

Einfluss des Asphalt- granulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 86

bast

Einfluss des Asphalt- granulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht

von

Martin Radenberg
Miomir Miljković
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Volker Schäfer
Schäfer Consult
Brake

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 86

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 07.0258/2011/CRB:
Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kalt gebundenen und Bitumendominanten Tragschicht

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-191-2

Bergisch Gladbach, Oktober 2015

Kurzfassung – Abstract

Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kalt gebundenen und bitumendominanten Tragschicht

Im derzeitigen Regelwerk der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen können mit Bitumenemulsion gebundene Tragschichten nur unzureichend auf Basis empirischer Erfahrungswerte bei der Dimensionierung eines Oberbaus berücksichtigt werden. Hierzu fehlen Erfahrungen über die Höhe der dimensionierungsrelevanten Materialkenndaten und deren beeinflussende Parameter.

Die Auswertung der begleitenden Untersuchungen einer großflächigen Baumaßnahme mit einer bitumendominanten Tragschicht in Kaltbauweise (BAB 30) belegt eine zwar gleichmäßige, aber wenig tragfähige Materialqualität.

Mit dem Ziel der Optimierung der dimensionierungsrelevanten Kennwerte einer bitumendominanten Tragschicht in Kaltbauweise wurden zunächst Art und Gehalt der Bitumenemulsion und des Asphaltgranulates variiert. Zur Festlegung der Gemischzusammensetzungen wurden die volumetrischen Kenndaten sowie die zeitliche Entwicklung der Steifigkeiten im Spaltzugversuch ermittelt.

Die ermittelten Steifigkeiten zeigen, dass statische Spaltzugfestigkeiten von 1,1 bis über 1,5 MPa nach 28 Tagen Probenlagerung erreicht werden können. Die zum Vergleich herangezogene statistische Auswertung von baubegleitenden Untersuchungen der BAB 30 belegt einen deutlichen Unterschied. Hier lagen die mittleren Spaltzugfestigkeiten nach 28 Tagen nur bei 0,5 bis 0,7 MPa. Die Bruchdehnungen der in diesem Forschungsprojekt untersuchten Gemische von über 2,5 % dokumentieren zudem einen eindeutigen emulsions-dominanten Mischgutcharakter. Auch die statischen E-Moduln sind mit bis zu 5.000 MPa als hoch für eine Bitumenemulsion gebundene Asphalttragschicht einzustufen.

Mit den ausgewählten Gemischen wurden anschließend Probepplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt. Hierzu wurden die Verdichtungsbedingungen leicht modifiziert. An den aus den Probepplatten herausgebohrten Bohrkernen

wurden mittels dynamischem Spaltzug-Schwellversuch die Steifigkeiten bei Prüftemperaturen von -10 bis 20 °C, sowie bei den Prüffrequenzen von 0,1, 1, 5 und 10 Hz bestimmt. Darüber hinaus wurde, ebenfalls im Spaltzug-Schwellversuch, das Ermüdungsverhalten bei 20 °C ermittelt.

Die Ergebnisse der dynamischen Spaltzug-Schwellversuche zeigen, dass die Steifigkeiten der mit Bitumenemulsion gebundenen Asphalttragschichten nicht das Niveau einer Heißasphalttragschicht erreichen. Fast über den gesamten Temperatur- und Frequenzbereich sind deutlich niedrigere Steifigkeiten ermittelt worden. Tendenziell erreichen die Gemischvarianten mit dem weicheren Asphaltgranulat zumindest bei niedrigeren Prüftemperaturen und/oder niedrigeren Prüffrequenzen höhere Steifigkeiten im Vergleich zu den Gemischen mit dem härteren Bindemittel im Asphaltgranulat.

Die aus den Laborversuchen abgeleiteten Ermüdungskurven zeigen im Vergleich zum Referenzasphalt eine ähnliche Situation. Auch hier ist ein signifikant schlechteres Verhalten im Vergleich zum Niveau einer Heißasphalttragschicht erkennbar. Ebenso zeigt die Mehrzahl der Gemischvarianten mit dem weicheren Bindemittel im Asphaltgranulat im Vergleich zu den Varianten mit dem härteren Asphaltgranulat ein etwas besseres Ermüdungsverhalten.

Die Dimensionierungsberechnungen haben ergeben, dass die Einbindung einer Kaltasphalttragschicht in den hohen Belastungsklassen nur sehr bedingt möglich ist. Hier lassen sich lediglich unter Berücksichtigung einer konventionellen Asphalttragschicht als unterste Asphaltsschicht brauchbare Lösungen errechnen. Bei Belastungsklassen Bk3,2 und niedriger konnten wirtschaftlich und bautechnisch sehr sinnvolle Lösungen dargestellt werden. Hier bietet sich offensichtlich ein sehr interessantes Anwendungsgebiet für Kaltasphalttragschichten an. Allerdings haben nur wenige der untersuchten Gemischvarianten zu einer wirtschaftlichen Oberbaudicke geführt. Die Varianten mit dem weicheren Asphaltgranulat (AG1), und hier besonders die Varianten mit hohem Asphaltgranulatanteil lieferten die wirtschaftlichsten Oberbaukonzepte.

Zukünftige Forschungsprojekte mit Kaltasphaltbauweisen sollten die mechanische Wirksamkeit

des Emulsionswassers in zeitlicher Betrachtung berücksichtigen. Hierzu konnte gezeigt werden, dass auch weit über 28 Tage hinaus noch eine deutliche positive Veränderung der mechanischen Eigenschaften an mit Bitumenemulsion gebundener Asphalttragschichten zu erwarten ist.

Influence of reclaimed asphalt on design and fatigue relevant material properties of a plant-mixed cold bound and bitumen dominant base layer

After the current Regulations of the Research Society for Roads and Traffic, bitumen emulsion bound base layers can be only inadequately considered for pavement design based on empirical experience values. Therefore, experiences about the values of the design relevant material properties and their influential parameters are missing.

Evaluation of the accompanying investigations of a large surface construction project with a cold bitumen dominant base layer (BAB 30) showed an uniform but low bearing capacity material quality.

With the objective of optimizing the design relevant properties of a bitumen dominant cold base layer, thereafter were type and content of a bitumen emulsion and reclaimed asphalt varied. For defining of the mixture compositions, volumetric properties as well as the development of the indirect tensile strengths were determined.

The determined stiffness shows that the static indirect tensile strengths from 1,1 to over 1,5 MPa after 28 days of specimen curing are possible to be reached. The performed comparative statistical evaluation of the testing during the construction of BAB 30 showed a significant difference. Here, the average indirect tensile tests after 28 days are only from 0,5 to 0,7 MPa. The failure strains of the mixtures tested in this research project of more than 2,5‰ proof thus a highly bitumen emulsion dominant character of the mixture. Also the static E-modules of up to 5 000 MPa were qualified as high for a bitumen emulsion bound asphalt base layer.

Afterwards, asphalt plates of selected mixtures were produced by a roller compactor. For this purpose the conditions of compaction were slightly modified. The specimens bored from the asphalt plates were subjected to determination of stiffness at test temperatures from -10 to 20 °C as well as at

the test frequencies of 0,1, 1, 5, and 10 Hz by dynamic indirect tensile testing. Thereafter, also by the dynamic indirect tensile test the fatigue function at 20 °C was also determined.

The results of the dynamic indirect tensile test show that the stiffness of the bitumen emulsion bound asphalt base layers do not reach the level of the hot asphalt mixtures. The significantly lower stiffness was determined for almost the entire temperature and frequency range. There is a tendency that the mixture variants with the softer reclaimed asphalt reach higher stiffness compared to the mixtures with harder bitumen in the reclaimed asphalt at lower test temperatures and/or low test frequencies.

The fatigue functions derived from the laboratory testing show a similar situation in comparison to the reference asphalt. The significantly worse performance in comparison to hot asphalt base layer is here also recognisable. Similarly, numerous mixture variants with the softer bitumen in the reclaimed asphalt show a better fatigue behaviour comparing to the variants with the hard reclaimed asphalt.

The pavement design calculations resulted in that the inclusion of a cold asphalt base layer is only conditionally possible in higher traffic load classes. Here it is only possible to achieve useful solutions by considering a conventional asphalt base layer as a lower layer. At the load class Bk 3,2 and below, economically and constructively very reasonable solutions could be presented. Here, a very interesting field of application for cold asphalt base layers is offered. However, only few tested mixture variants led to economically pavement/layer thicknesses. The variants with the softer reclaimed asphalt (AG1), and here especially the variants with the higher contents of reclaimed asphalt, supplied the most economical pavement concepts.

Future research projects with cold asphalt pavements should consider the effect of the water from the emulsion on the mechanical performance over time. Here it could be shown that a positive change of the mechanical properties of bitumen emulsion bound asphalt mixtures could be expected far beyond 28 days.

