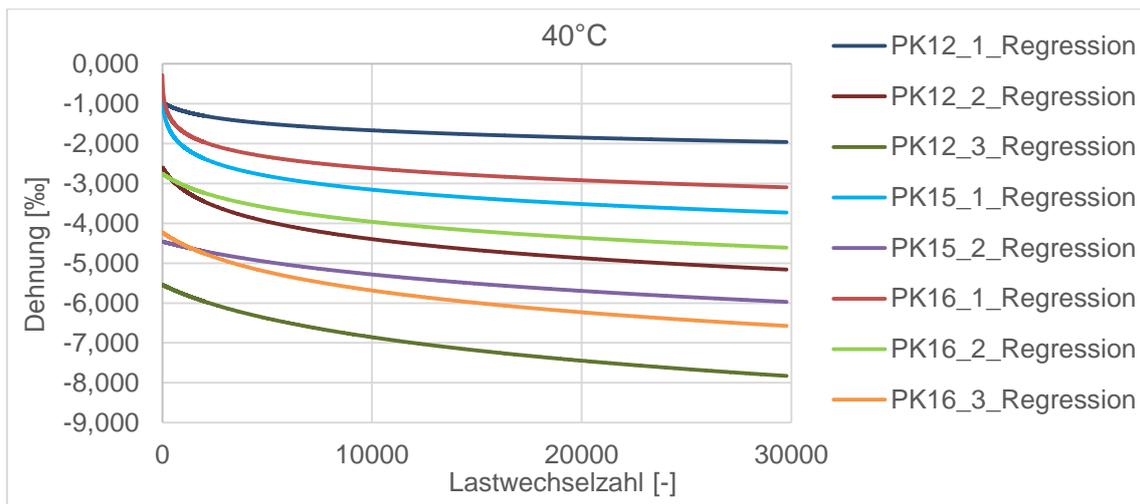
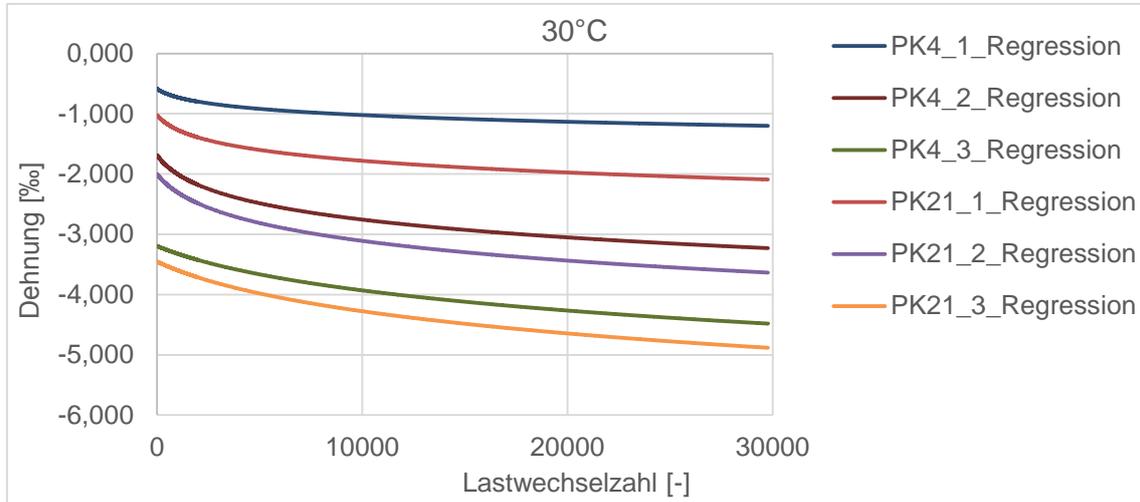
AC 16 B S SG: 5,98 M-%

a1 -0,043793 **b** 1,29753287
a2 0,6416424 **T₀** -35,806308 **R²** 0,97897657



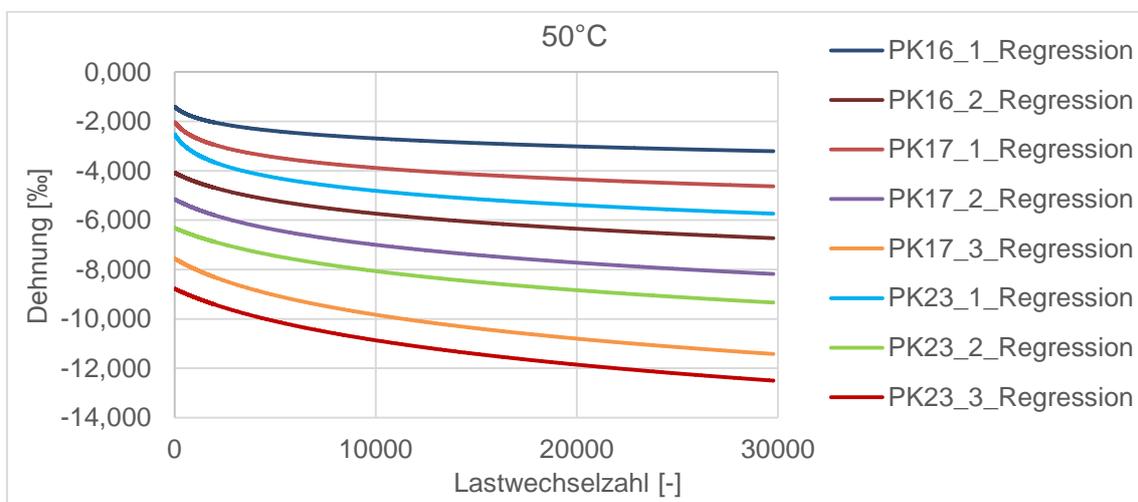
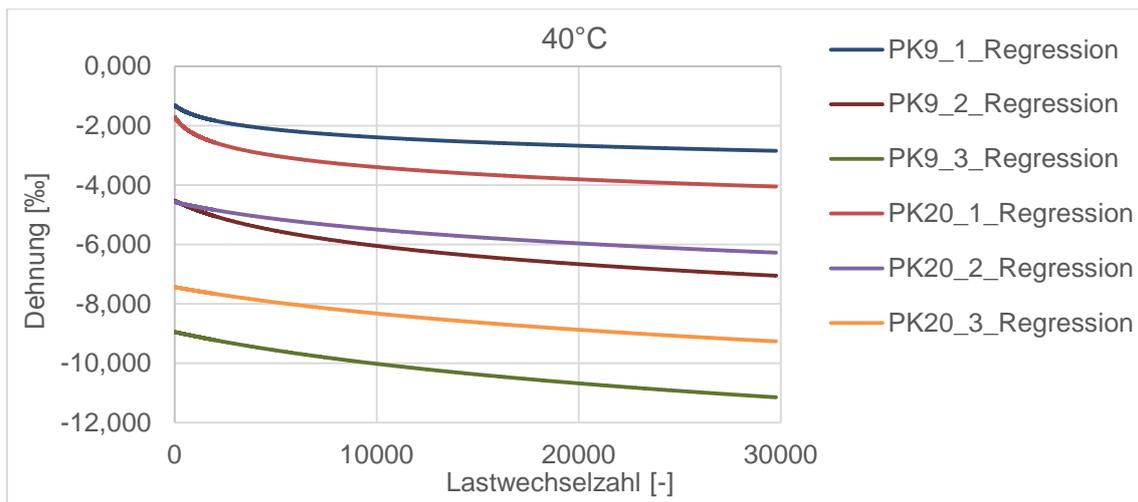
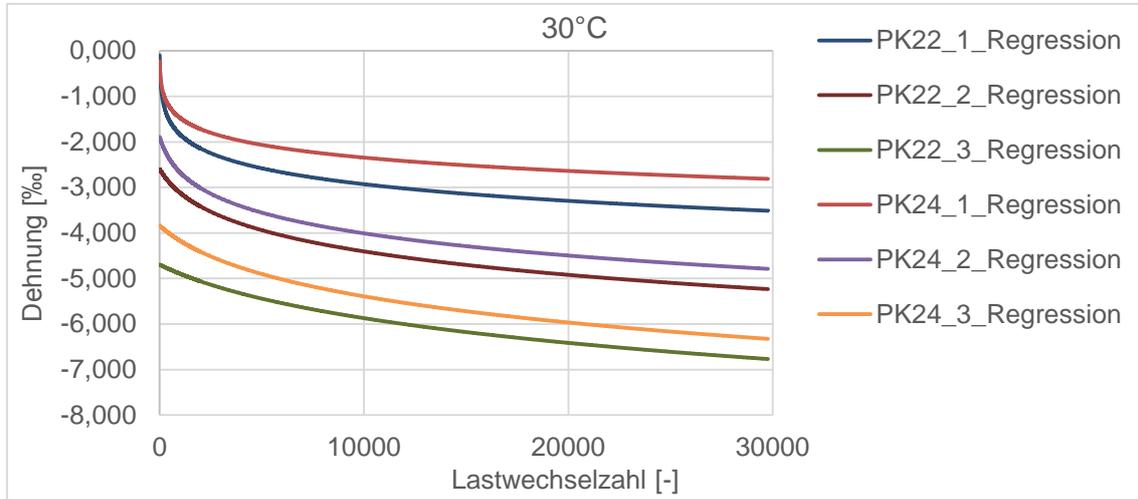
AC 16 B S SG: 6,55 M-%

a1 -0,0418701 **b** 1,49380245
a2 0,69602261 **T₀** -17,917805 **R²** 0,99209992



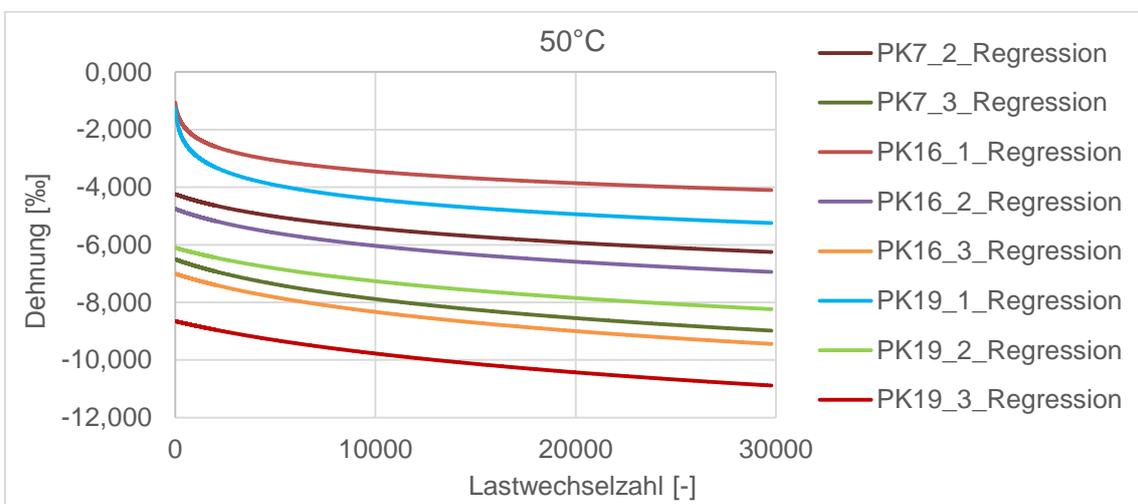
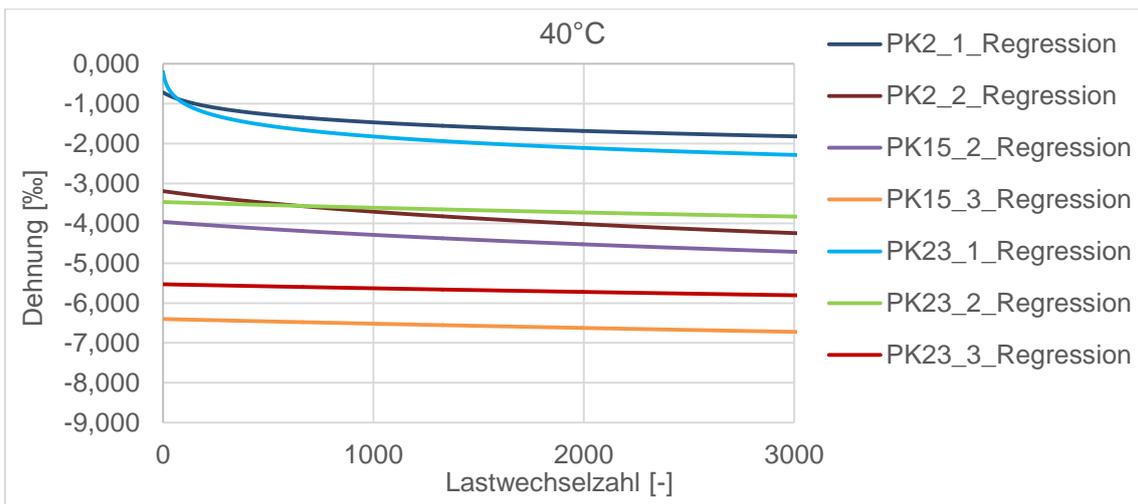
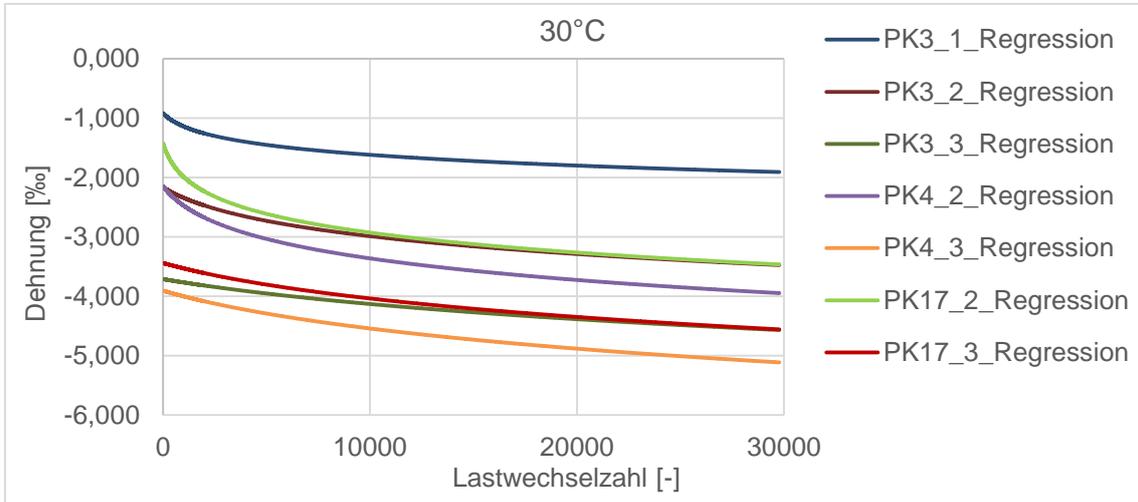
AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