Inhalt

1	Stand des Wissens und Ziel des Forschungsvorhabens	7	4	Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische	30
1.1	Allgemeines	7	5	Optimierung des Gehaltes an Bitumenemulsion	37
1.2	Bitumenemulsionen	7	6	Prüfung der mechanischen Eigenschaften im Spaltzug-Schwellversuch	42
1.3	Asphaltgranulat	9	6.1	Herstellung der Asphalt-Probepplatten mit dem WSV	42
1.4	Beschreibung der Referenzabschnitte auf der BAB 30	9	6.2	Physikalische Eigenschaften der Asphalt-Probepplatten	42
1.5	Anforderungen an die Kaltfundationsschicht	10	6.2.1	Kaltasphaltgemische mit Asphaltgranulat AG3 (AG4)	42
1.6	Eigenschaften der eingebauten Schicht	11	6.2.2	Kaltasphaltgemische mit Asphaltgranulat AG1	45
1.6.1	Bauabschnitt I	11	6.3	Steifigkeiten	47
1.6.2	Bauabschnitt II	11	6.3.1	Steifigkeiten der Referenzvarianten	47
1.6.3	Bauabschnitt IV	12	6.3.2	Steifigkeiten der Varianten mit AG3	49
1.6.4	Bauabschnitt VI	13	6.3.3	Steifigkeiten der Varianten mit AG1	59
1.6.5	Mittelwerte über alle Bauabschnitte ..	14	6.4	Ermüdungsfunktion	66
2	Methodik des Vorgehens	14	6.4.1	Ermüdungsfunktion der Referenzvarianten	66
2.1	Versuchsprogramm	14	6.4.2	Ermüdungsfunktion der Varianten mit AG3	67
2.2	Verwendete Baustoffe und Zusammensetzung der Baustoffgemische	14	6.4.3	Ermüdungsfunktion der Varianten mit AG1	70
3	Eigenschaften der verwendeten Baustoffe	17	6.4.4	Bewertung der Ermüdungsfunktionen	70
3.1	Bitumenemulsionen	17	7	Rechnerische Dimensionierung des Oberbaus	73
3.2	Referenz-Straßenbaubitumen	19	7.1	Eingangswerte für die Dimensionierung	73
3.3	Zement	20	7.1.1	Dimensionierungsrelevante Parameter der Verkehrsbelastung	73
3.4	Asphaltgranulat	21			
3.4.1	Auswahl geeigneter Asphaltgranulate	21			
3.4.2	Allgemeine Eigenschaften der Asphaltgranulate	21			
3.4.3	Gesteinskörnungen in den Asphaltgranulaten	24			
3.4.4	Bindemittel in den Asphaltgranulaten	26			
3.5	Gesteinskörnungen	28			

7.1.2	Dimensionierungsrelevante Parameter des frostsicheren Oberbaus und des Temperatur- verlaufes	73
7.2	Resultierende Oberbauvarianten	74
8	Zusammenfassung	76
9	Ausblick	77
10	Literatur	78
	Anhang 1	81
	Anhang 2	83

1 Stand des Wissens und Ziel des Forschungsvorhabens

1.1 Allgemeines

Ausbauasphalt wird vor dem Hintergrund der steigenden Bitumenpreise, zu einem Baustoff mit zunehmender wirtschaftlicher Bedeutung. In vielen Regionen Deutschlands kann der anfallende Ausbauasphalt aufgrund maschinentechnischer und bautechnischer Randbedingungen nicht vollständig bei der Heißmischgutproduktion wieder verwendet werden. Dieses Problem wird sich in Zukunft noch in erheblichem Maße verstärken, da in den nächsten Jahren bundesweit die Grunderneuerung zahlreicher Abschnitte von Bundesautobahnen ansteht, die mit einer Asphaltbefestigung ausgeführt worden sind. Ein Downcycling der mit Bitumen gebundenen Ausbaustoffe in ungebundenen Tragschichten ist zwar bautechnisch möglich, volkswirtschaftlich jedoch wenig sinnvoll.

In mit Bitumenemulsion kalt gebundenen Tragschichten kann das Altbindemittel im Ausbauasphalt grundsätzlich mit aktiviert werden, sodass hierin ein sinnvoller Recyclingweg zu sehen ist. Das Ausmaß der Aktivierung des Altbindemittels in einer solchen Schicht sowie die steuerbaren Einflussgrößen sind bisher nicht oder nur sehr wenig untersucht worden. Es wurden in der Vergangenheit viele Baumaßnahmen mit dieser Bauweise hergestellt, ohne dass dabei aber die Komponente Asphaltgranulat als variable Optimierungsgröße eingesetzt wurde.

Mit der Veröffentlichung des Merkblattes für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen (M VB-K), wurden in Kapitel 3 (Gelungsbereich und Anwendung) nun aber Angaben zur Berücksichtigung einer kalt gebundenen Tragschicht im Rahmen der Bemessung nach den RStO 01 aufgeführt. Die dort aufgeführten Hinweise stellen empirische Erfahrungswerte dar, die bisher noch nicht hinreichend wissenschaftlich abgesichert sind. Vor dem Hintergrund der Überarbeitung der RStO (RStO 12) und der zwischenzeitlich neu erschienenen RDO Asphalt habe sich zu dem die planungstechnischen Randbedingungen geändert.

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung eines zwangsgemischten Kaltmischgutes mit einem besonderen Schwerpunkt auf der Aktivierung des im Ausbau-

asphalt befindlichen Altbindemittels. Der Nachweis der Aktivierung erfolgt über die Bestimmung der bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialkenndaten (E-Modul bei fünf verschiedenen Temperaturen und dehnungsabhängiges Ermüdungsverhalten). Dabei werden nicht nur der Anteil an Asphaltgranulat, sondern auch die Qualität und die Korn-/Stückgrößenverteilung variiert.

Mit der Quantifizierung des Einflusses des Asphaltgranulates auf die für die Dimensionierung eines Straßenoberbaus erforderlichen Materialkenndaten können dann Hinweise und Empfehlungen zur Erstellung einer Erstprüfung sowie gesicherte Angaben zu den verkehrsbelastungsabhängigen Schichtdicken gemacht werden.

1.2 Bitumenemulsionen

Unabhängig von dem Verwendungszweck ist eine niedrige Viskosität des Bindemittels bei der Verarbeitung zumeist vorteilhaft. Üblich sind folgende Methoden um die Viskosität bitumenhaltiger Bindemittel abzusenken (READ und WHITEOAK 2003, WIRTGEN 2010):

- Erwärmen,
- Lösen in einem Lösungsmittel,
- Emulgieren,
- Aufschäumen.

Bitumenemulsionen sind Zwei-Phasen-Systeme, bestehend aus Bitumen, Wasser und ein oder mehreren Zugabestoffen, die die Herstellung und Stabilisierung unterstützen. Das Bitumen ist in der Wasserphase in Tröpfchenform gelöst, mit typischen Partikeldurchmessern von 0,1 bis 50 µm. Diese Tröpfchen sind in der Suspension durch elektrische Verbindungen fixiert (READ und WHITEOAK 2003).

In Bezug auf die chemische Zusammensetzung besteht eine Bitumenemulsionen aus der ständigen Phase Wasser und der gelösten Phase Bitumen. Solche Emulsionen werden auch als Öl-in-Wasser-Emulsionen (O/W) bezeichnet. Jedoch können einige der Bitumenpartikel auch noch Anteile an Wasser enthalten und somit den Emulsionstyp W/O/W bilden (AKZONOBEL, SALOMON 2006).

Die Größenverteilung der Bitumenpartikel wird von der Zusammensetzung und den Herstellungsbedin-

gungen in der Produktionsanlage beeinflusst. Die vorhandene Größenverteilung beeinflusst auch die physikalischen Eigenschaften, wie z. B. die Viskosität und die Lagerungsstabilität stark. Größere durchschnittliche Bitumenpartikel führen zu einer niedrigeren Viskosität der Bitumenemulsion. Auch sind Emulsionen mit großen Bitumenpartikeln sehr instabil, die Bitumenphase neigt dazu, sich vom Emulsionswasser zu trennen. Eine kleine Partikelgröße verbessert die Verwendbarkeit im Mischgut und als Emulsion zum Anspritzen (SALOMON 2006). Deshalb ist die Sicherstellung einer definierten Partikelgrößenverteilung während des Emulgiervorganges wichtig für das Erreichen der gewünschten Eigenschaften der Bitumenemulsion.

Bitumenemulsionen können wie folgt klassifiziert werden:

- kationische Bitumenemulsionen,
- anionische Bitumenemulsionen,
- nicht-ionische Bitumenemulsionen.

Die Begriffe kationisch und anionisch beziehen sich auf die elektrische Ladung der Bitumenpartikel. Grundlage ist ein fundamentales Gesetz der Elektrizität: gleiche Ladungen stoßen sich ab und verschiedenartige Ladungen ziehen sich an. Wenn in einer Bitumenemulsion ein elektrisches Potenzial appliziert wird, werden die negativ geladenen Bitumenpartikel zur Anode bewegt. In diesem Fall wird die Emulsion als anionisch bezeichnet (READ und WHITEOAK 2003). Die dominante Partikelgröße der kationischen Bitumenemulsionen reichen von 0,5 bis 20 μm , während die dominante Partikelgröße der anionischen Bitumenemulsionen zwischen 0,1 bis 10 μm (BLAB 2010) liegt. Die Bitumenpartikel in nicht-ionische Emulsionen sind neutral geladen und bewegen sich daher nicht zur Elektrode. Diese Emulsionen werden nur selten im Asphaltstraßenbau benutzt. Bild 1 stellt die Ladungszustände einer Bitumenemulsion dar; Bild 2 illustriert den Brechvorgang einer kationischen Bitumenemulsion.

Im Jahre 1906 erfolgte die Zuteilung des ersten Patentbesitzes über die Dispersionen von Bitumen in Wasser für den Bereich des Straßenbaus. Zuerst wurde versucht auf rein mechanischem Wege die Bitumenemulsion herzustellen, schnell wurde allerdings erkannt, dass dies nicht ausreichend ist. Daher wurde die Zugabe von Emulgatoren üblich. Anfänglich wurden natürliche, organische Säuren

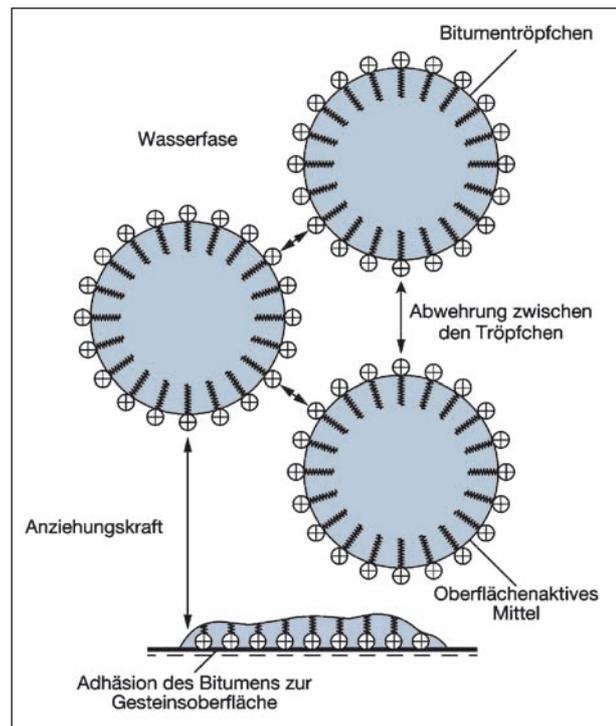


Bild 1: Elektrische Ladung der kationischen Bitumentropfen (READ und WHITEOAK 2003)

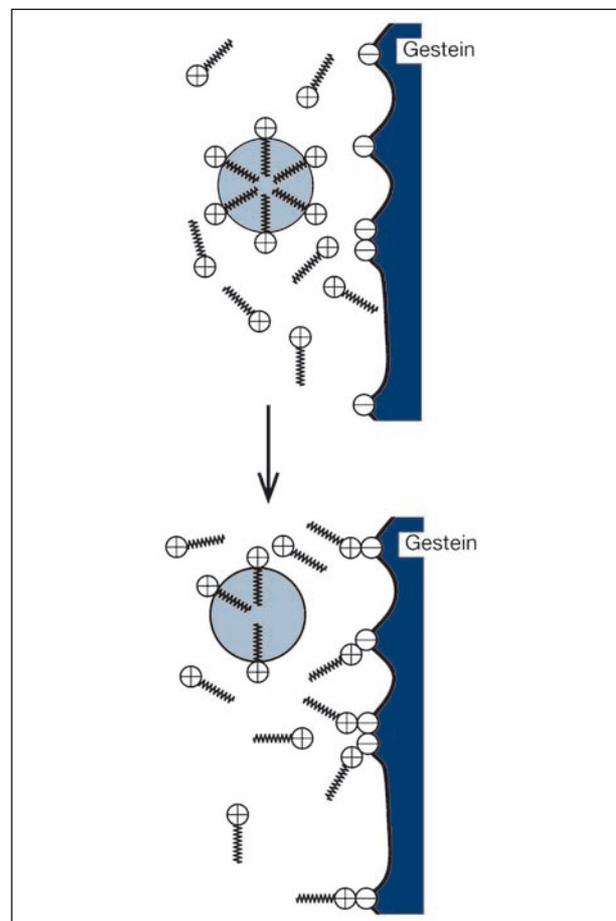


Bild 2: Brechvorgang der kationischen Bitumenemulsion (READ und WHITEOAK 2003)

verwendet, z. B. Natrium- oder Magnesiumhydroxide. Seit den frühen 50er Jahren wurden die kationische Bitumenemulsionen zunehmend gebräuchlicher. Während anionische Emulsionen durch Verdunstung des Emulsionswassers brechen, haben kationische Emulsionen ein chemisches Brechverhalten. Dies verkürzt den Zeitraum zwischen dem Bau und der Freigabe einer Straße und erhöht deren Dauerhaftigkeit (SJÖBLOM 2006).

1.3 Asphaltgranulat

Im Allgemeinen kann Asphaltgranulat sowohl zur Herstellung neuer Asphaltmischgüter, als auch für andere Zwecke, wie z. B. für den Dammbau oder für Fundations- oder Tragschichten verwendet werden (European Asphalt Pavement Association 2003). Als Asphaltrecycling wird die Gewinnung, Behandlung und Wiederverwendung von Asphaltgranulat in frischem Asphaltmischgut bezeichnet. Das im Asphaltgranulat enthaltene Bindemittel und die enthaltene Gesteinskörnung übernehmen im rezyklierten Gemisch die gleiche Funktion wie zuvor. Prinzipiell wird das Asphaltgranulat in zwei Schritten gewonnen. Durch Fräsen oder Aufbrechen der alten Asphaltmischgüter in Schollen wird der Ausbauasphalt gewonnen (DIN EN 13108-8, M WA, TL AG-StB). Dieser wird nach einer anschließenden Zerkleinerung als Asphaltgranulat bezeichnet. Unter Berücksichtigung der relevanten Anforderungen kann das Asphaltgranulat als Zugabe für Kalt- und Heißasphaltmischgüter, sowohl im Asphaltmischwerk als auch in situ benutzt werden. Bild 3 zeigt den idealen Asphaltkreislauf mittels Recycling.

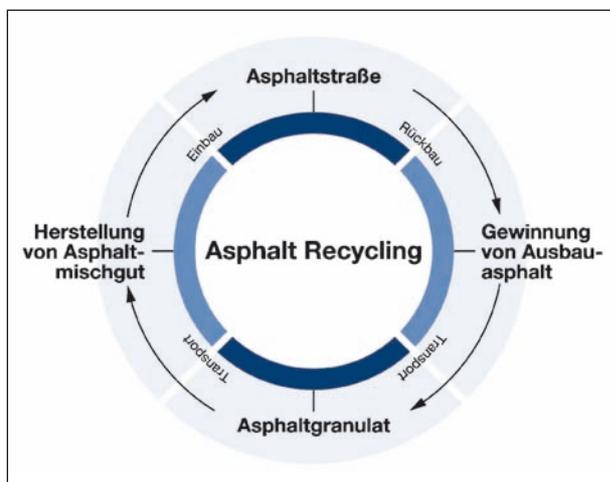


Bild 3: Idealer Asphaltkreislauf mittels Recycling

Obwohl die Wiederverwendung von Asphaltgranulat in den frühen 50er Jahren anfang, lagen bis zu dem Ölembargo in den 70er Jahren keine nennenswerten Erfahrungen im Umgang mit rezykliertem Asphalt vor. Daher wurde der Einfluss des Asphaltgranulates nur experimentell oder auch gar nicht berücksichtigt (National Asphalt Pavement Association 2007). Die Wiederverwendung von Asphaltgranulaten in bedeutenden Mengen begann in den 1980er Jahren. Ein starker Anstieg wurde in dem Zeitraum zwischen 1987 und 1995 bei der Wiederverwendung des Asphaltgranulates in Fundations- und Tragschichten verzeichnet (TÄUBE, 2011). Technisch besser ausgestattete Mischanlagen führten ab den 90er Jahren aber auch zu einer stärkeren Wiederverwendung von Asphaltgranulat im Heißmischgut.

1.4 Beschreibung der Referenzabschnitte auf der BAB 30

Die BAB 30 wurde in den Jahren 1967 bis 1977 erbaut. Der vorhandene grundhaft zu erneuernde Straßenaufbau enthält Asphaltbefestigungen mit unterschiedlichen Asphaltdeckschichten (Gussasphalt, Asphaltbeton und Splittmastixasphalt), einer Asphaltbinderschicht und einer Asphalttragschicht. Die Gesamtdicke des Asphaltpaketes beträgt im Mittel rd. 30 cm. Die darunter liegende Sandschicht ist rd. 40 cm dick, wobei die oberen 15 cm mit Zement verfestigt wurden. Unter dem Betonstandstreifen befindet sich eine Asphalttragschicht.

Die vorhandene Fahrbahn besteht in dem 36,8 km langen grundhaft zu erneuernden Abschnitt aus einer Asphaltbefestigung auf einer Verfestigung mit Zement und einer Asphaltdeckschicht aus Gussasphalt. Die Gesamtdicke der Asphaltbefestigung beträgt im Mittel ca. 30 cm auf einer ca. 40 cm dicken Sandschicht deren obere 15 cm mit Zement verfestigt wurden.

Die Voruntersuchungen über die Beschaffenheit der vorhandenen Asphaltmischgüter haben ergeben, dass nur die 8 cm dicke Asphaltbinderschicht für eine Verwertung im Asphalt mit einer mittleren Zugabemenge von 30 M.-% geeignet ist. Bei den anderen Asphaltmischgütern ist das Bindemittel soweit verhärtet, dass eine Verwertung in heiß aufbereiteten Asphaltmischgütern nicht mehr möglich ist.

Darüber hinaus sind in einigen kurzen Abschnitten pechhaltige Ausbaustoffe angetroffen worden.

Es ist davon auszugehen, dass die Verfestigung mit Zement für eine Verwertung im Rahmen der Grundenerneuerung nicht geeignet ist und daher auszubauen ist.

Aufgrund des geringen Anfalls an für eine weitere Aufbereitung geeigneten und im Rahmen der Grundenerneuerung zur Verwertung geeigneten ungebundenen Ausbaustoffen wurden durchschnittlich ca. 22 cm der vorhandenen Asphaltbefestigung nicht wiederverwertet. Ohne direkte Wiederverwendung hätte dies einer Überschussmenge von 450.000 t entsprochen, die von den umliegenden Asphaltherstellern ohne weiteres nicht im Rahmen einer Heißaufbereitung verarbeitbar gewesen wären. Die Wiederverwendung in Kaltbauweise ist eine alternative Möglichkeit des hochwertigen Recyclings.

Aufgrund der zuvor geschilderten Randbedingungen bietet sich hier die Ausführung einer Asphaltfundationsschicht im Kalteinbau gemäß dem zurzeit in Bearbeitung befindlichen „Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen“.

Das Mischgut für diese Bauweise besteht in der Regel aus 85 M.-% Ausbauasphalt und 15 M.-% Brechsand zur Verbesserung der Sieblinie sowie Bitumenemulsion und Zement gemäß Eignungsprüfung.

Baustoffgemische mit 4 bis 5 M.-% Bitumenemulsion und 1,5 bis 2 M.-% hydraulischem Bindemittel erfüllen im Regelfall die vorgenannten Zielvorgaben. Dabei sollte das Verhältnis von Bitumenemulsion zu hydraulischem Bindemittel mindestens 5:2 betragen.

Auf diese Weise entsteht eine hochwertige Tragschicht unter Nutzung der Bindemeisteeigenschaften der Ausbaustoffe ganz im Sinne der Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG).