a1 -0,0379717 **b** 1,62269513
a2 0,67532392 **T₀** -24,683544 **R²** 0,97403418



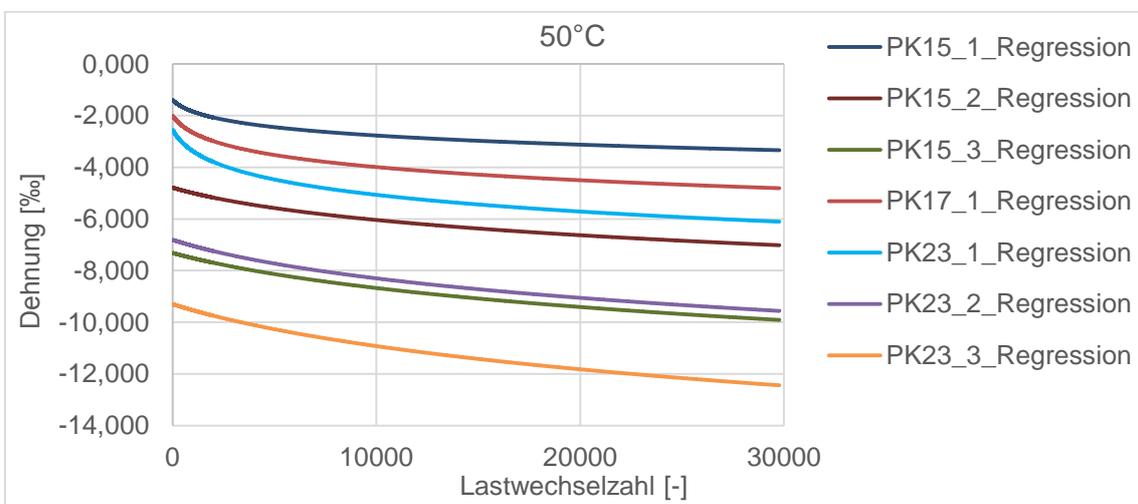
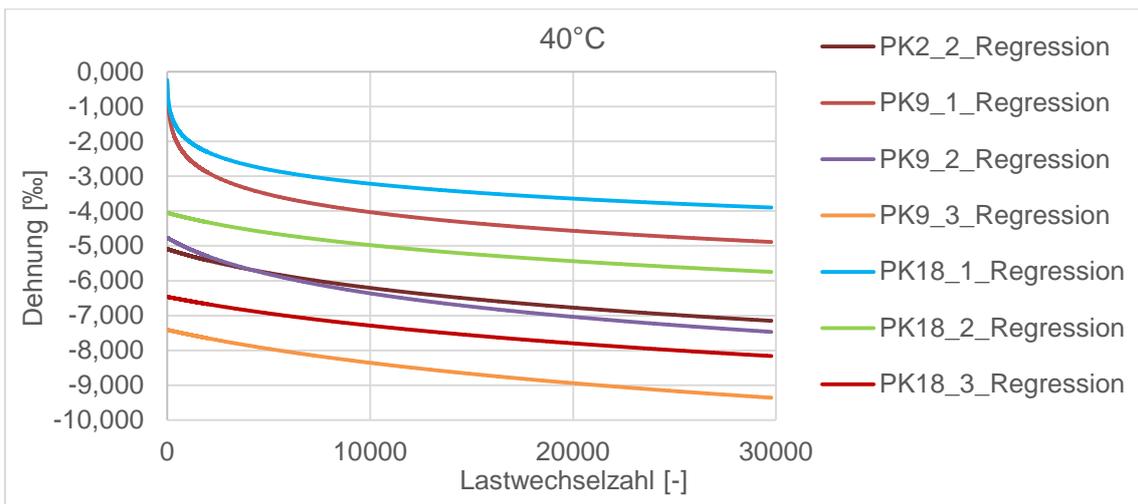
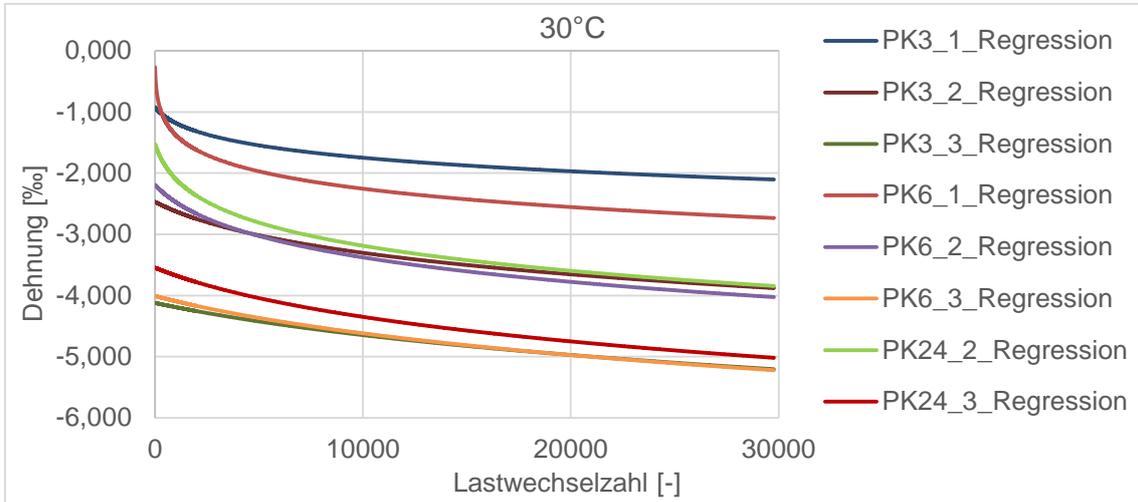
SMA 11 B S: 5,17 M-%

a1 -0,0568499 **b** 1,53280404
a2 0,62705811 **T₀** 1,8552633 **R²** 0,9955173



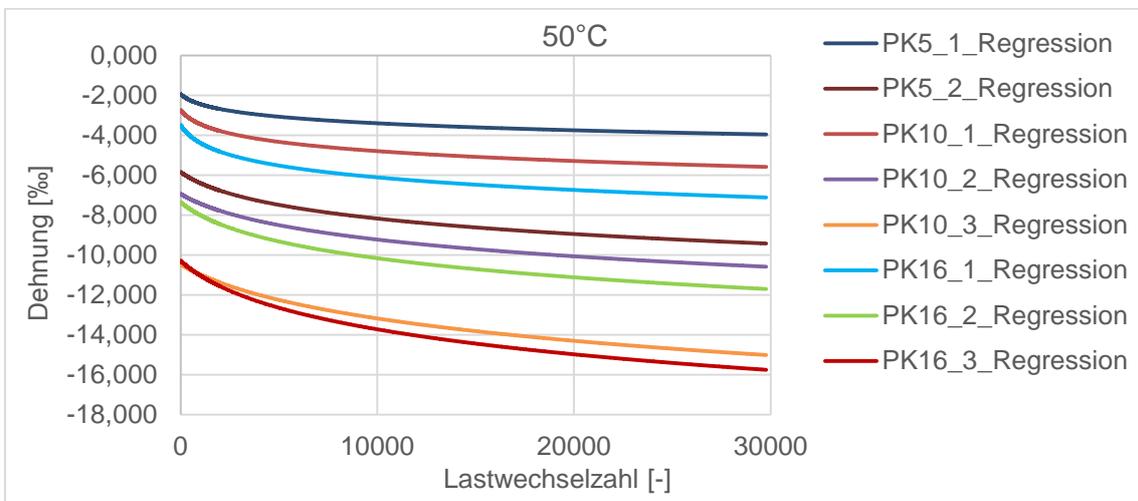
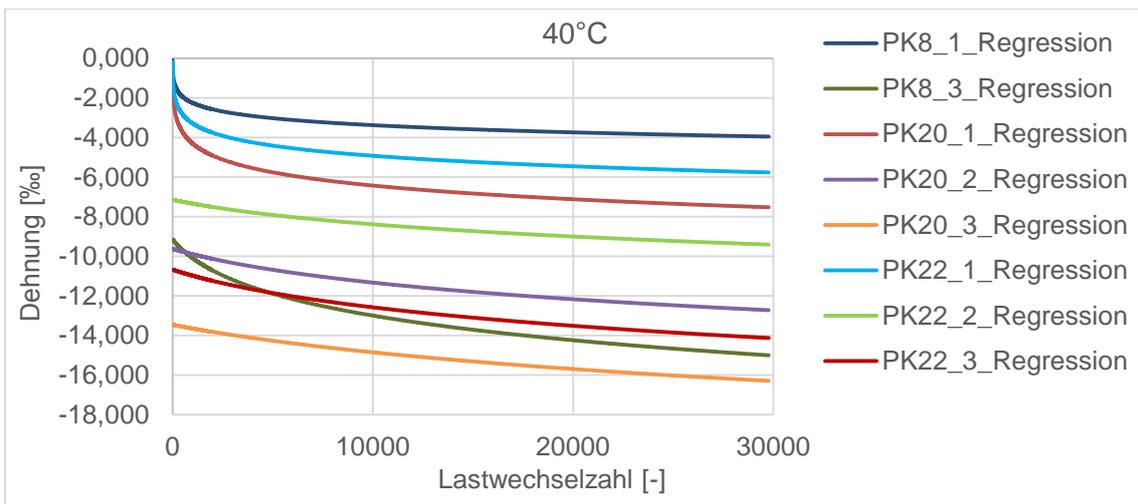
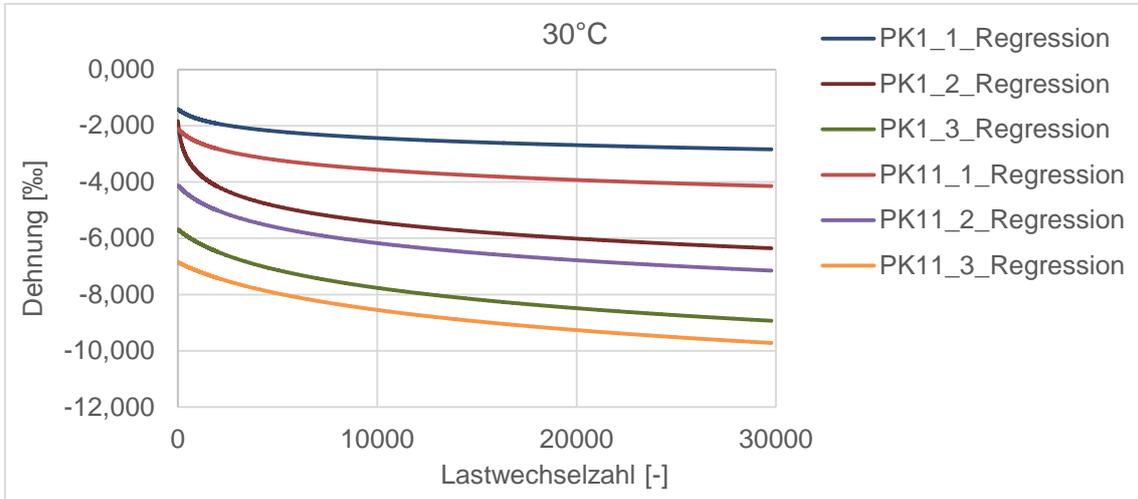
SMA 11 B S: 5,47 M-%

a1 -0,0487477 **b** 1,72258234
a2 0,60765498 **T₀** 4,98431905 **R²** 0,98757276



SMA 11 B S: 6,03 M-%

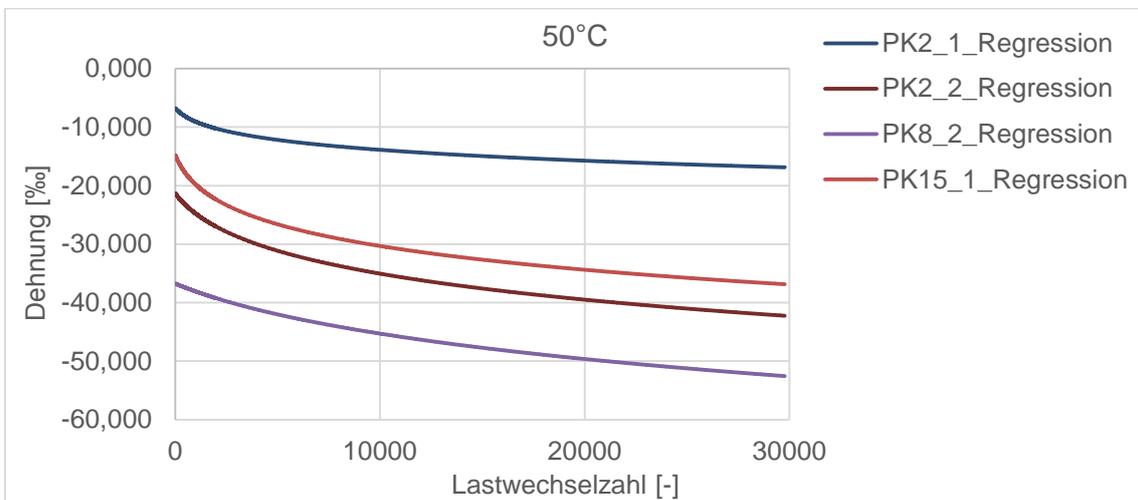
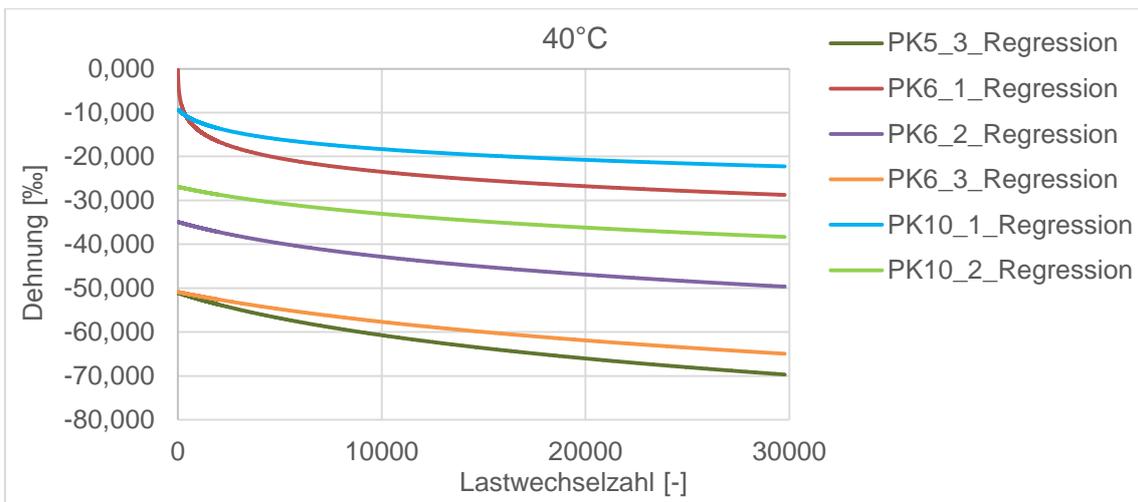
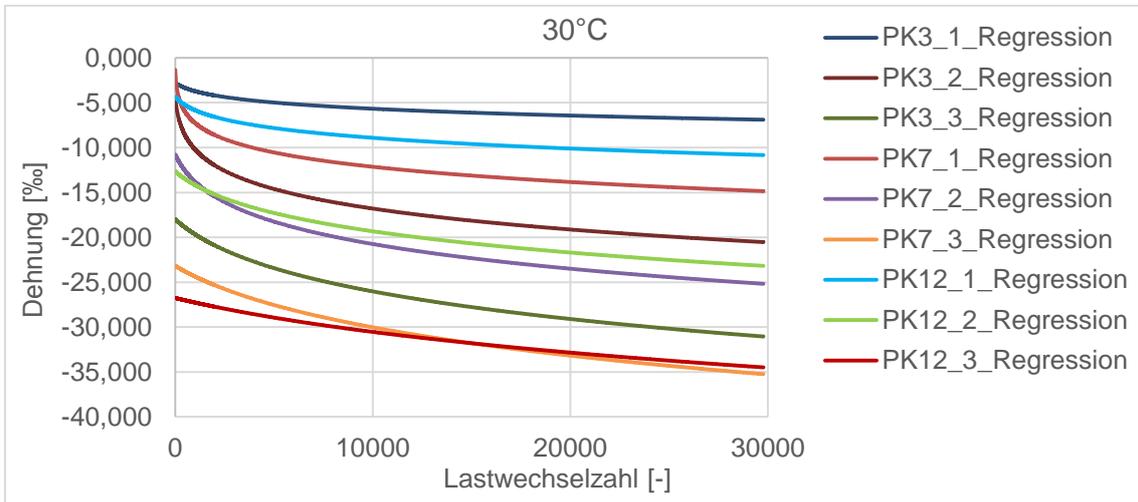
a1 -0,0339579 **b** 1,40944704
a2 0,70100884 **T₀** -91,703786 **R²** 0,98508133