Bei der Ausführung einer Verfestigung mit Zement gemäß Tafel 1, Zeilen bis 2.1 bis 2.3 der RStO 01 könnten die Vorgaben des KrWG nicht eingehalten werden. Zusätzlich sind hier wieder die hinlänglich bekannten Probleme der Reflexionsrissbildung in der Asphaltbefestigung zu befürchten. Dieses würde auch die Dauerhaftigkeit der Befestigung nachhaltig negativ beeinflussen.

Im Sinne des KrWG sollten die bei dieser Baumaßnahme anfallenden Ausbaustoffe einer hochwertigen Wiederverwendung zugeführt werden. Dabei

wurde auf eine höchstmögliche Verwertungsrate Wert gelegt. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die vorhandenen Asphalt-schichten nur z. T. für eine Heißverwertung geeignet wären. In einigen Abschnitten wurden auch pechhaltige Altbaustoffe angetroffen. Diese sollten ebenfalls in die Aufbereitung mit einbezogen werden. Auch dies waren Aspekte, die zur Auswahl der Kaltrecycling-Bauweise führten.

1.5 Anforderungen an die Kaltfundationsschicht

Die Grundlage für das Konzept der Fundationsschicht im Kalteinbau der BAB 39 war das zum Zeitpunkt dieser Überlegungen noch in Bearbeitung befindliche Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen (M VB-K, im Jahr 2007 veröffentlicht). Da eine vollständige Verwertung der Ausbaustoffe im Vordergrund stand, sollte die Schichtdicke mindestens 20 cm betragen, jedoch konnte diese auch je nach anfallender Menge der Ausbaustoffe im jeweiligen Bauabschnitt auf 25 cm erhöht werden. Die Fundationsschicht wurde im Zentralmischverfahren hergestellt und setzte sich zusammen aus:

- ca. 75 M.-% Granulat aus Asphalt- und pechhaltigem Aufbruch,
- ca. 10 M.-% gebrochene feine Gesteinskörnung,
- ca. 10 M.-% Beton aufbruch und
- ca. 5 M.-% Bitumenemulsion und Zement.

Um die geforderten Eigenschaften zu erreichen, wurden dem Baustoffgemisch 4 bis 5 M.-% Bitumenemulsion und 1 bis 2 M.-% hydraulisches Bindemittel zugegeben. Die Zielvorgaben wurden im Verlauf der Baumaßnahme jeweils dem aktuellen Stand der Erkenntnisse (entsprechend einem neuen Entwurf des v. g. Merkblattes) angepasst und sind in Tabelle 1 dargestellt. In Tabelle 2 sind die Anforderungen an das Baustoffgemisch und die fertige Schicht zusammengestellt.

Mit diesen Randbedingungen entstand eine hochwertige Fundationsschicht, der die Eigenschaften der Ausgangsstoffe zu Grunde lagen und den Forderungen des KrWG genügte. Diese Fundationsschicht ersetzt im neuen Fahrbahnaufbau die un-

Eigenschaft	Einheit	Zielvorgaben		
		Bauabschnitte		
		BA II, FR R	BA IV, FR O	BA I; BA II, FR O; BA IV, FR R; BA VI
Kornanteil < 0,09 mm	M.-%	≥ 5	—	≥ 5
Kornanteil 0,09-2 mm	M.-%	≥ 15	—	≥ 15
Hohlraumgehalt	Vol.-%	4-12	4-12	
Marshall-Stabilität	kN	≥ 2 (bei 60 °C) ≥ 10 (bei 25 °C)		—
Abfall der Marshall-Stabilität	%	≤ 30		—
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	—	≥ 0,5
Verhältnis Bitumenemul.: hydr. BM	—	3,5 : 2	5 : 2	3,5 : 2

Tab. 1: Zielvorgaben für die Erstprüfung der Fundationsschichtgemische

Eigenschaft	Einheit	Anforderungen			
		Bauabschnitte			
		BA II, FR R	BA IV, FR O	BA IV; FR R, BA VI, FR R	BA I; BA II, FR O; BA VI, FR O
Kornanteil > 16 mm	M.-%	—	—	—	≥ 15
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	—	—	—	≤ 10
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	≤ 12	—	—	4-12
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	—	≤ 15	≤ 15	≤ 15
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	≥ 98	≥ 98	≥ 98
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	—	—	≥ 0,5	≥ 0,5

Tab. 2: Anforderungen an das Baustoffgemisch und die fertigen Fundationsschichten

gebundenen bzw. hydraulisch gebundenen Tragschichten.

1.6 Eigenschaften der eingebauten Schicht

In den Bauabschnitten I, II und VI wurden pechhaltige Ausbaustoffe angetroffen, die umweltverträglich in der Fundationsschicht wieder verwendet wurden. Im Bauabschnitt IV kam ausschließlich Asphaltaufruch zur Anwendung. Der Einbau der Fundationsschicht erfolgte zweilagig.

Bei der Auswertung der verschiedenen Bauabschnitte werden beide Lagen gemeinsam ausgewertet, darin enthalten sind auch die Prüfungsergebnisse der pechhaltigen Materialien.

1.6.1 Bauabschnitt I

Die Richtungsfahrbahn Rheine des Bauabschnittes I wurde im Jahr 2005 gebaut, die Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausen im Jahr 2006. Pro Rich-

tungsfahrbahn wurden jeweils 20 Kontrollprüfungen ausgewertet. Für die Richtungsfahrbahn Rheine unterteilen sich diese in 16 Kontrollprüfungsergebnisse für die Asphaltfundationsschicht (AFS) und vier für die pechhaltige Fundationsschicht (PFS). Die Anforderungen an die Fundationsschichten der Richtungsfahrbahnen unterscheiden sich nicht. Tabelle 3 zeigt Auszüge aus den Ergebnissen der Kontrollprüfungen als Mittelwert (MW) mit der zugehörigen Standardabweichung (StAbw) der Fahrrichtung Rheine (FR R) und Tabelle 4 die der Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausen (FR O).

1.6.2 Bauabschnitt II

Die Richtungsfahrbahn Rheine des Bauabschnittes II wurde im Jahr 2004 gebaut, die Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausen im Jahr 2007. Für die Richtungsfahrbahn Rheine wurden insgesamt 15 Kontrollprüfungen ausgewertet. Diese unterteilen sich in 13 für die Asphaltfundationsschicht (AFS) und zwei für die pechhaltige Fundationsschicht (PFS). Für die Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausen wur-

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis BA I, FR R						
		Soll	AFS		PFS		AFS + PFS	
			MW	StAbw	MW	StAbw	MW	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	≥ 15	22,9	4,3	21,1	3,5	22,5	4,1
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	≤ 10	3,2	1,5	5,3	0,6	3,6	1,7
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	4-12	14,4	1,9	9,9	0,7	13,5	2,5
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	≤ 15 ≤ 12 ¹⁾	13,1	1,7	8,8	0,7	12,3	2,3
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	101,5	1,3	101,3	1,1	101,4	1,2
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	0,69	0,1	0,68	0,1	0,69	0,1

¹⁾ nur für PFS

Tab. 3: Zusammensetzung und Eigenschaften der Fundationsschichten im BA I, FR Rheine

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis BA I, FR O		
		Soll	AFS	
			MW	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	≥ 15	22,6	3,1
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	≤ 10	2,9	1,1
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	4-12	9,5	2,7
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	≤ 15	8,7	2,8
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	100,9	1,8
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	0,57	0,2

Tab. 4: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltfundationsschicht im BA I, FR Bad Oeynhausen

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis BA II, FR R						
		Soll	AFS		PFS		AFS + PFS	
			MW	StAbw	MW	StAbw	MW	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	≥ 10	— ¹⁾	—	16,2	1,4	16,2	1,4
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	≤ 10	0,7	0,9	6,2	1,3	1,5	2,1
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	≤ 15	11,2	2,4	14,2	0,6	11,6	2,5
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	≤ 12	12,8	1,9	13,1	0,3	12,8	1,7
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	99,1	2,8	101,3	0,4	99,4	2,7
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	0,78	0,2	0,75	0,2	0,77	0,2

¹⁾ Daten nicht vorhanden

Tab. 5: Zusammensetzung und Eigenschaften der Fundationsschichten im BA II, FR Rheine

den 28 Ergebnisse ausgewertet. Die Anforderungen an die Fundationsschichten unterscheiden sich je Richtungsfahrbahn nur geringfügig. Tabelle 5 zeigt Auszüge aus den Ergebnissen der Kontrollprüfungen als Mittelwert mit der zugehörigen Standardabweichung der Fahrrichtung Rheine (FR R) und die Tabelle 6 der Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausen (FR O).

1.6.3 Bauabschnitt IV

Die Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausen (FR O) des Bauabschnittes IV wurde im Jahr 2003 gebaut, die Richtungsfahrbahn Rheine (FR R) 2004. Es wurden insgesamt 35 Kontrollprüfungen ausgewertet. Diese unterteilen sich in 14 für die FR O und 21 für die FR R. Die Anforderungen an die Fundationsschichten unterscheiden sich je Richtungsfahr-

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis BA II, FR O		
		AFS		
		Soll	MW	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	≥ 15	21,8	4,9
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	≤ 10	2,0	1,2
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	4-12	11,0	3,2
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	≤ 15	8,5	1,7
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	102,8	3,9
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	0,50	0,1

Tab. 6: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltfundationsschicht im BA II, FR Bad Oeynhausens

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis						
		BA IV, FR R			BA IV, FR O			
		AFS			AFS			
		Soll	MW	StAbw	Soll	MW	StAbw	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	≥ 15	21,5	3,3	≥ 10	9,1	2,0	1,4
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	≤ 10	2,2	1,7	≤ 10	0,0	0,0	2,1
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	≤ 15	11,8	1,6	≤ 15	10,3	1,5	2,5
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	4-12	10,5	2,2	4-12	11,9	1,2	1,7
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	101,4	1,6	≥ 97	98,3	1,5	2,7
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	0,60	0,1	≥ 0,5	— ¹⁾	—	0,2

¹⁾ nicht bestimmt

Tab. 7: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltfundationsschicht im BA VI, beide FR

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis BA VI, FR R						
		Soll	AFS		PFS		AFS + PFS	
			MW	StAbw	MW	StAbw	MW	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	≥ 15	17,4	4,6	25,5	4,1	22,5	3,9
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	≤ 10	0,7	0,9	5,2	1,8	3,0	2,2
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	4-12	14,2	2,1	15,9	2,2	12,9	2,5
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	≤ 15	12,5	2,2	13,4	2,1	11,3	2,5
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	104,4	1,1	103,0	1,5	101,8	1,5
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	0,72	0,1	0,63	0,1	0,6	0,1

Tab. 8: Mittelwerte der Zusammensetzung und Eigenschaften der Fundationsschichten im BA VI, FR Rheine

bahn nur geringfügig. Tabelle 7 zeigt Auszüge aus den Ergebnissen der Kontrollprüfungen als Mittelwert mit der zugehörigen Standardabweichung der beiden Richtungsfahrbahnen.