Druck-Schwellversuche am gedrunenen Probekörper

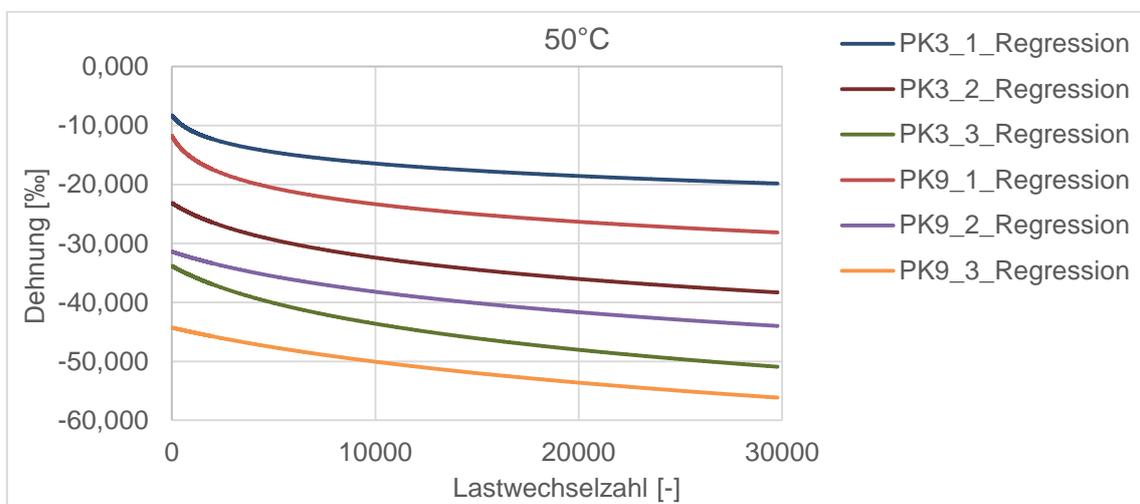
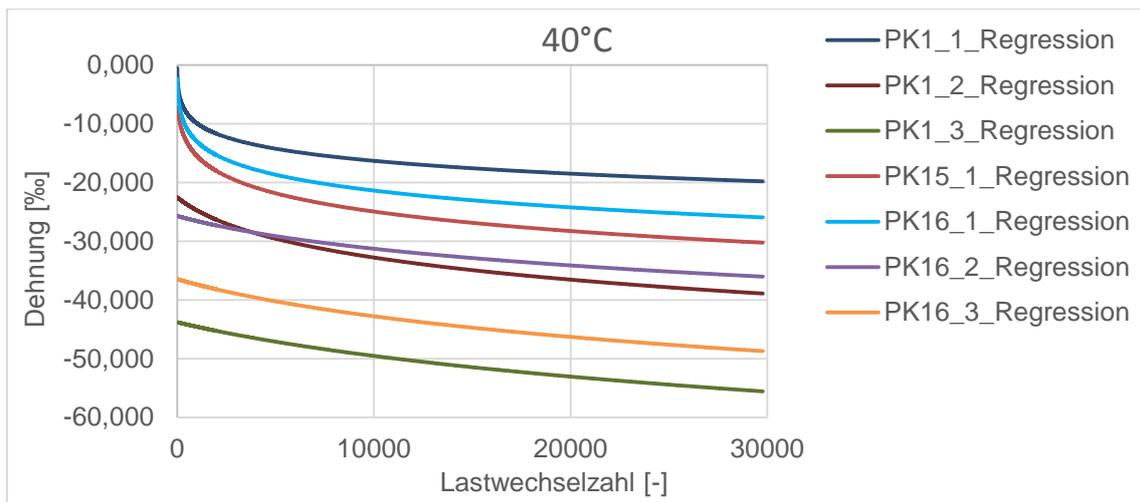
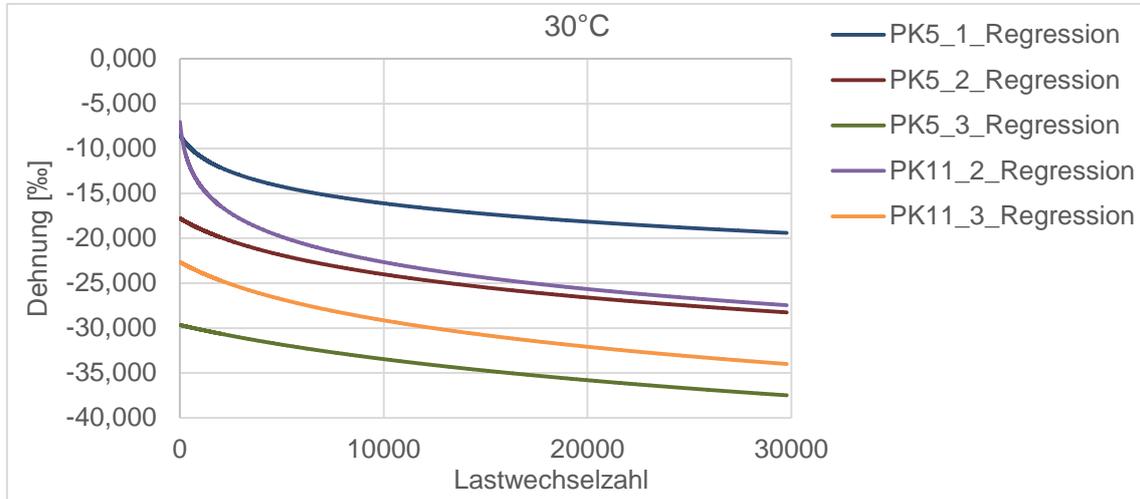
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,03 M-%

a1 -0,1525935 **b** 1,8030236
a2 0,80577651 **T₀** -31,23339 **R²** 0,98835846



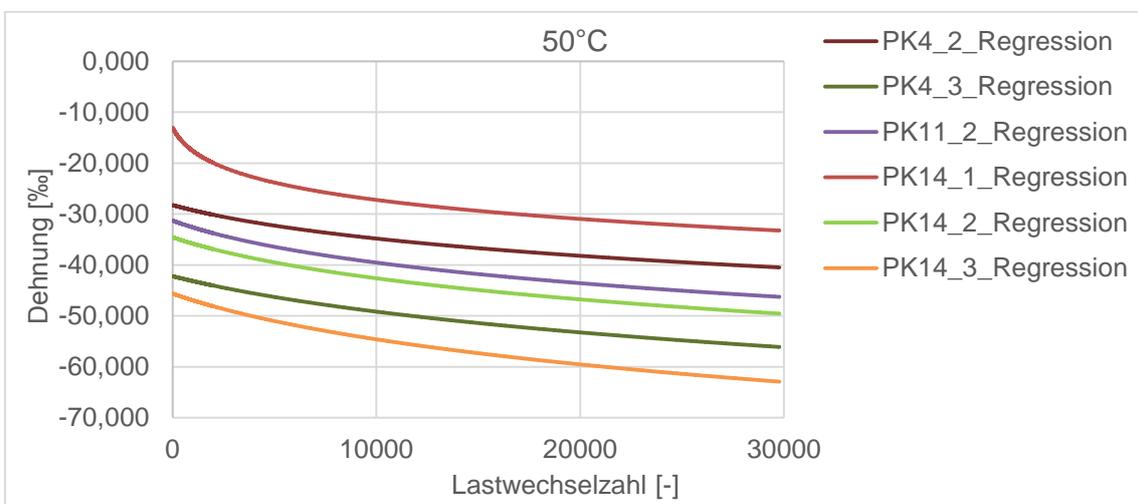
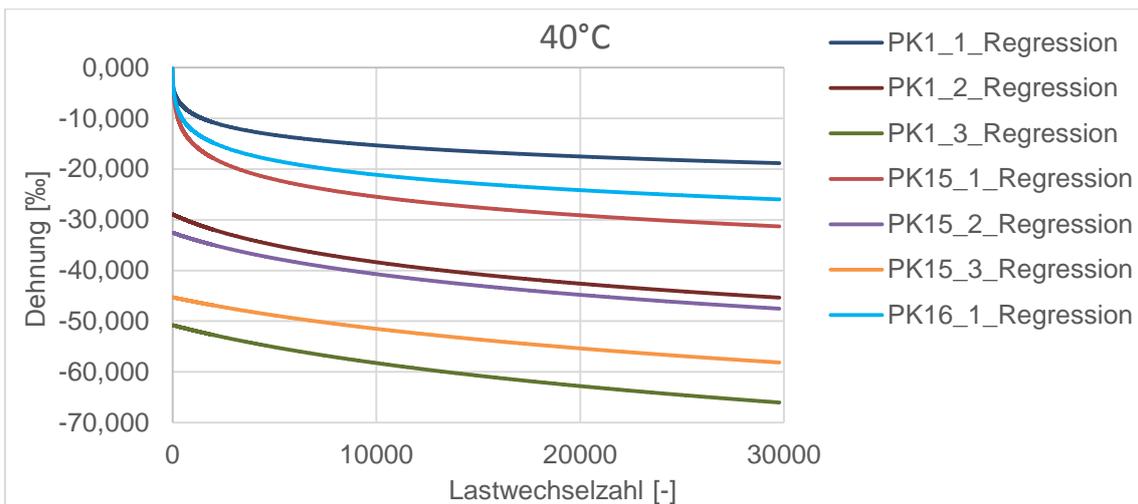
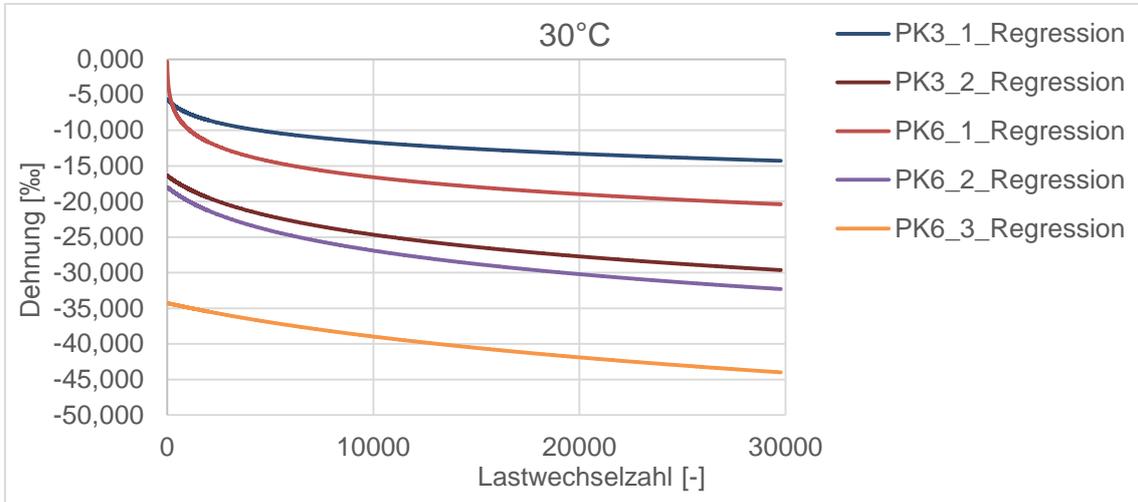
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,50 M-%

a1 -0,0735411 **b** 1,72818017
a2 0,54858047 **T₀** -56,670912 **R²** 0,97785784



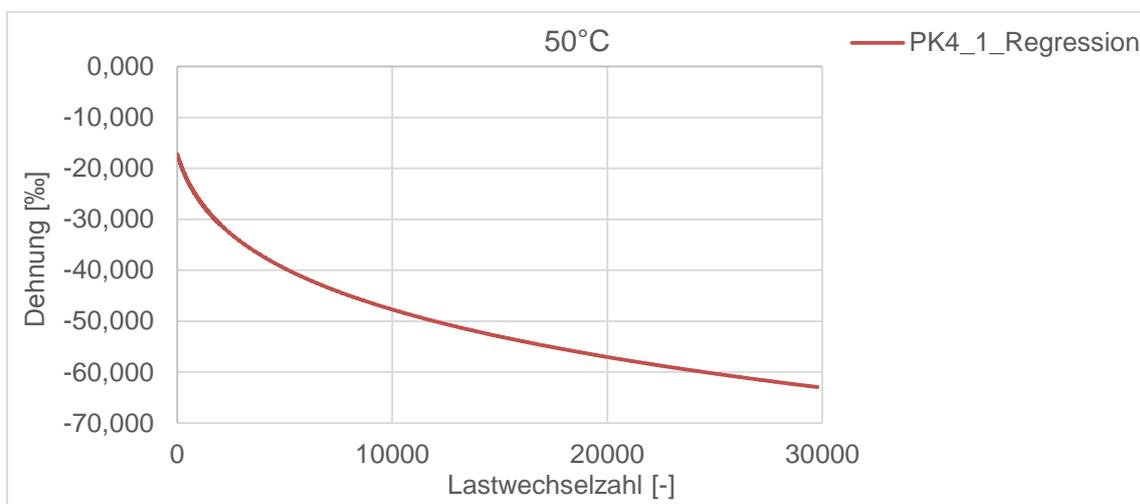
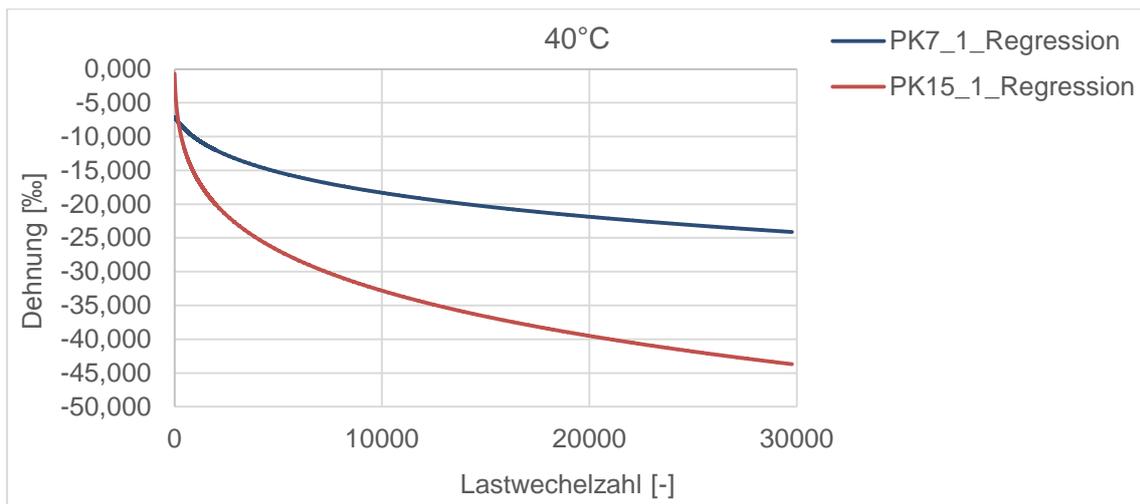
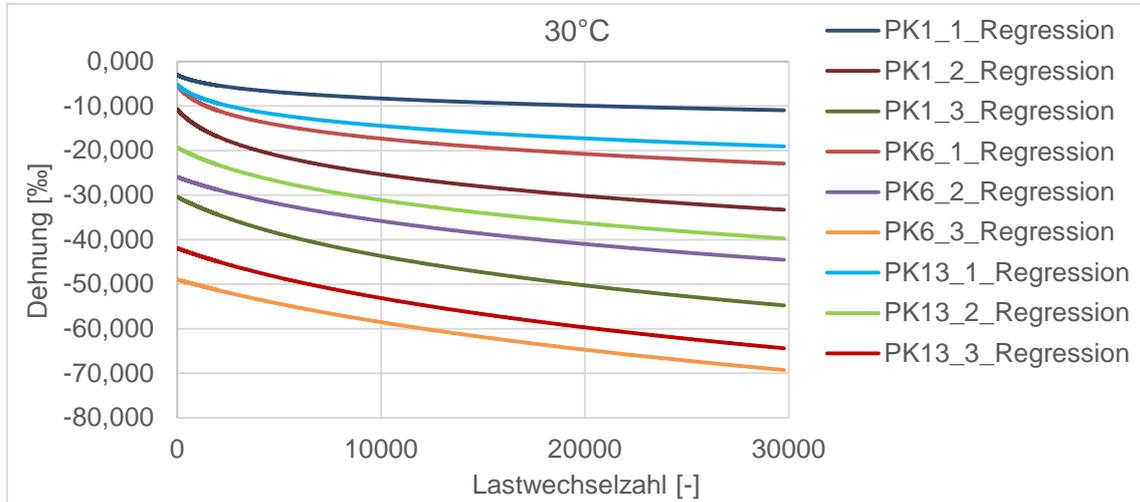
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 6,79 M-%

a1 -0,0226120 **b** 1,84322587
a2 0,63388463 **T₀** -273 **R²** 0,98364194



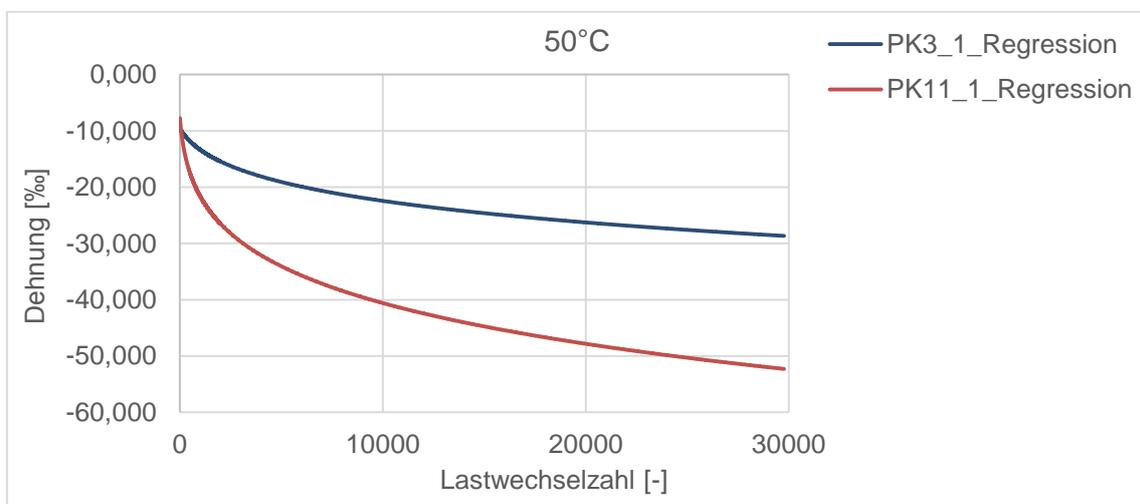
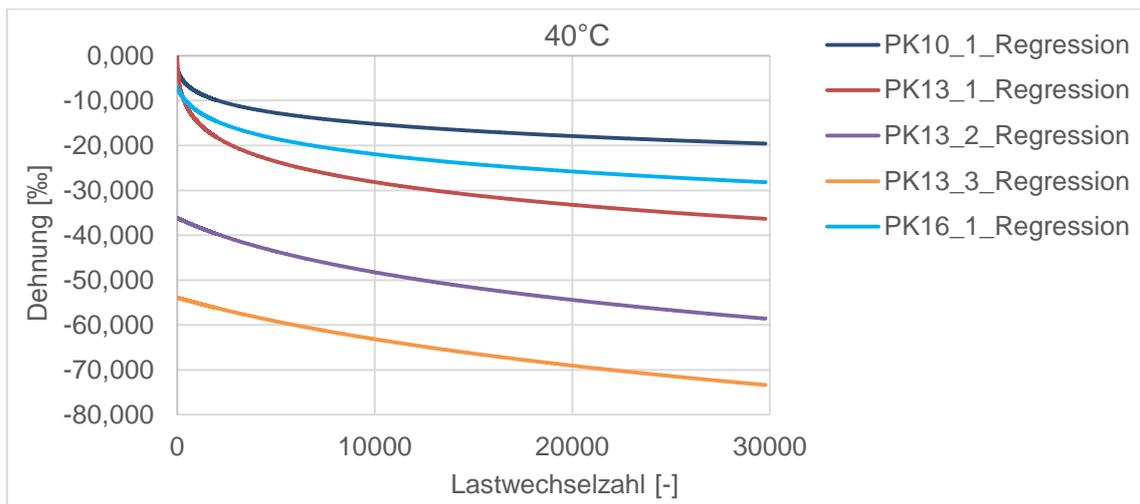
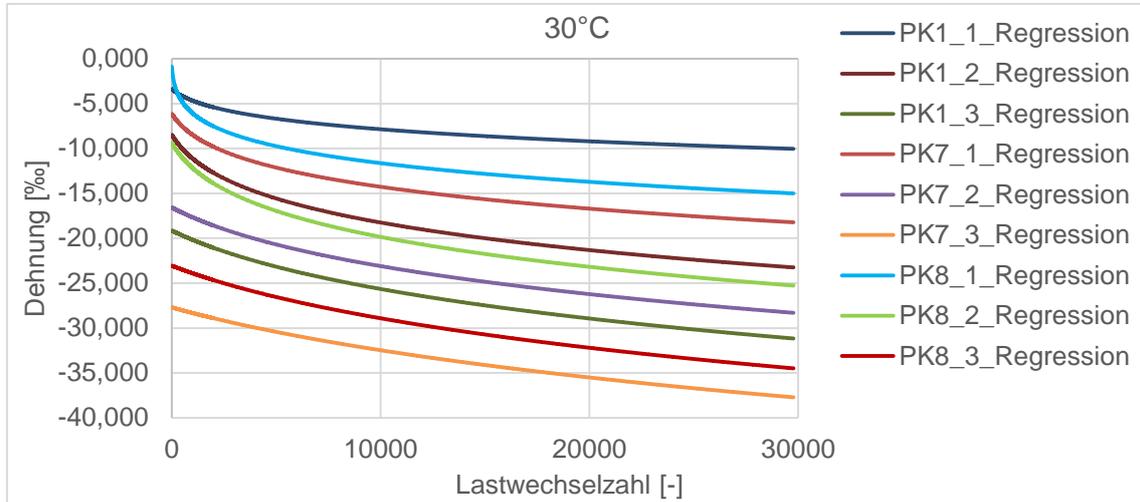
SMA 11 S: feine Korngrößenverteilung; 7,52 M-%

a1 -0,3395501 **b** 2,55908213
a2 0,97625689 **T₀** 13,3470927 **R²** 0,98981606



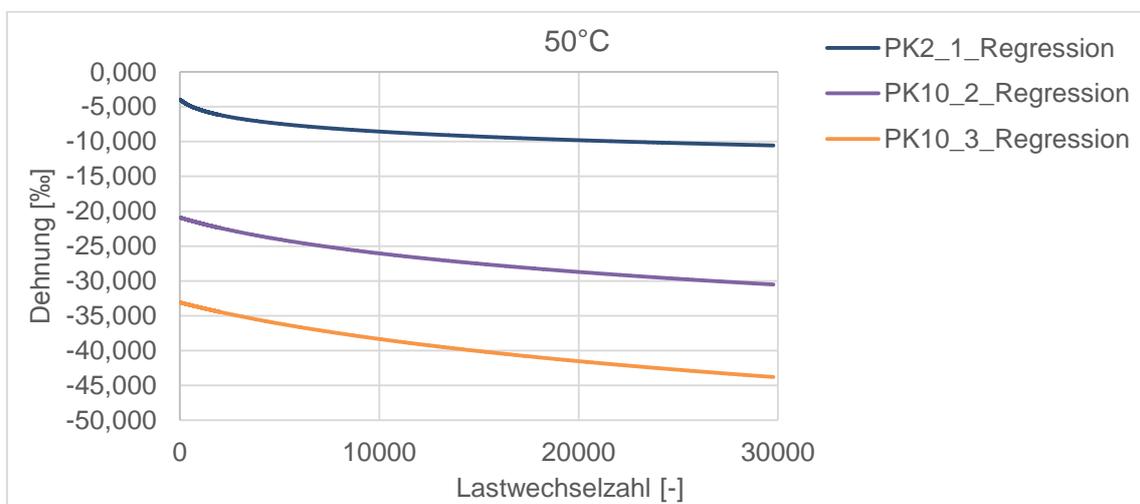
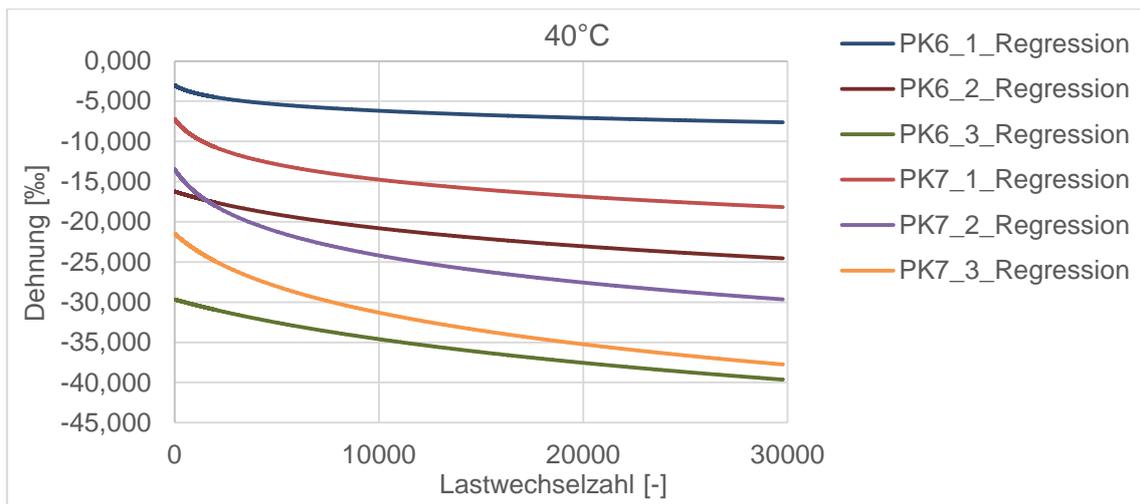
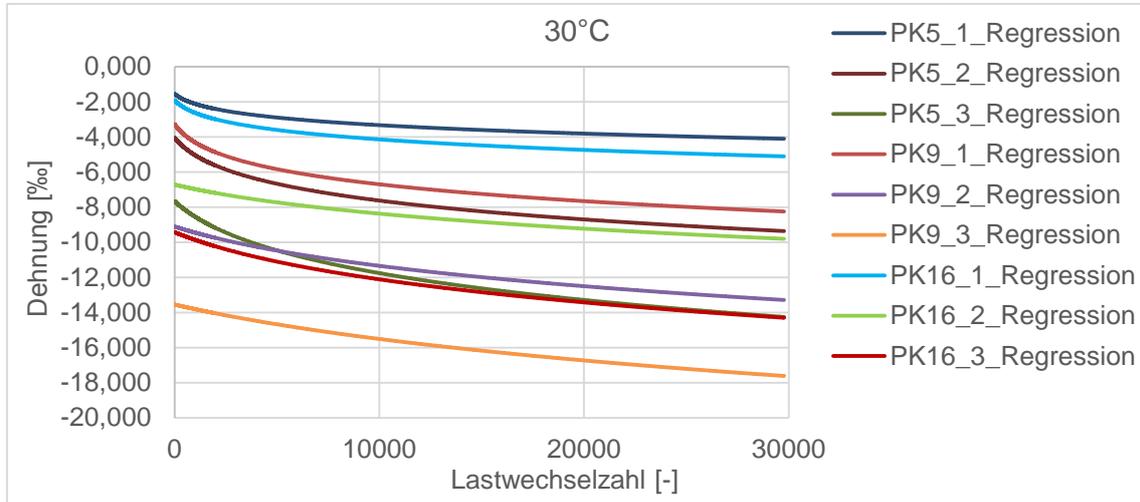
SMA 11 S: alternatives Bindemittel 10/40-65A; 7,52 M-%

a1 -0,162816 **b** 2,27499065
a2 0,6729553 **T₀** 6,57873527 **R²** 0,97985873



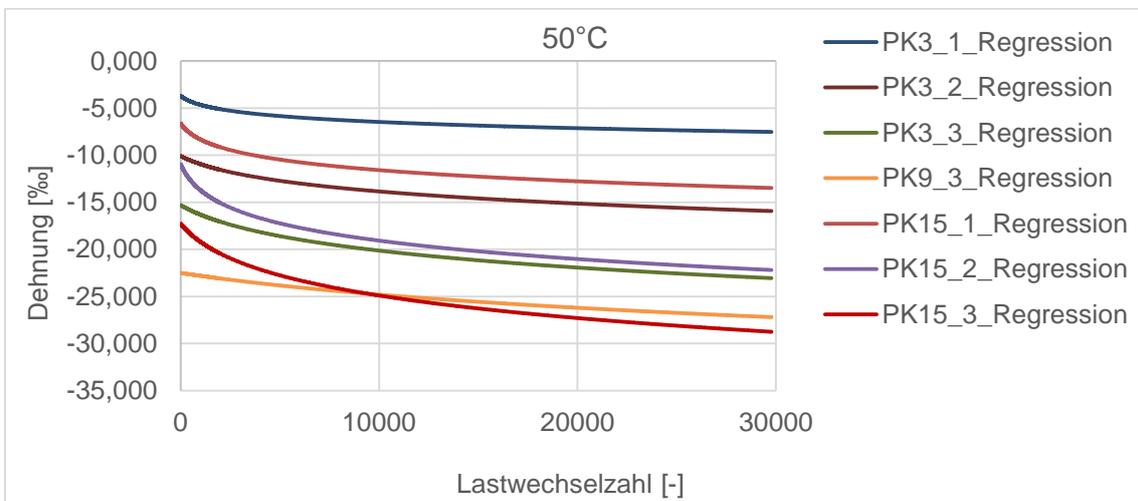
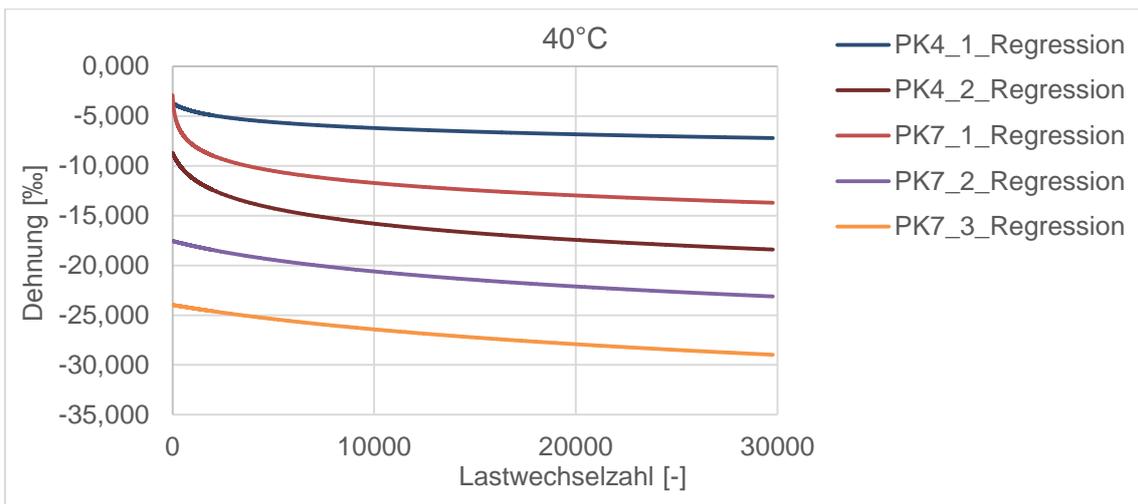
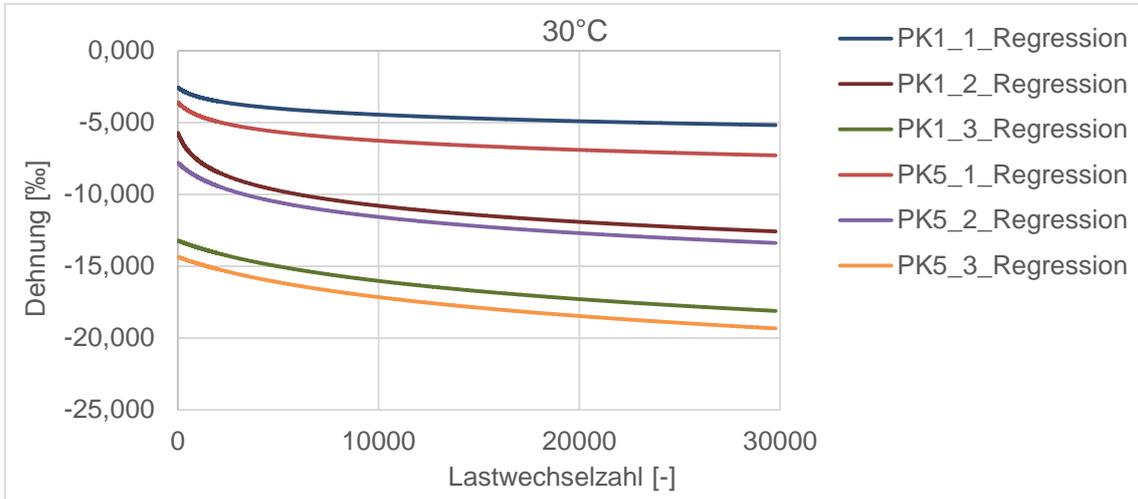
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 5,61 M-%