1.6.4 Bauabschnitt VI

Die Richtungsfahrbahn Rheine des Bauabschnittes VI wurde im Jahr 2005 gebaut, die Richtungsfahr-

bahn Bad Oeynhausens im Jahr 2006. Für die Richtungsfahrbahn Rheine wurden insgesamt 16 Kontrollprüfungen ausgewertet, die sich in neun für die AFS und sieben für die PFS unterteilen. Für die Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausens wurden insgesamt 28 Kontrollprüfungen ausgewertet – 26 für die AFS und zwei für die PFS. Die Anforderungen an die Fundationsschichten der Richtungsfahrbahnen unterscheiden sich nicht. Tabelle 8 zeigt Auszüge aus

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis BA VI, FR R						
		Soll	AFS		PFS		AFS + PFS	
			MW	StAbw	MW	StAbw	MW	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	≥ 15	22,2	3,9	22,6 ¹⁾	—	10,1	4,2
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	≤ 10	4,0	1,8	5,9 ¹⁾	—	0,4	1,6
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	4-12	9,2	1,7	8,0	2,1	10,0	1,7
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	≤ 15	8,4	1,3	9,4	3,0	11,6	1,6
Verdichtungsgrad	%	≥ 98	100,9	1,3	101,6	0,9	98,7	1,8
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	≥ 0,5	0,52	0,1	0,50	0,0	0,50	0,0

¹⁾ Einzelwert

Tab. 9: Mittelwerte der Zusammensetzung und Eigenschaften der Fundationsschichten im BA VI, FR Bad Oeynhausen

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis alle Bauabschnitte	
		AFS + PFS	
		MW	StAbw
Kornanteil > 16 mm	M.-%	20,6	5,5
Kornanteil > 31,5 mm	M.-%	2,5	2,0
Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	11,3	3,0
Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht	Vol.-%	10,4	2,7
Verdichtungsgrad	%	101,2	2,5
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	0,60	0,2

Tab. 10: Zusammensetzung und Eigenschaften der Fundationsschichten der Bauabschnitte I, II, IV und VI

den Ergebnissen der Kontrollprüfungen als Mittelwert mit der zugehörigen Standardabweichung der Fahrrichtung Rheine (FR R) und Tabelle 9 die der Richtungsfahrbahn Bad Oeynhausen (FR O).

1.6.5 Mittelwerte über alle Bauabschnitte

Tabelle 10 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der insgesamt 162 Kontrollprüfungsergebnisse über alle Bauabschnitte und Richtungsfahrbahnen.

2 Methodik des Vorgehens

Basis für die wissenschaftliche Erarbeitung des Forschungsziels sind die bisherigen Erkenntnisse aus diversen Baumaßnahmen mit kaltgebundenen Tragschichten, insbesondere die in Kapitel 1.4 beschriebene Referenzmaßnahme.

Durch Variation der folgenden Parameter sollen die Einflussgröße auf die dimensionierungsrelevanten Kennwerte ermittelt werden:

- Art des Asphaltgranulates,
- Anteil an Asphaltgranulat,
- Art der Bitumenemulsion,
- Anteil an Bitumenemulsion,
- Korn- und Stückgrößenverteilung.

2.1 Versuchsprogramm

Bild 4 zeigt das Ablaufschema des Versuchsprogramms.

2.2 Verwendete Baustoffe und Zusammensetzung der Baustoffgemische

Die verwendeten Baustoffe und die Zusammensetzungen der Gemische wurden so ausgewählt, dass typische praxisübliche Komponenten und Konzepte abgedeckt werden. Vor diesem Hintergrund wurden stabilen Bitumenemulsionen mit möglichst breiter

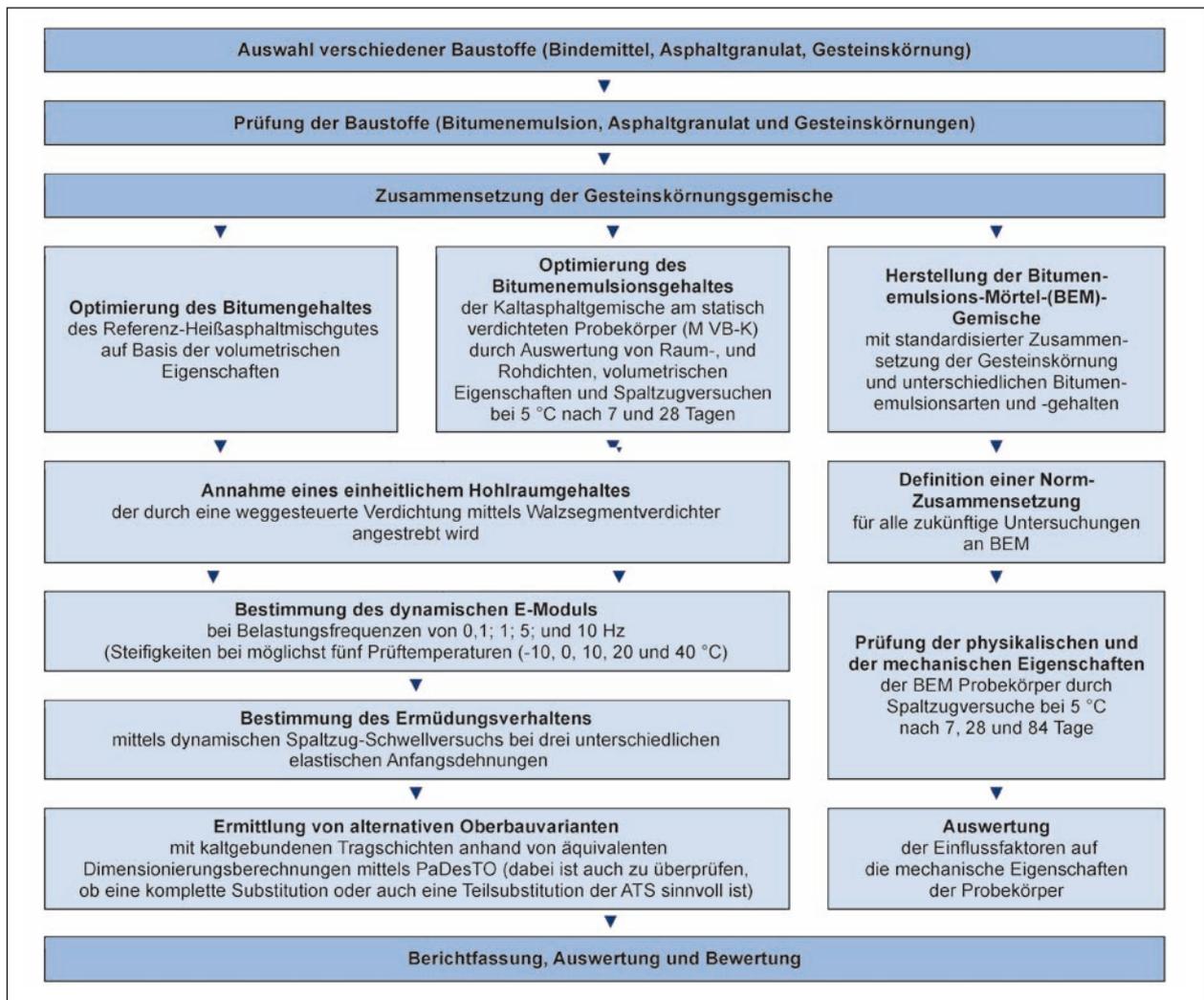


Bild 4: Ablaufschema des Versuchsprogramms

Abdeckung gängiger Straßenbaubitumen ausgewählt. Die Bitumenemulsionen wurden in ihrem Brechverhalten so eingestellt, dass sie mit hinreichender Sicherheit nach den Mischvorgang bricht. Zur Bindung des frei werdenden Emulsionswassers wurde den Gemischen eine geringe mittlere Menge hydraulischen Bindemittels zugesetzt.

Ein Ziel des Forschungsprojektes ist die Ermittlung der Einflussgröße „Asphaltgranulat und -menge“. Daher wurden drei unterschiedliche Arten von Asphaltgranulat mit möglichst unterschiedlich harten Bindemitteln ausgewählt. Als Referenzgranulat wurden Rückstellproben der aktuellen Baumaßnahmen der BAB 30 verwendet, die den bisher verwendeten Asphaltgranulaten der zurückliegenden Bauabschnitte etwa entsprechen. So könnten Rückschlüsse zum Langzeitverhalten an Bohrkernen aus den sehr gut dokumentierten Bauabschnitten gezogen werden. Die beiden weiteren Asphaltgranulate unterscheiden sich

durch eine sehr unterschiedliche Bindemittelverhärtung.

Daneben wurden als Ergänzungsmaterial Natur-Quarzsand für die feine Gesteinskörnung, Diabas für die grobe Gesteinskörnung und Kalkstein für die größte verwendete Korngruppe und als Füller verwendet.