a1 -0,1023494 **b** 1,93511468
a2 0,74771948 **T₀** 7,76013799 **R²** 0,96210314



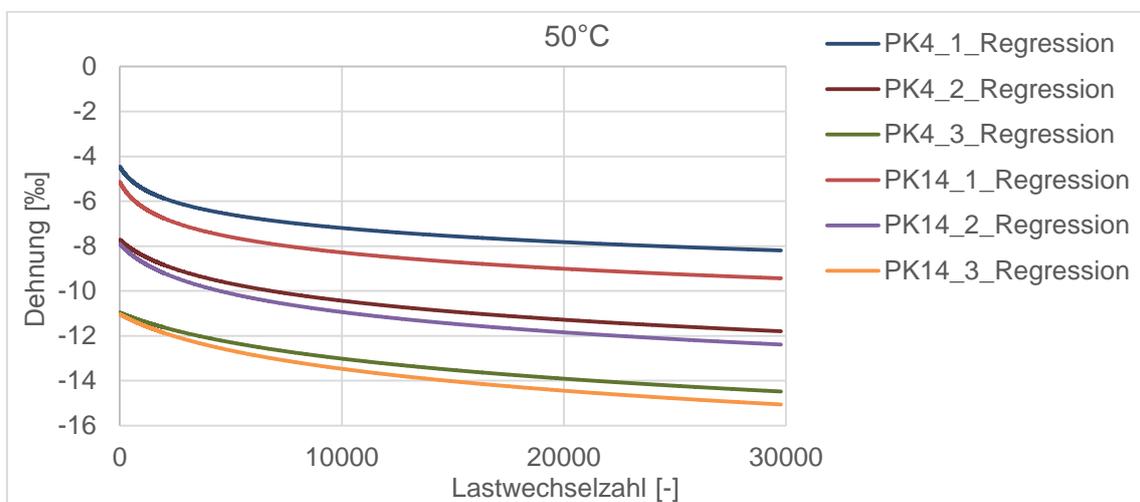
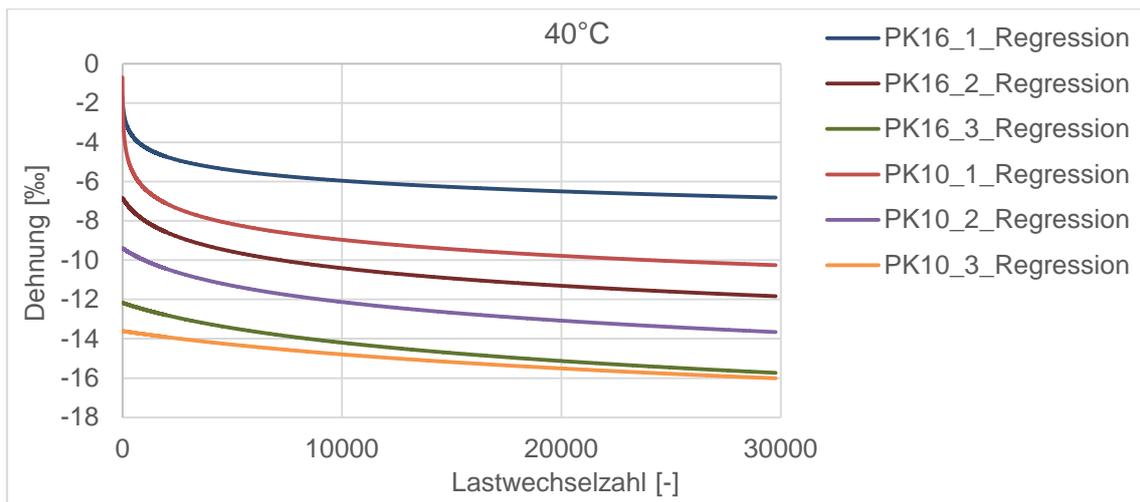
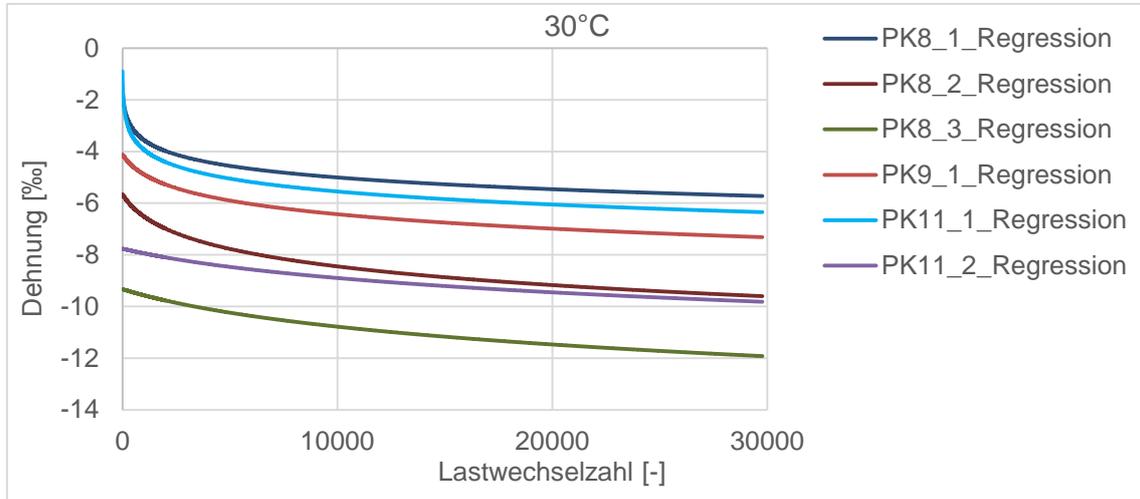
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,42 M-%

a1 -0,0209819 **b** 1,39880143
a2 0,70402184 **T₀** -273 **R²** 0,96142695



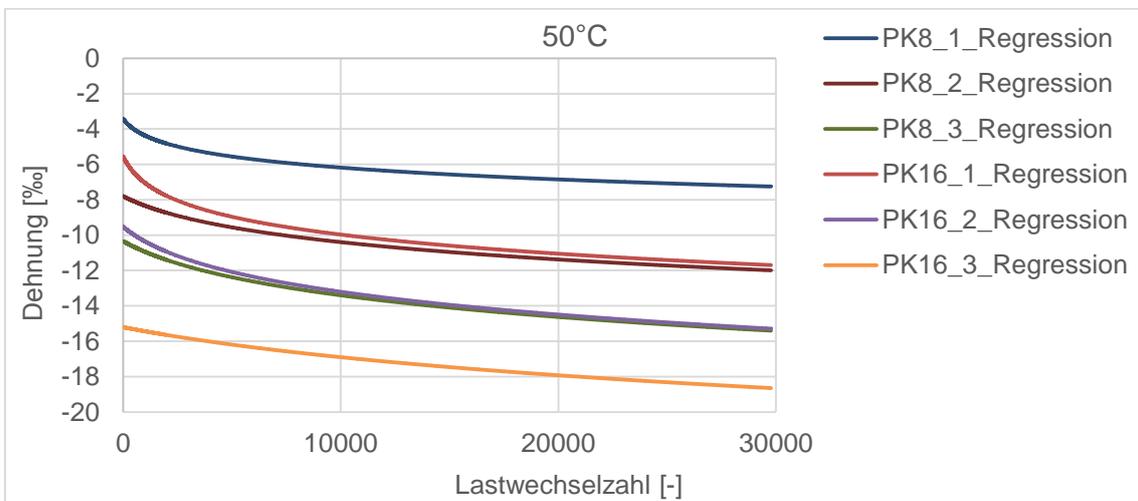
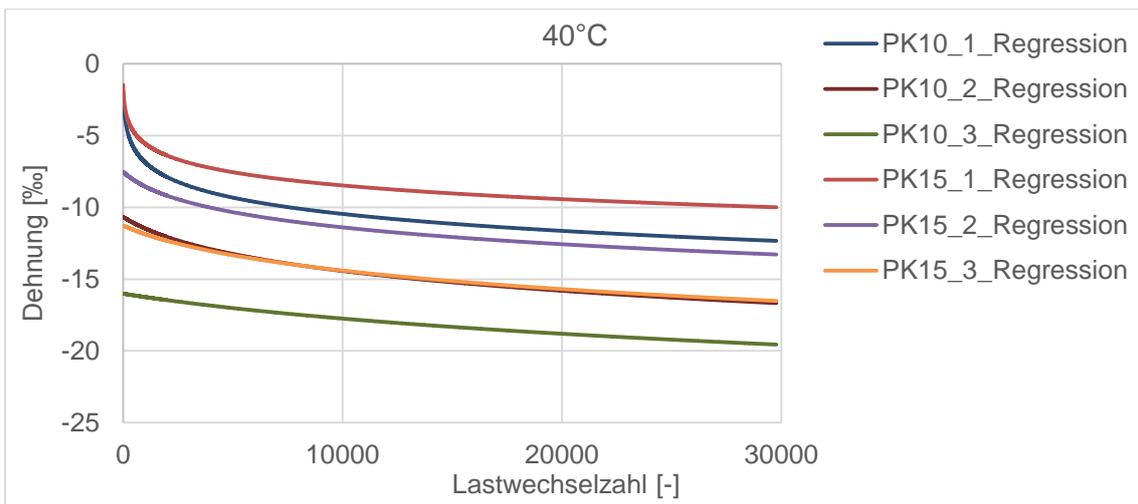
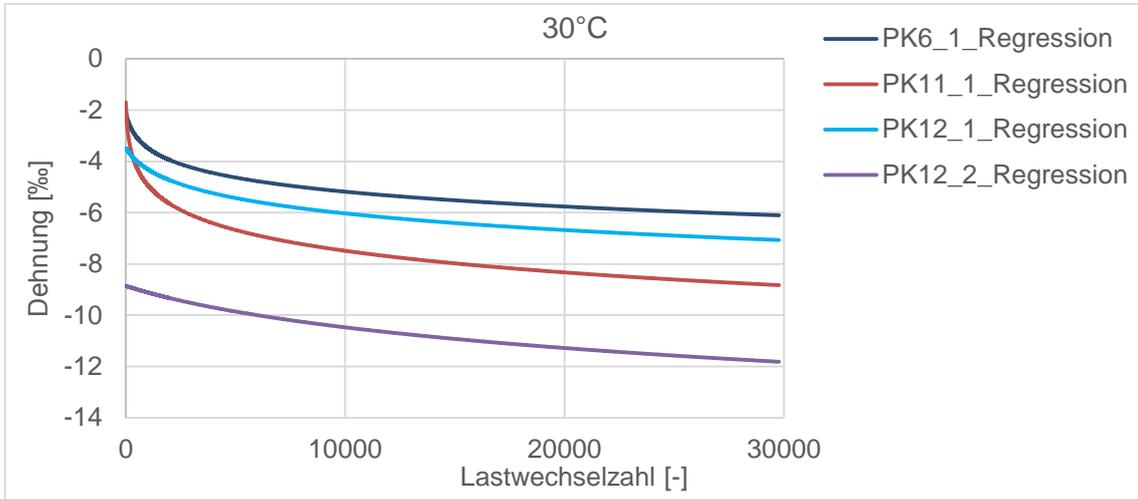
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 6,71 M-%

a1 -0,0122220 **b** 1,20220615
a2 0,45341591 **T₀** -273 **R²** 0,92347937



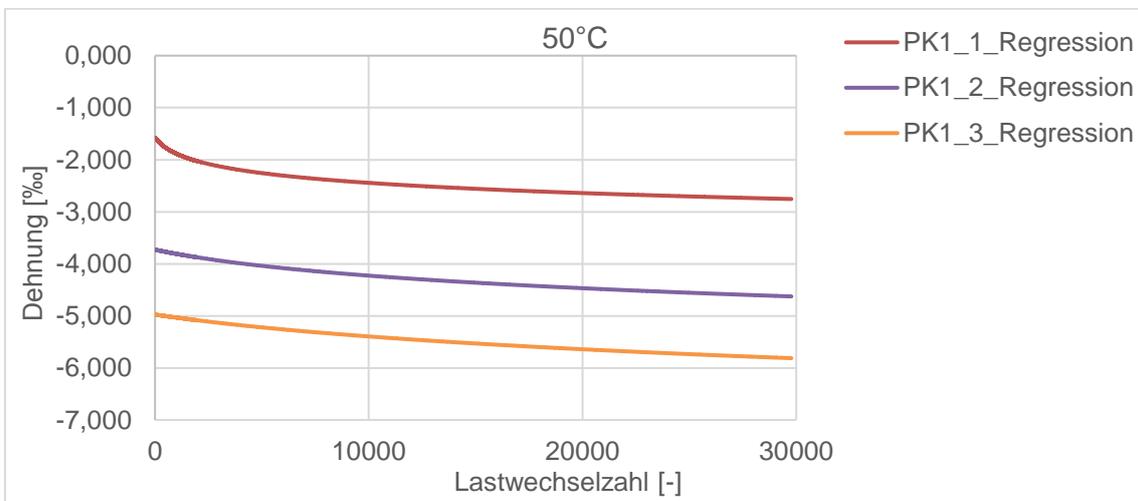
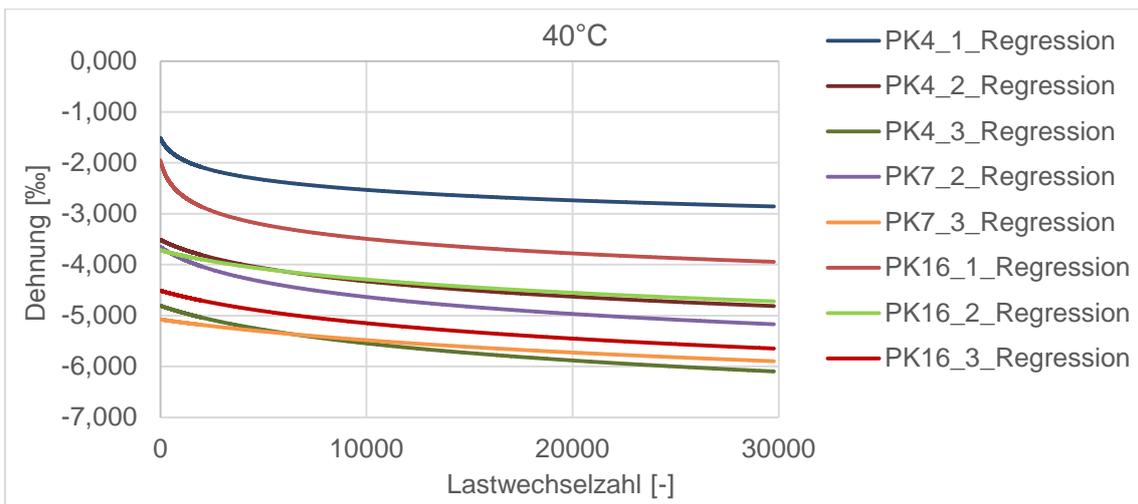
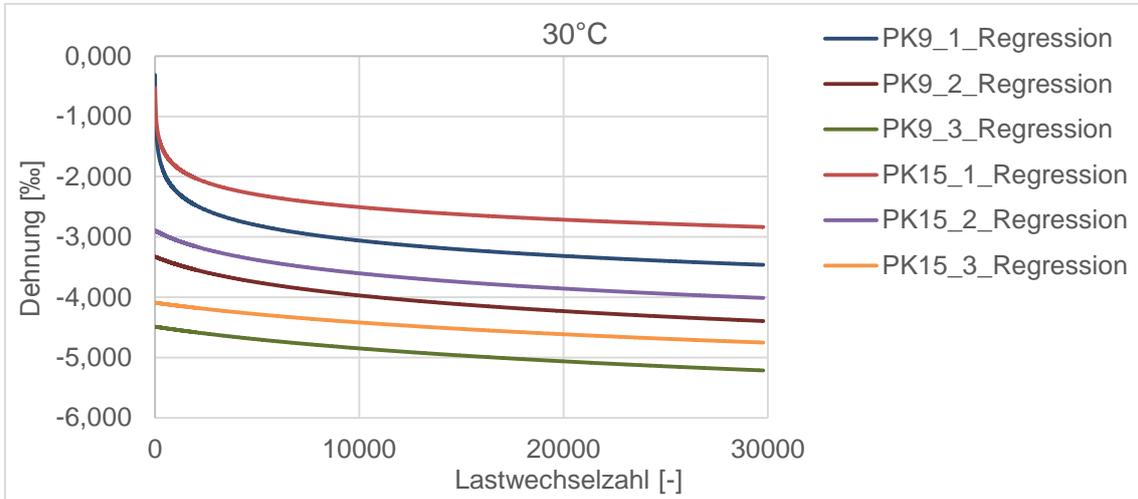
SMA 11 S: grobe Korngrößenverteilung; 7,76 M-%

a1 -0,0091485 **b** 1,47419462
a2 0,45260878 **T₀** -273 **R²** 0,91506112



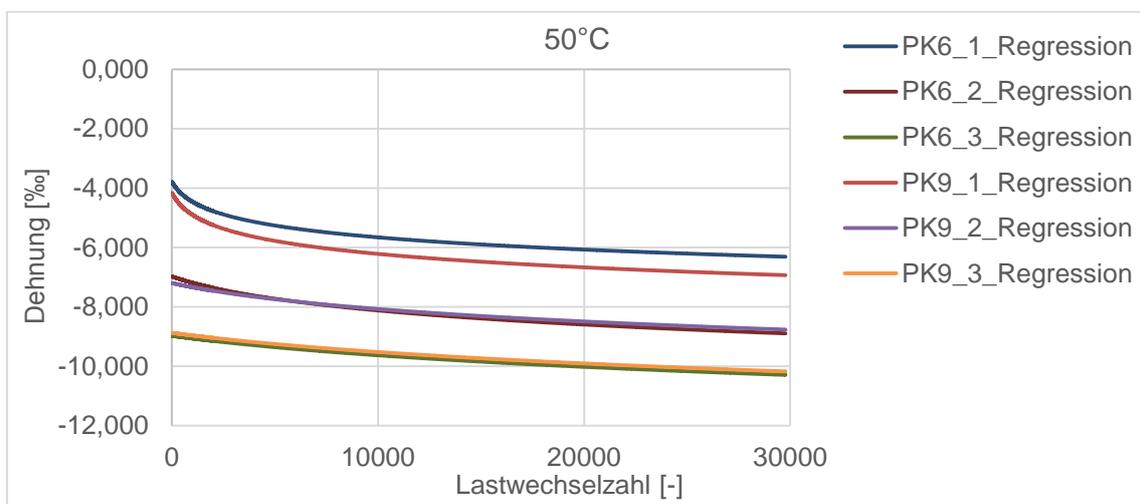
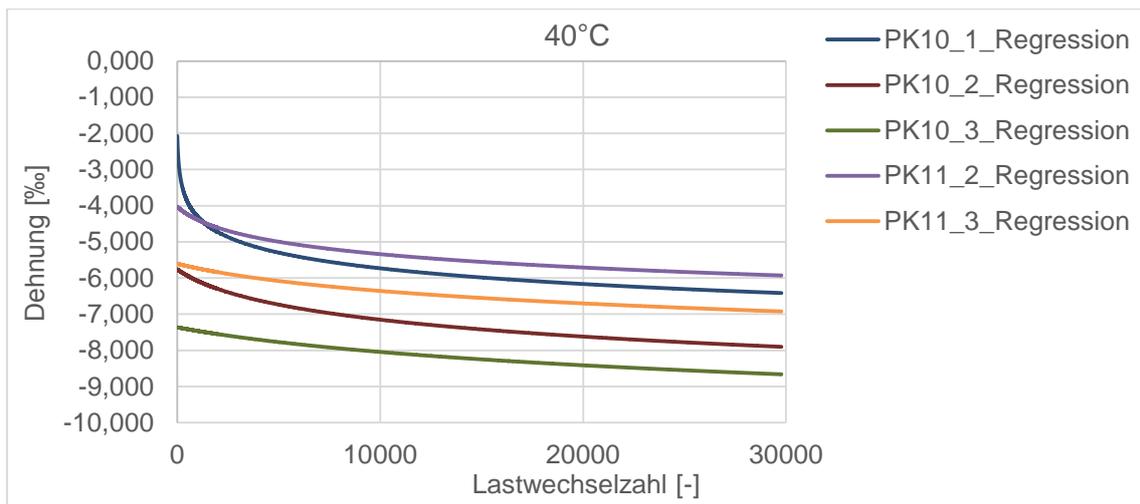
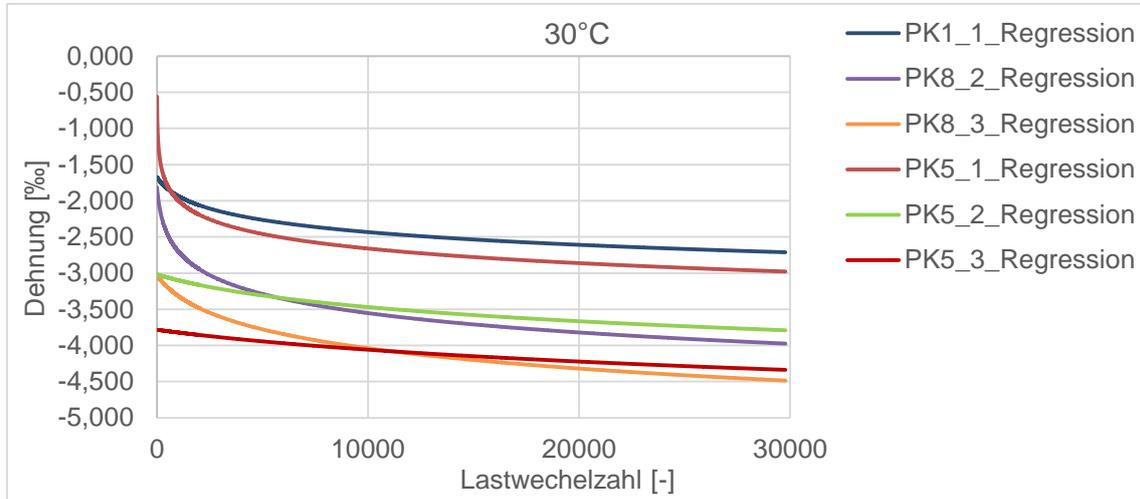
AC 16 B S SG: 4,75 M-%

a1 -0,0273930 **b** 1,10447642
a2 0,46510745 **T₀** -53,669046 **R²** 0,97318382



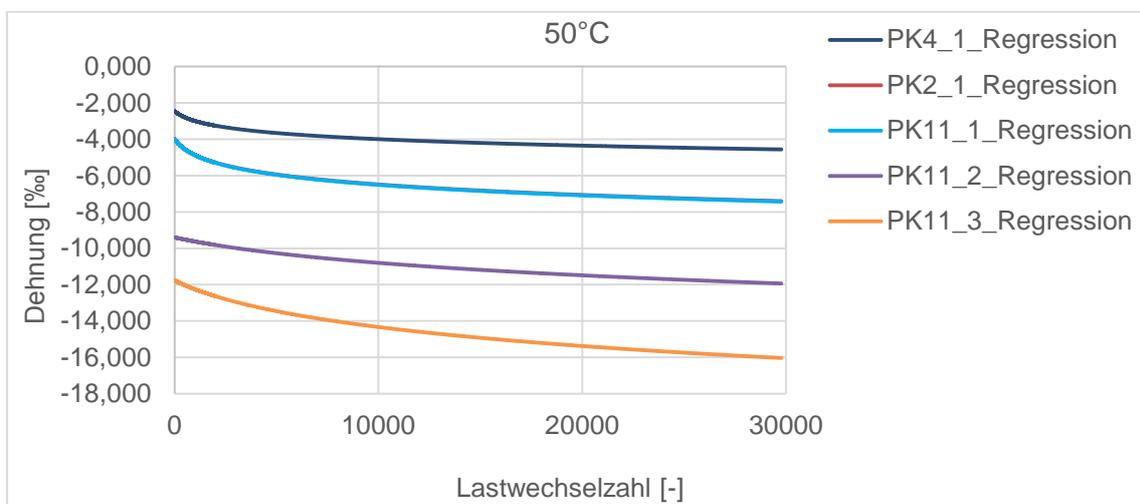
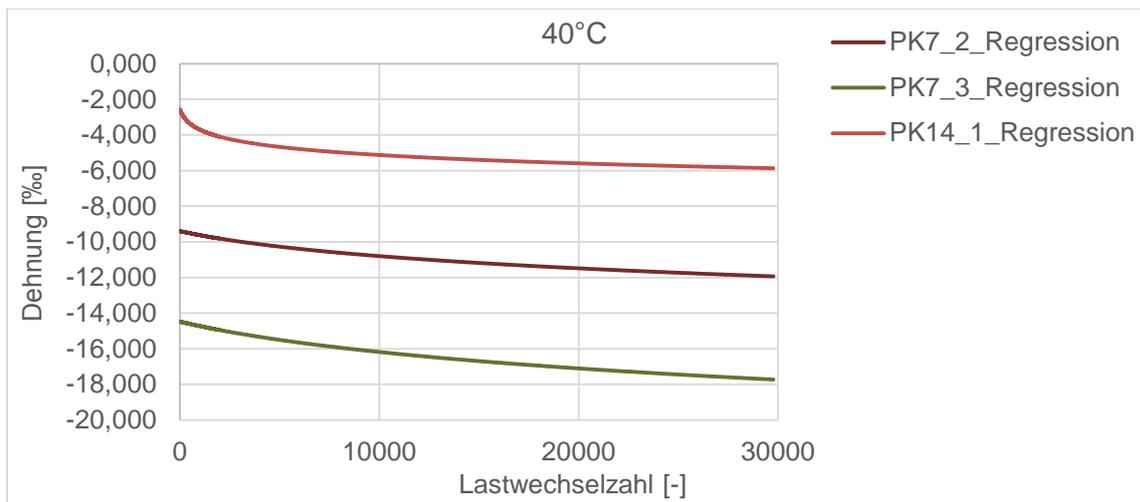
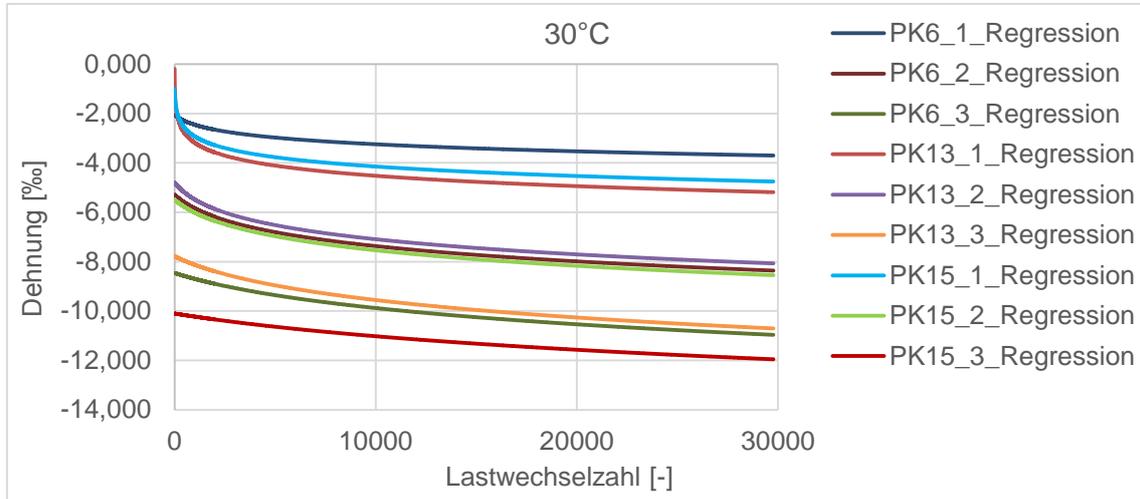
AC 16 B S SG: 5,00 M-%