Nachfolgend sind alle verwendeten Baustoffe aufgeführt:

A Kationische Bitumenemulsion C60B1-BEM mit dem Zielanteil des Straßenbaubitumens von 60 % (nach TL BE-StB):

- Bitumenemulsion mit Bitumen 70/100 (BE1),
- Bitumenemulsion mit Bitumen 50/70 (BE2),
- Bitumenemulsion mit Bitumen 160/220 (BE3).

B Portlandzement CEM I 42,5 N ohne Zusätze und mit üblicher Anfangsfestigkeit als hydraulisches Bindemittel

C Kalksteinfüller (F) — der hier wie ein mineralischer Baustoff mit sehr wichtigem Einfluss auf dem Brechverhalten der Bitumenemulsion aufgeführt wird

D Asphaltgranulat (AG):

- Referenz-Asphaltgranulat (AG0) aus der BAB 30,
- Asphaltgranulat mit geringer Bindemittelverhärtung und maximaler Stückgröße von 32 mm (AG1),
- Asphaltgranulat mit geringer Bindemittelverhärtung und maximaler Stückgröße von 16 mm (AG2), aus AG1 gewonnen,
- Asphaltgranulat mit hoher Bindemittelverhärtung und maximaler Stückgröße von 32 mm (AG3),
- Asphaltgranulat mit hoher Bindemittelverhärtung und maximaler Stückgröße von 16 mm (AG4), aus AG4 gewonnen.

E Natürliche Gesteinskörnung als jeweiliges Ergänzungsmaterial:

- Natur-Quarzsand (S) Korngruppe 0/2 mm,
- Diabas (D) Korngruppen 2/5, 5/8, 8/11, 11/16, und 16/22 mm,
- Kalkstein (K) Korngruppe 22/32 mm.

Die in den Klammern jeweils aufgeführten Abkürzungen werden nachfolgend für die Variantenbezeichnungen verwendet.

Die Bitumenemulsionen mit dem Bitumen 70/100 (BE1) und dem Bitumen 160/220 (BE3) wurden aufgrund der höheren Praxisrelevanz primär bei der Variantenzusammenstellung berücksichtigt.

Der Natur-Quarzsand 0/2 mm mit seinen abgerundeten Kornoberflächen wurde vor dem Hintergrund der besseren Verdichtbarkeit ausgewählt. Der zusätzliche Vorteil des Quarzsandes ist die eher neutrale Wechselwirkung mit einer kationischen Bitumenemulsion und deren Brechverhalten. Aus gleichem Grund und bedingt durch die häufige Anwendung in Asphaltstraßenbau wurde die Gesteinsart der groben Körnungen (Diabas) ausgewählt. Da

hierfür aber keine Lieferkörnung 22/32 mm zu beschaffen war, wurde die größte Körnung durch einen Kalkstein 22/32 mm gebildet.

Durch Variation und Kombination der vorgenannten Baustoffkomponenten wurden die acht unterschiedlichen Granulat/Gesteingemische sowie zusätzlich ein Referenzgemisch zusammengestellt.

In der Tabelle 11 sind die allgemeinen Angaben zur Beschreibung der Unterschiede der Mischgutzusammensetzungen dargestellt.

Asphaltmischgutgruppierung	Asphaltmischgut	Bitumenemulsion	Asphaltgranulat	Ergänzende Gesteinskörnung
			Zielanteil der Gesteinskörnung ohne Füller	
AM0	AM0.1	BE1	— ¹	
AM1	AM1.1	BE1	20 % (AG1)	80 %
	AM1.2 ²	BE2		
	AM1.3	BE3		
AM2	AM2.1	BE1	50 % (AG1)	50 %
	AM2.2 ²	BE2		
	AM2.3	BE3		
AM3	AM3.1	BE1	80 % (AG1)	20 %
	AM3.2 ²	BE2		
	AM3.3	BE3		
AM4 ²	AM4.1 ²	BE1	80 % (AG2)	20 %
	AM4.2 ²	BE2		
	AM4.3 ²	BE3		
AM5	AM5.1	BE1	20 % (AG3)	20 %
	AM5.2 ²	BE2		
	AM5.3	BE3		
AM6	AM6.1	BE1	50 % (AG3)	50 %
	AM6.2 ²	BE2		
	AM6.3	BE3		
AM7	AM7.1	BE1	80 % (AG3)	20 %
	AM7.2 ²	BE2		
	AM7.3	BE3		
AM8	AM8.1	BE1	80 % (AG4)	20 %
	AM8.2 ²	BE2		
	AM8.3	BE3		

AG2 = 0/16 mm-Anteil aus AG1
AG4 = 0/16 mm-Anteil aus AG3
¹ Gesteinskörnung, die auf der BAB 30 eingesetzt wurde
² optionale Asphaltmischgutvarianten

Tab. 11: Zusammensetzung der Asphaltmischgüter

Zusätzlich werden zwei Referenz-Heißasphaltgemische mit Straßenbaubitumen 70/100 geprüft:

- AM0.0 – auf Grundlage des Korngemisches AM0,
- AM6.0 – auf Grundlage des Korngemisches AM6.

3 Eigenschaften der verwendeten Baustoffe

3.1 Bitumenemulsionen

Die für das Forschungsprojekt verwendeten Bitumenemulsionen wurden anhand der in den TL BE-StB geforderten Kenndaten charakterisiert. Dazu wurden Untersuchungen an den Bitumenemulsionen und am rückgewonnenen Bindemittel vor und nach RTFOT-Alterung durchgeführt. Tabelle 12 enthält die allgemeinen Kenndaten der Bitumenemulsionen BE1 bis BE3.

Ergänzend hierzu zeigt Bild 5 Bitumenemulsionstropfen unter einem optischen Mikroskop. Dabei wurde festgestellt, dass etwa 80 Vol.-% der Bitumentropfen einen Durchmesser von 1,5 bis 8 μm haben.

Die in Tabelle 12 aufgeführten Untersuchungsergebnisse dokumentieren, dass alle drei Bitumenemulsionen mit Ausnahme der Bitumenhärte eine vergleichbare Zusammensetzung aufweisen. Geringe Unterschiede im Bindemittel-(Wasser-)Gehalt sind als unbedeutend einzustufen. Die Bestimmungen der Nadelpenetrationen und der Erweichungspunkte Ring und Kugel zeigen ein für die jeweilige Sorte eher hartes Bindemittel. Die Nadelpenetration des Bitumens in BE3 unterschreitet den Mindestwert sogar um etwa 30 1/10 mm.

Grundsätzlich zeigt sich, dass die Bindemittleigenschaften der Bitumenemulsionen BE1 und BE2 keine großen Unterschiede aufweisen, sodass mit Auswahl der Emulsionen BE1 und BE3 eine hinreichend große Spannweite der Bitumenhärte abgedeckt ist und zudem typische, in der Praxis übliche Varianten vorliegen würden.

Zur Beschreibung der rheologischen Merkmale wurden die rückgewonnenen Bindemittel vor und nach der RTFOT-Alterung mittels Dynamischen Scherrheometer (DSR) und mittels Biegebalkenrheometer (BBR) untersucht. Tabelle 13 bis Tabelle 15 und Bild

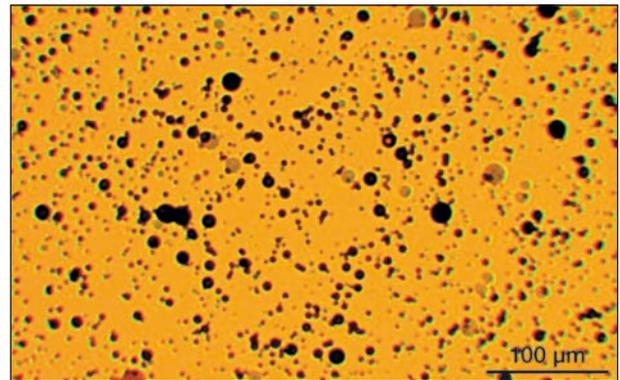


Bild 5: Fotoaufnahme einer Bitumenemulsion unter der Vergrößerung eines optischen Mikroskops [AS Asphaltstraßensanierung Spelle GmbH]

		BE1	BE2	BE3
Bitumenart	—	70/100	50/70	160/220
Bestimmung an der Bitumenemulsion				
Äußere Beschaffenheit (DIN EN 1425)	—	braun, flüssig, homogen		
Brechverhalten, B_V Sikaisol (DIN EN 13075-1)	—	127	121	129
Mischstabilität mit Zement, S_c (DIN EN 12848)	g	0,9	0,9	0,9
Bindemittelgehalt (DIN EN 1428)	%	59,0	61,0	59,0
Siebrückstand 0,5 mm Sieb, $R_{0,500}$ (DIN EN 1429)	%	0,2	0,2	0,1
Bestimmungen am rückgewonnenen Bindemittel (DIN EN 13074-1 und -2)				
Nadelpenetration, P_1 (DIN EN 1426)	10 ⁻¹ mm	74,8	54,3	130,7
Erweichungspunkt RuK, T_1 (DIN EN 1427)	°C	47,9	50,7	41,5
nach RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)				
Masseänderung (DIN EN 12607-1)	%	-0,01	0,00	-0,21
Nadelpenetration, P_2 (DIN EN 1426)	10 ⁻¹ mm	46,1	38,9	89,4
Erweichungspunkt RuK, T_2 (DIN EN 1427)	°C	52,9	53,7	45,0
Prozentualer Anteil der verbliebenen Penetration (DIN EN 12607-1)	%	61,6	71,7	68,4
Änderung des Erweichungspunktes RuK (DIN EN 12607-1)	°C	5,0	3,0	3,5

Tab. 12: Eigenschaften der Bitumenemulsionen BE1, BE 2 und BE3

6 bis Bild 11 enthalten die Ergebnisse dieser Prüfungen im Temperaturbereich von 30 bis 150 °C.