a1 -0,1180836 **b** 1,00791643
a2 0,37753038 **T₀** 13,2459809 **R²** 0,97745857



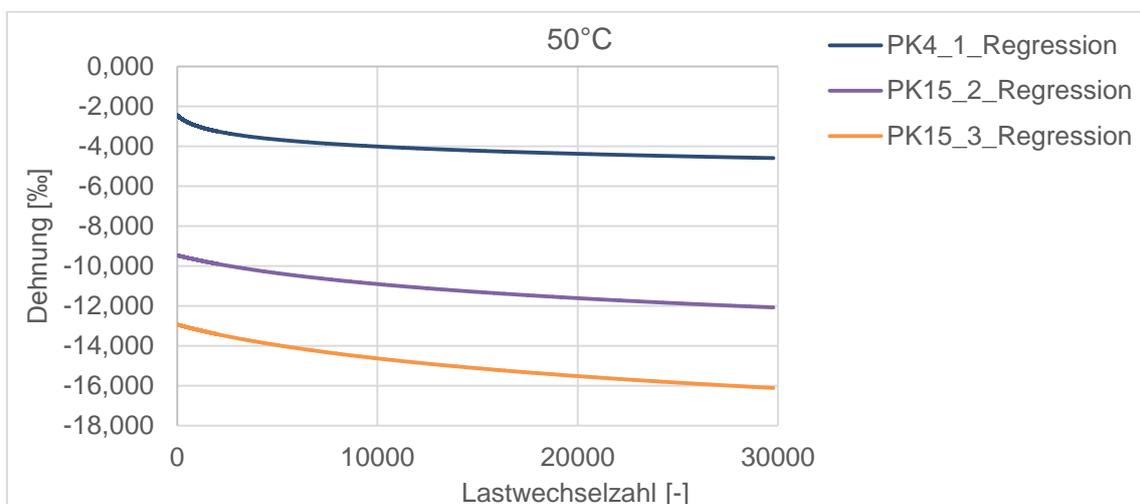
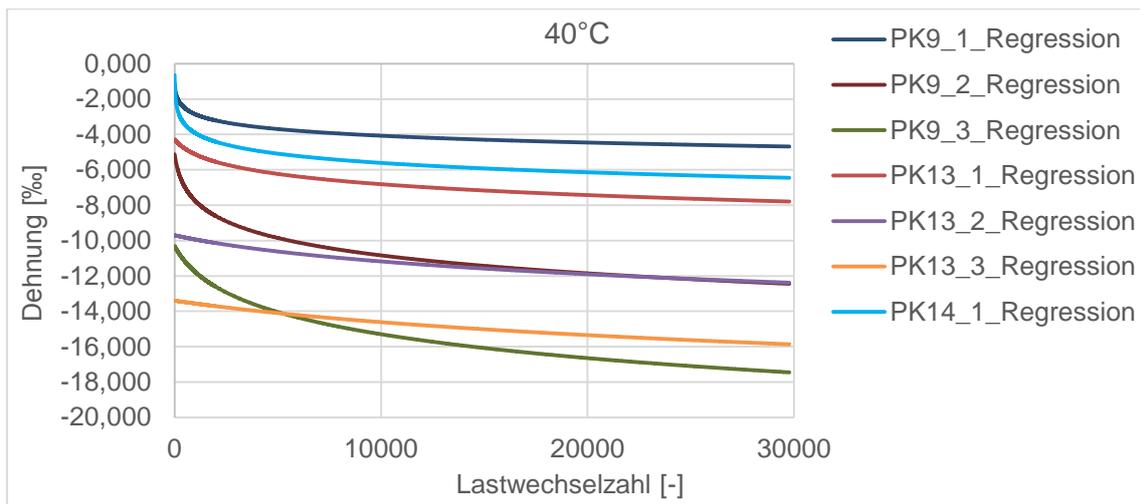
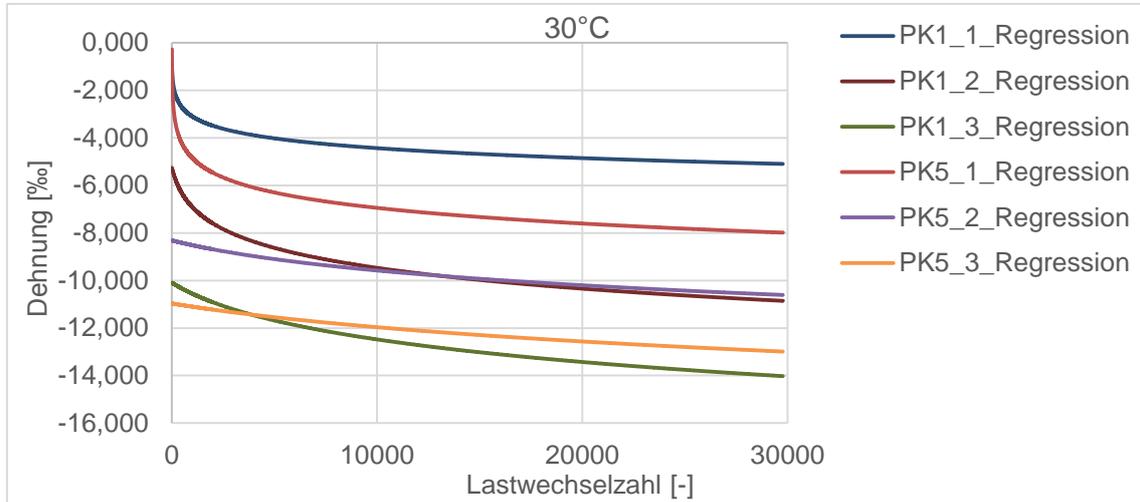
AC 16 B S SG: 5,68 M-%

a1 -0,0309027 **b** 1,22260743
a2 0,74516355 **T₀** -193,70098 **R²** 0,98085436



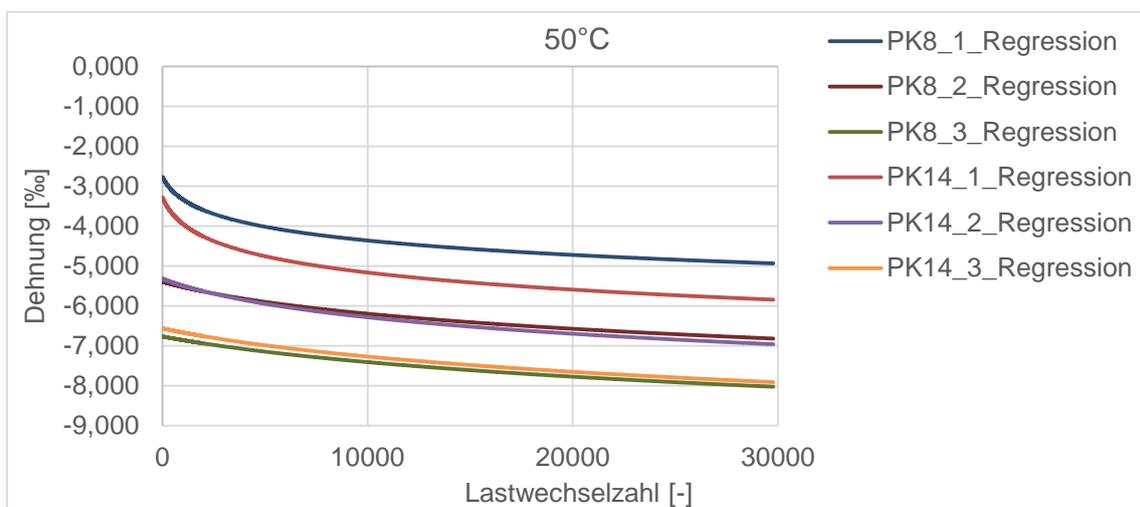
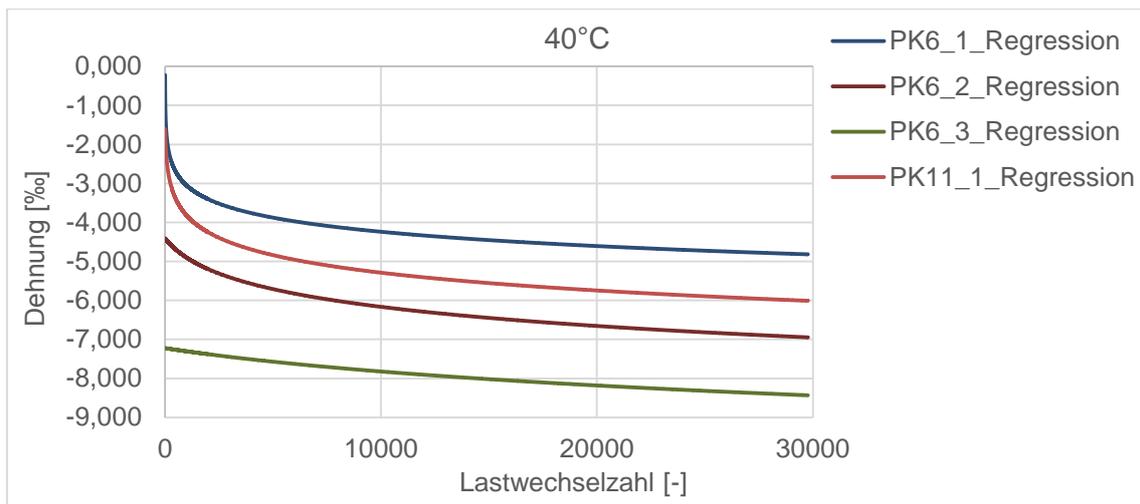
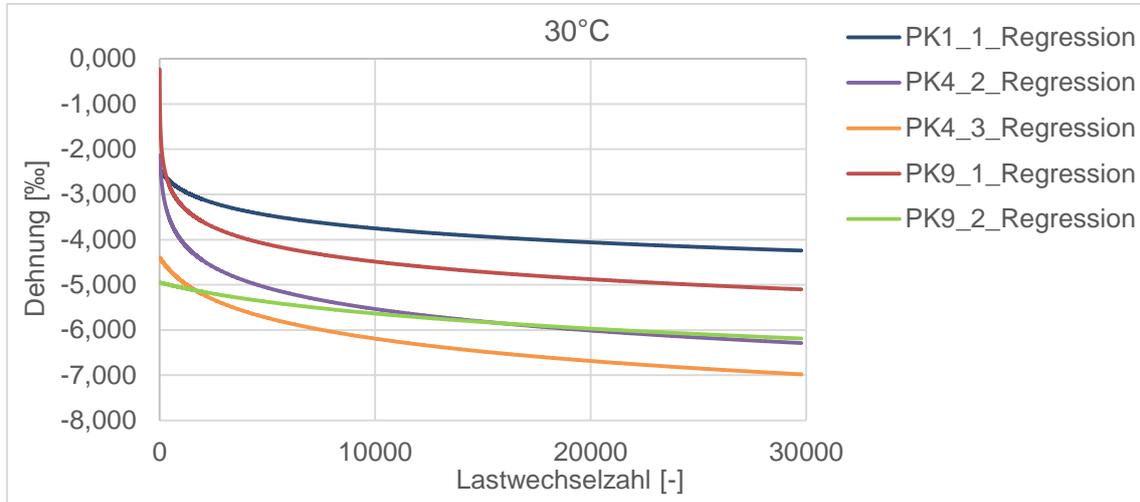
AC 16 B S SG: 5,98 M-%

a1 -0,0366369 **b** 1,24772255
a2 0,77310067 **T₀** -163,25739 **R²** 0,96066003



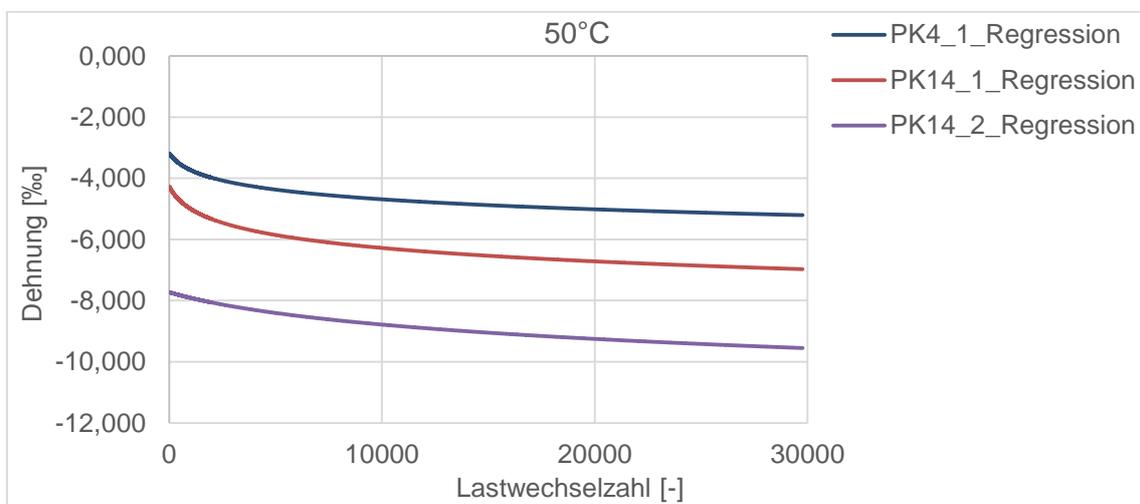
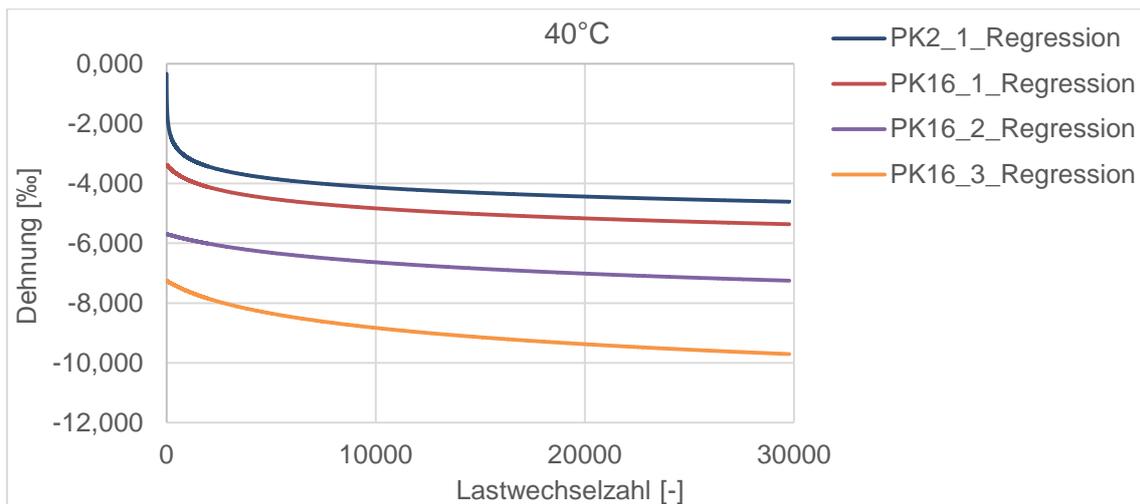
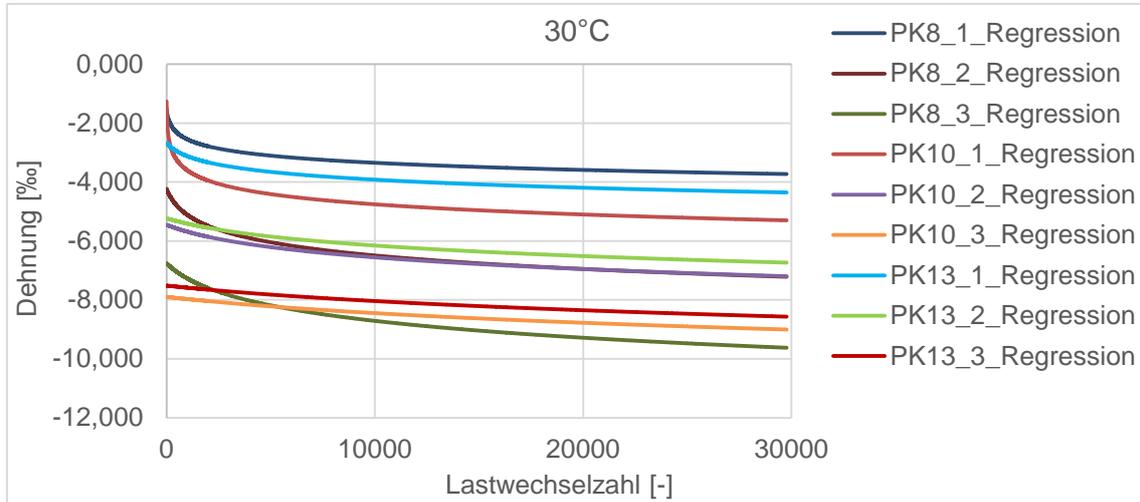
AC 16 B S SG: 6,55 M-%

a1 -0,0092117 **b** 1,14192749
a2 0,32607906 **T₀** -206,06193 **R²** 0,84848222



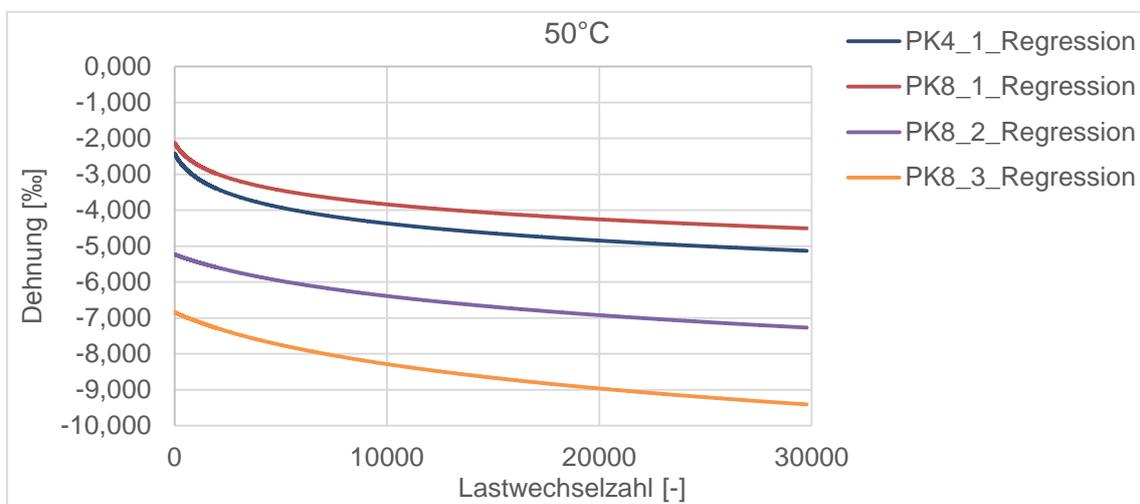
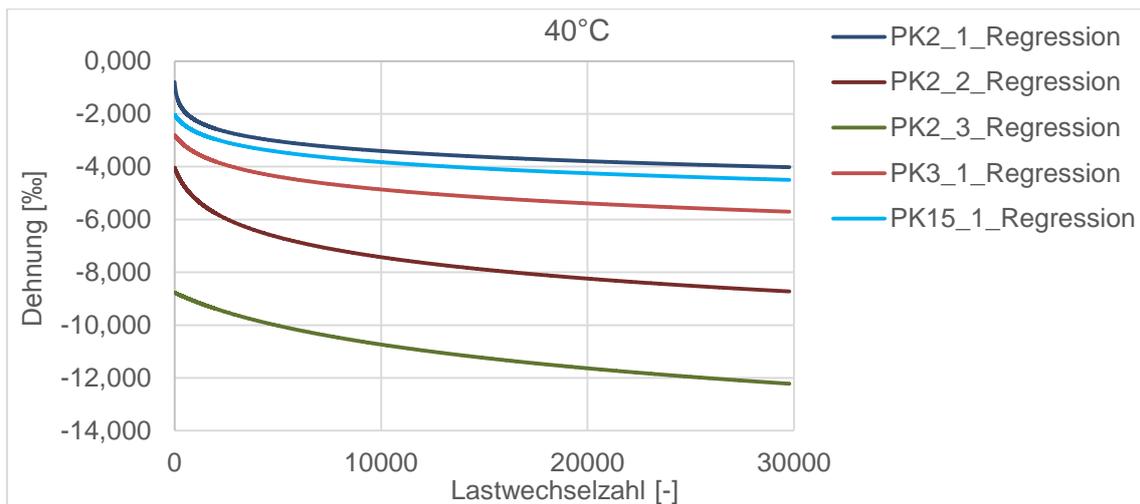
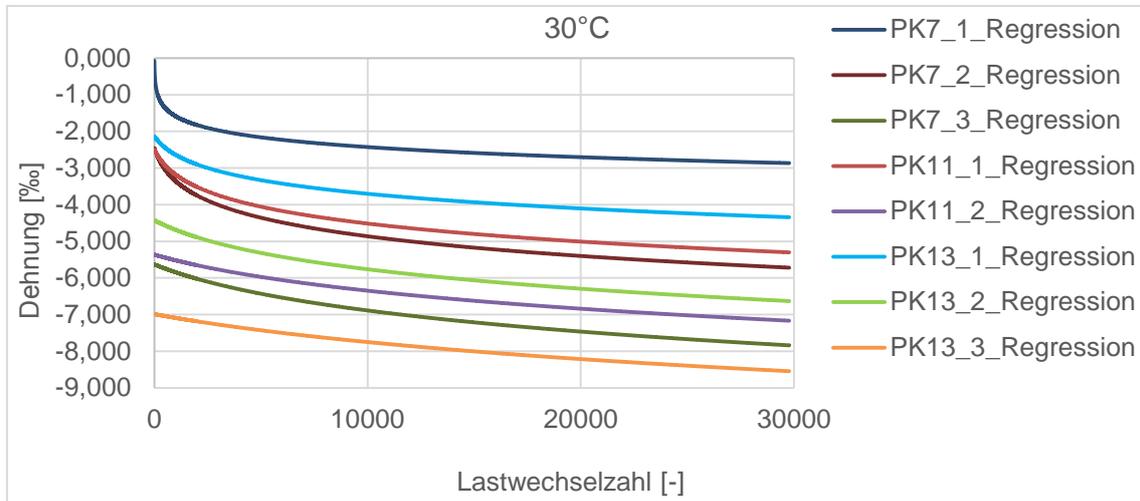
AC 16 B S SG: alternatives Bindemittel 25/55-55A; 5,28 M-%

a1 -0,0437746 **b** 0,96775006
a2 0,59814755 **T₀** -101,05147 **R²** 0,9756738



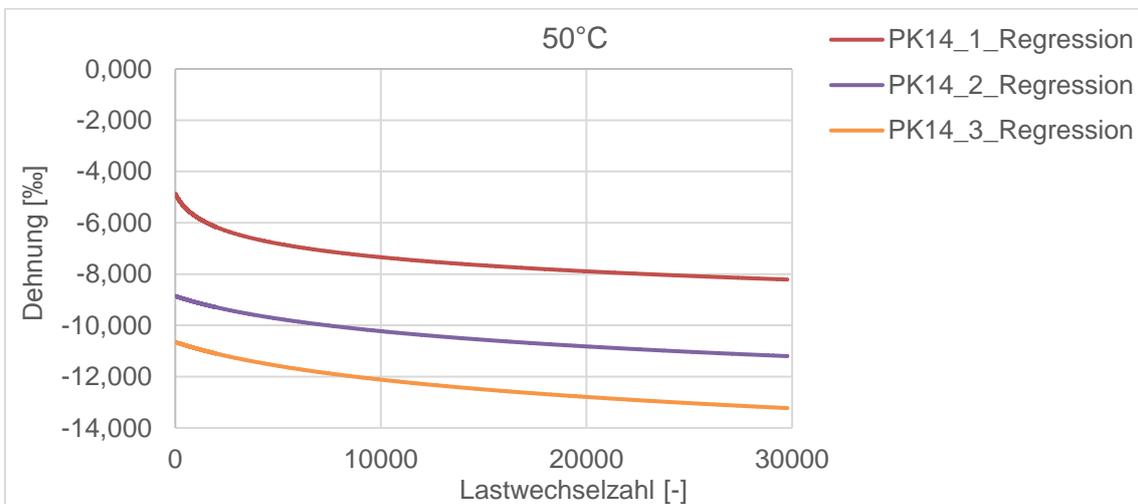
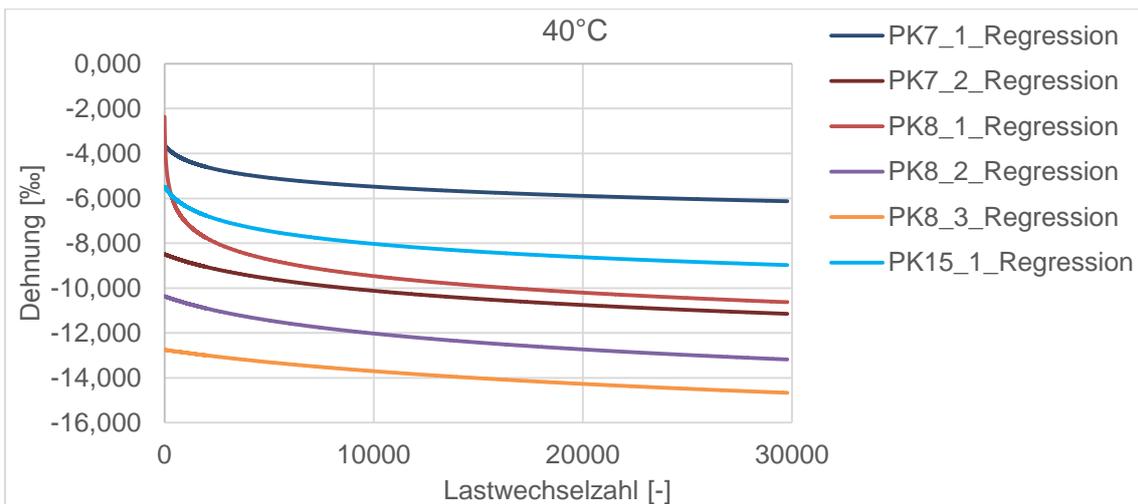
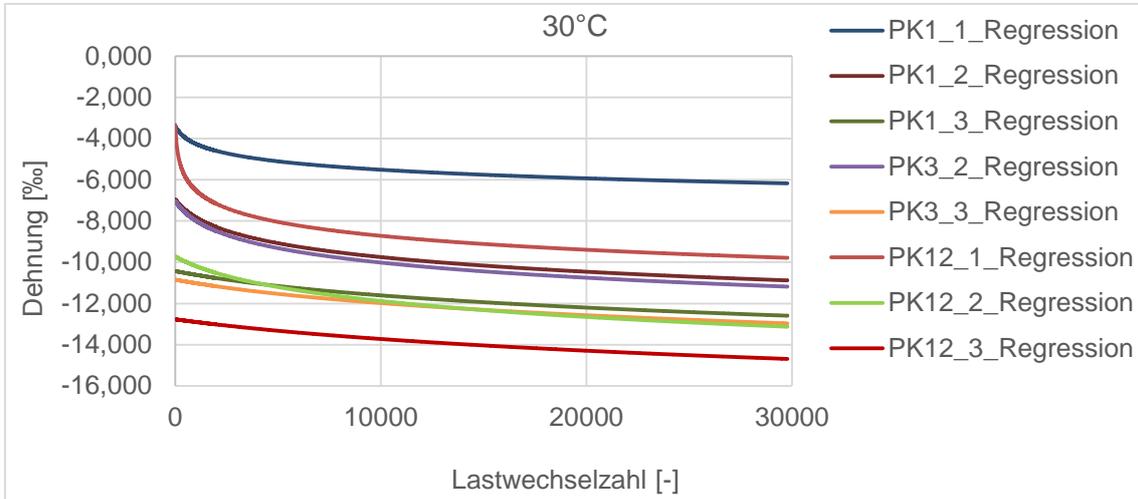
SMA 16 B S: 5,17 M-%

a1 -0,0087727 **b** 1,48351699
a2 0,62164016 **T₀** -273 **R²** 0,96486385



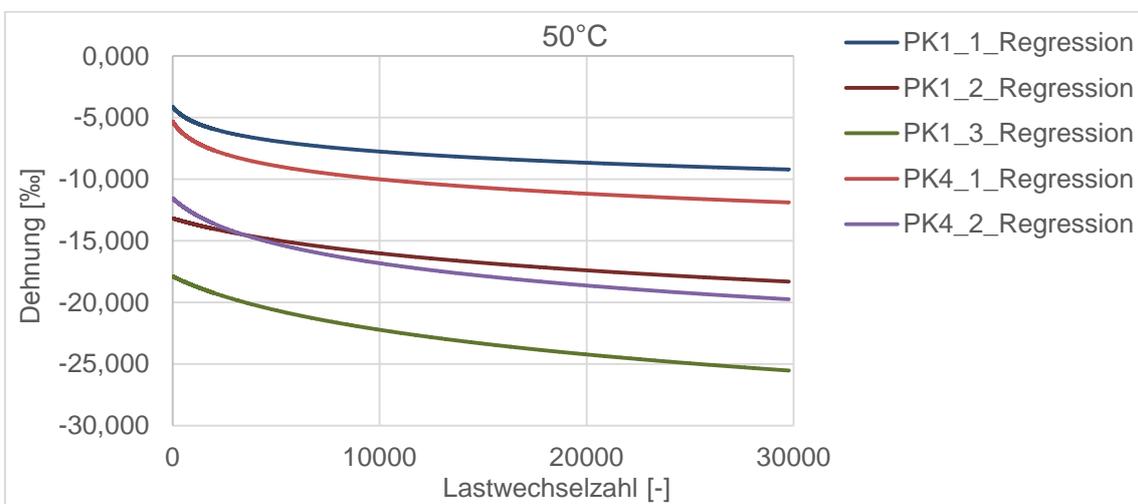
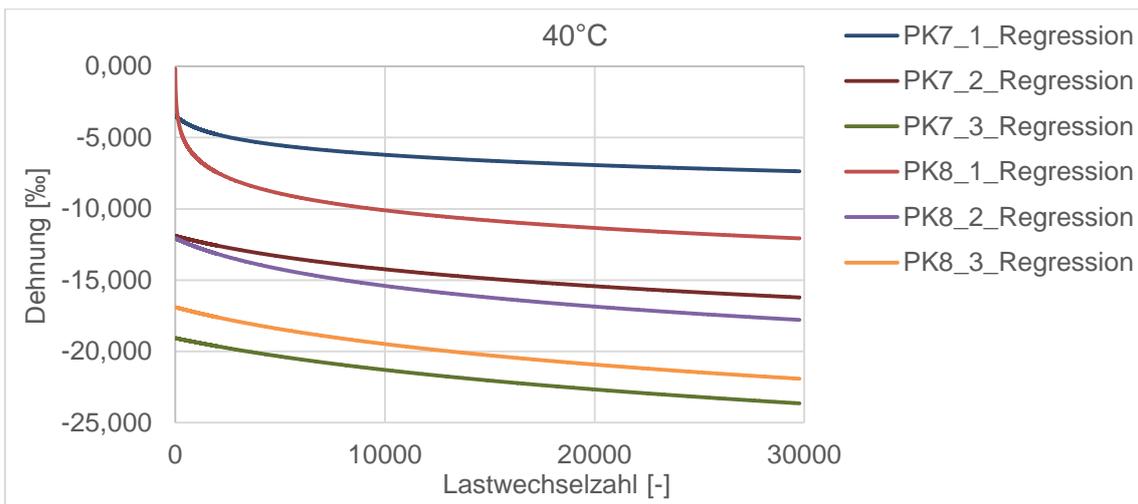
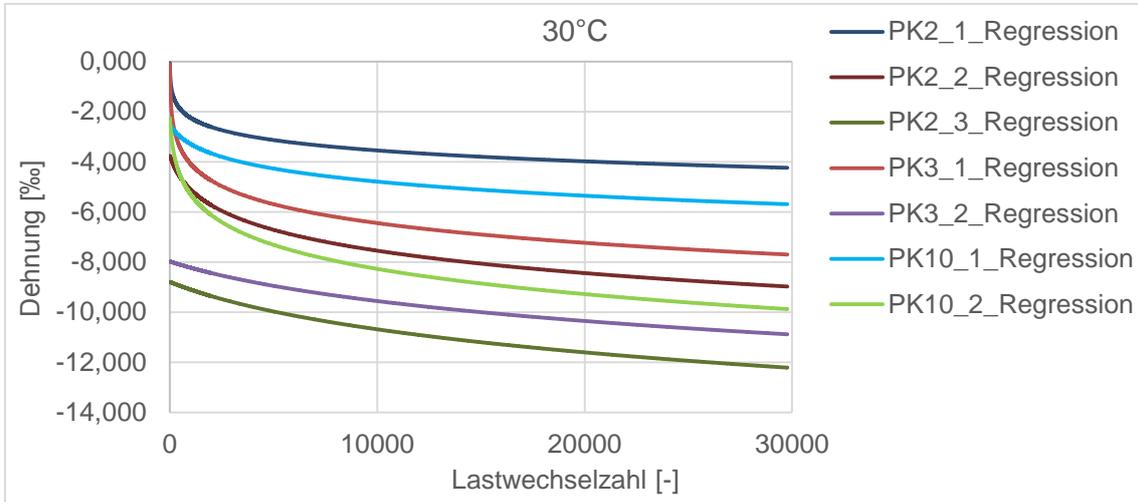
SMA 16 B S: 5,47 M-%

a1 -0,0181763 **b** 1,03333547
a2 0,44969152 **T₀** -273 **R²** 0,9556873



SMA 16 B S: 6,03 M-%

a1 -0,1352085 **b** 1,58790909
a2 0,62912058 **T₀** 5,39112023 **R²** 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