Temperatur [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
	vor RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)		nach RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)	
30	191.000	71,9	332.000	65,4
40	38.300	77,1	71.900	71,2
50	8.530	81,4	16.500	76,5
60	2.210	84,5	4.120	81,3
70	651	86,5	1.170	84,9
80	219	88,0	375	87,4
90	85,1	88,9	1367	88,9
100	37,5	89,7	56,7	89,9
110	18,3	89,7	25,9	90,0
120	9,73	90,0	13,1	90,0
130	5,73	90,0	7,19	90,0
140	3,59	90,0	4,27	90,0
150	2,37	90,0	2,67	90,0

Tab. 13: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE1, bestimmt mittels DSR (DIN EN 14770)

Temperatur [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
	vor RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)		nach RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)	
30	383.000	72,0	586.000	68,0
40	68.400	78,1	109.000	75,0
50	12.800	82,5	20.510	80,4
60	2.880	85,6	4.500	84,5
70	786	87,4	1.200	87,1
80	254	88,4	374	88,8
90	93,3	89,4	133	89,8
100	40,6	89,7	54,6	90,0
110	19,8	90,0	25,2	90,0
120	10,8	90,0	12,9	90,0
130	6,75	90,0	7,15	90,0
140	4,66	90,0	4,31	90,0
150	3,36	90,0	2,75	90,0

Tab. 14: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE2, bestimmt mittels DSR (DIN EN 14770)

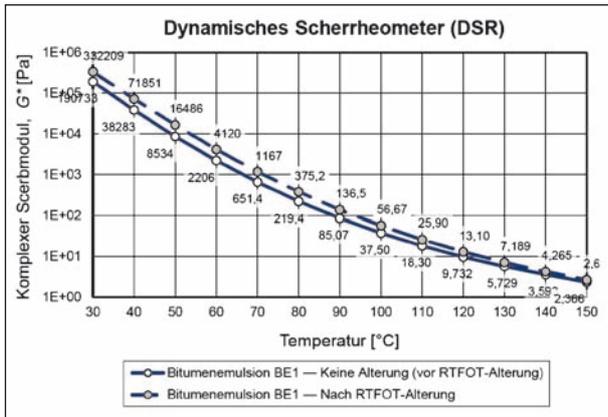


Bild 6: Komplexer Schermodul des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE1 vor und nach RTFOT-Alterung

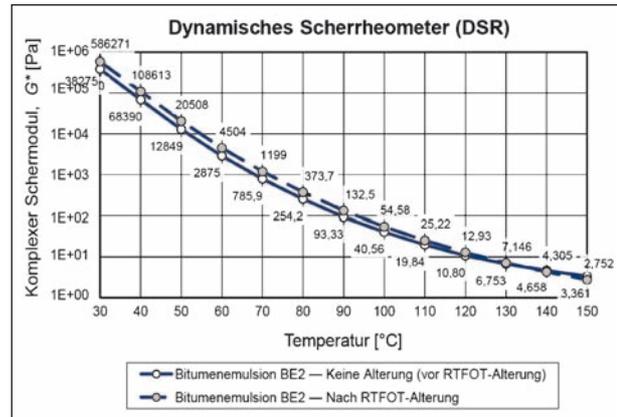


Bild 8: Komplexer Schermodul des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE2 vor und nach RTFOT-Alterung

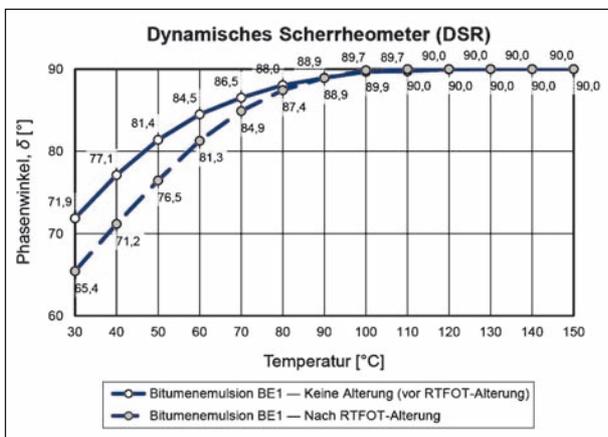


Bild 7: Phasenwinkel des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE1 vor und nach RTFOT-Alterung

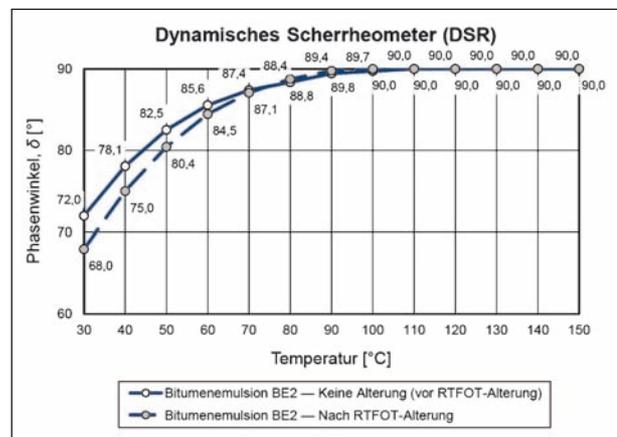


Bild 9: Phasenwinkel des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE2 vor und nach RTFOT-Alterung

Temperatur [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
	vor RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)		nach RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)	
30	63.600	76,8	111.000	72,2
40	12.900	81,2	23.400	77,2
50	2.990	84,5	5.370	81,7
60	808	86,8	1.390	85,2
70	267	87,6	415	87,7
80	98,9	89,0	141	89,0
90	41,3	89,6	56,3	89,5
100	19,2	89,9	25,4	89,5
110	9,72	90,0	12,8	90,0
120	5,43	90,0	7,04	90,0
130	3,29	90,0	4,11	90,0
140	2,12	90,0	2,52	90,0
150	1,43	90,0	1,61	90,0

Tab. 15: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE3, bestimmt mittels DSR (DIN EN 14770)

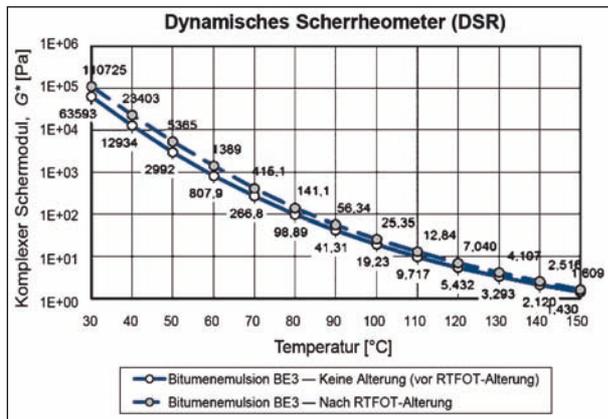


Bild 10: Komplexer Schermodul des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE3 vor und nach RTFOT-Alterung

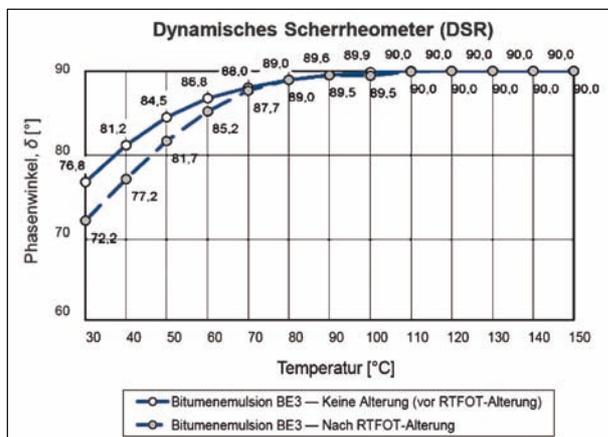


Bild 11: Phasenwinkel des rückgewonnenen Bindemittels aus der Bitumenemulsion BE3 vor und nach RTFOT-Alterung

		BE1-B	BE2-B	BE3-B
vor RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)				
Prüftemperatur	°C	-16		
Biegekriechsteifigkeit, S _m (60 s)	MPa	126	225	60,4
m-Wert (60 s)	—	0,417	0,349	0,496
nach RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)				
Prüftemperatur	°C	-16		
Biegekriechsteifigkeit, S _m (60 s)	MPa	147	303	72,0
m-Wert (60 s)	—	0,387	0,314	0,464

Tab. 16: Biegekriechsteifigkeit des rückgewonnenen Bindemittels der Bitumenemulsionen BE1 bis BE3

Ebenso wie bei den klassischen Prüfverfahren zeigen die Bitumenemulsionen BE1 und BE2 vor der Alterung relativ geringe Unterschiede im komplexen Schubmodul und im Phasenwinkel. Auffällig ist jedoch, dass das tendenziell härtere BE2 einen geringfügig höheren Phasenwinkel aufweist. Das deutlich weichere BE3 zeigt entsprechend niedrige komplexe Schermoduln und höhere Phasenwinkel.

Die Alterung der Bitumenemulsionen lässt insgesamt betrachtet den komplexen Schermodul ansteigen und reduziert den Phasenwinkel. Dieses wirkt sich bei der härtesten Bitumenemulsion BE 2 am schwächsten aus. Die rheologischen Eigenschaften von BE 1 nach der Alterung verändern sich dem entgegengesetzt. Diese Veränderung der Eigenschaften wurde jedoch eher bei der weicheren Bitumenemulsion BE 3 erwartet.

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der mittels Biegebalkenrheometer (BBR) ermittelten Biegekriechsteifigkeiten und der m-Werte des rückgewonnenen Bindemittels der Bitumenemulsionen bei einer Prüftemperatur von -16 °C.

Erwartungsgemäß hat die weiche Bitumenemulsion BE3 die niedrigsten Biegekriechsteifigkeiten und die höchsten m-Werte innerhalb der drei geprüften Emulsionen. Die Alterung bewirkt einen Anstieg der Steifigkeit um im Mittel 20 %.

3.2 Referenz-Straßenbaubitumen

Als Referenz wurde ein Straßenbaubitumen der Sorte 70/100 ausgewählt. Wie bei den rückgewonnenen Bindemitteln wurden die Nadelpenetration, der Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie der komplexe Schubmodul/Phasenwinkel und die

vor RTFOT-Alterung		
Nadelpenetration, P_1 (DIN EN 1426)	10 ⁻¹ mm	66,3
Erweichungspunkt RuK, T_1 (DIN EN 1427)	°C	47,3
nach RTFOT-Alterung		
Nadelpenetration, P_2 (DIN EN 1426)	10 ⁻¹ mm	53,6
Erweichungspunkt RuK, T_2 (DIN EN 1427)	°C	52,6
Masseänderung (DIN EN 12607-1)	%	0,01
Prozentualer Anteil der verbliebenen Penetration (DIN EN 12607-1)	%	80,8
Änderung des Erweichungspunktes RuK (DIN EN 12607-1)	°C	5,3

Tab. 17: Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft des Straßenbaubitumens 70/100

Temperatur [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
	vor RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)		nach RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)	
30	174.000	72,4	357.000	64,7
40	33.900	77,6	73.600	71,1
50	6.880	82,1	15.500	76,8
60	1.620	85,8	3.590	81,9
70	461	88,0	985	85,6
80	154	89,2	316	88,1
90	62,4	89,5	117	89,4
100	28,3	90,0	49,5	90,0
110	14,3	90,0	23,2	90,0
120	7,85	90,0	12,0	90,0
130	4,57	90,0	6,72	90,0
140	2,85	90,0	4,05	90,0
150	1,85	90,0	2,54	90,0

Tab. 18: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel des Straßenbaubitumens 70/100

Biegekiechsteifigkeit/ m -Wert vor und nach RTFOT-Alterung bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 bis Tabelle 19 und Bild 12 sowie Bild 13 enthalten.

Im Vergleich zur Bitumenemulsion BE1, die auf einem Straßenbaubitumen 70/100 basiert, zeigt das Referenzbitumen tendenziell eine niedrigere Härte und ein geringfügig höheren komplexen Schubmodul. Diese Unterschiede gleichen sich erwartungsgemäß durch die RTFOT-Alterung an.

vor RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)		
Prüftemperatur	°C	-16
Biegekiechsteifigkeit, S_m (60 s)	MPa	168
m -Wert (60 s)	—	0,413
nach RTFOT-Alterung (DIN EN 12607-1)		
Prüftemperatur	°C	-16
Biegekiechsteifigkeit, S_m (60 s)	MPa	198
m -Wert (60 s)	—	0,344

Tab. 19: Biegekiechsteifigkeit des Straßenbaubitumens 70/100 (DIN EN 14771)

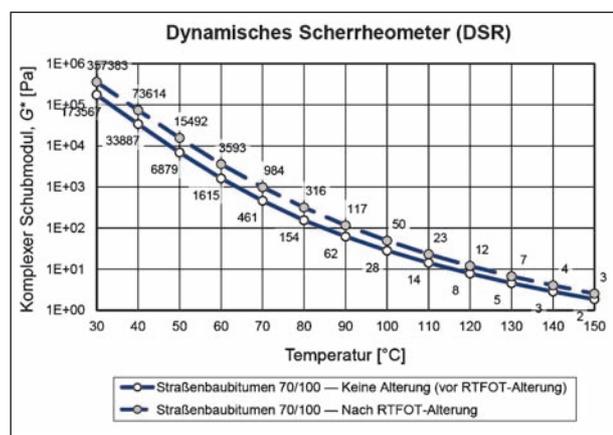


Bild 12: Komplexer Schermodul des Referenzstraßenbaubitumens 70/100 vor und nach RTFOT-Alterung

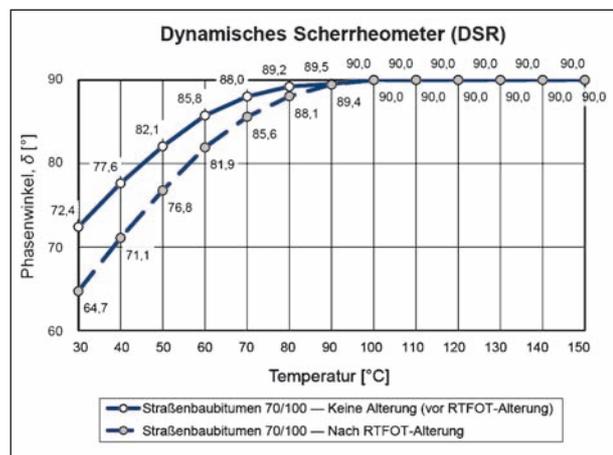


Bild 13: Phasenwinkel des Referenzstraßenbaubitumens 70/100 vor und nach RTFOT-Alterung

3.3 Zement

Als hydraulisches Bindemittel wurde ein Portlandzement CEM I 42,5 N gemäß DIN EN 197-1 ausgewählt. Tabelle 20 enthält die baustofftechnologischen Kennwerte des verwendeten Zementes. Aus den allgemein bekannten stofflichen Veränderungen durch die Hydratation des Zementes wurde die Roh-

Rohdichte des Zements (DIN EN 1097-7)	g/cm ³	3,100
Rohdichte des Zementgesteins	g/cm ³	2,100 ¹⁾
1) nach allgemeinem Stand der Kenntnis		

Tab. 20: Baustofftechnologische Kennwerte des verwendeten Zementes CEM I 42,5 N

dichte des Zementsteines abgeleitet. Für die Berechnung der volumetrischen Zusammensetzung der Kaltasphaltgemische wurde eine vollständige Zementhydratation angenommen. Dabei wurde unterstellt, dass die Menge an physikalisch gebundenem Wasser etwa 26 M.-% und die an chemisch gebundenem Wasser etwa 14 M.-% beträgt. Insgesamt resultiert daraus, dass etwa 40 M.-% des zum Asphaltmischgut zugegebenen Wassers theoretisch im Asphaltmischgut gebunden sind.

3.4 Asphaltgranulat

3.4.1 Auswahl geeigneter Asphaltgranulate

Ein Ziel des Forschungsprojektes ist die Ermittlung des Einflusses der Asphaltgranulatmenge und -qualität auf die dimensionierungsrelevanten Eigenschaften einer emulsionsgebundenen Asphalttragschicht. Dabei wird unter anderem in der Härte des Bindemittels im Asphaltgranulat eine wichtige Einflussgröße vermutet. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Asphaltgranulate mit möglichst großem Unterschied in der Bindemittelhärte ausgewählt. Darüber hinaus wurde eine Anbindung an die Praxismaßnahme BAB 30 durch eine Probenahme des Asphaltgranulates der BAB 30 geschaffen (Referenz).

3.4.2 Allgemeine Eigenschaften der Asphaltgranulate

Zur Beschreibung der Eigenschaften der Asphaltgranulate wurden zunächst die Stückgrößenverteilung, der Bindemittelgehalt und die Rohdichte ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen an dem Referenz-Asphaltgranulat sind in den Tabelle 21 bis Tabelle 24 sowie im Bild 14 aufgeführt. Die Prüfergebnisse zeigen, dass das Referenz-Asphaltgranulat AG0 eine maximale Stückgröße von 31,5 mm hat. Der Verlauf der Sieblinie ist stetig, sodass eine Trennung in die Kornklassen nicht notwendig wurde. Auffallend ist der sehr geringe Füllergehalt (< 0,063 mm).

Siebgröße [mm]	Summe des Siebdurchgangs [%] Referenz-Asphaltgranulat (AG0)
0	0,0
0,063	0,8
0,125	1,9
0,25	6,3
0,5	14,9
1	24,2
2	34,0
5,6	57,5
8	67,5
11,2	77,1
16	86,3
22,4	94,1
31,5	98,5
45	100,0

Tab. 21: Stückgrößenverteilung des Referenz-Asphaltgranulates aus der BAB 30 (AG0) (DIN EN 933-1, TP Gestein-StB Teil 4.1.2)

Eigenschaft	Ergebnis Referenz-Asphaltgranulat (AG0)
Kennzahl für die Maximale Stückgröße, <i>U</i>	45
Maximaler Gehalt an Feinanteilen	UF ₃
Überkornanteil bei Verwendung in Schichten ohne Bindemittel	OC ₉₀

Tab. 22: Eigenschaften des Referenz-Asphaltgranulates aus der BAB 30 (AG0) (TL AG-StB)

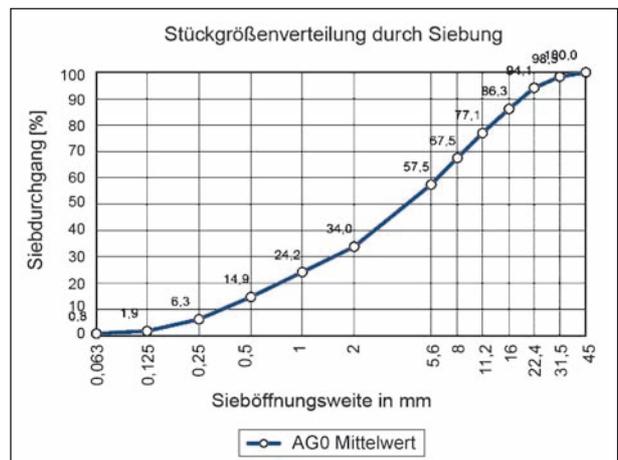


Bild 14: Stückgrößenverteilung des Referenz-Asphaltgranulates aus der BAB 30 (AG0)

Eigenschaft	Referenz-Asphaltgranulat (AG0)
Löslicher Bindemittelgehalt, B_{SD} [%]	3,77
Unlöslicher Bindemittelgehalt, B_{unl} [%]	0,26
Bindemittelgehalt, B [%]	4,04

Tab. 23: Bindemittelgehalt des Referenz-Asphaltgranulates aus der BAB 30 (AG0)

Eigenschaft	Referenz-Asphaltgranulat (AG0)
Rohdichte [g/cm ³]	2,543

Tab. 24: Rohdichte des Referenz-Asphaltgranulates aus der BAB 30 (AG0)

Siebgröße [mm]	Summe der Siebdurchgänge [%]				
	AG3 gesamt	AG3 0/2 mm	AG3 2/8 mm	AG3 8/16 mm	AG3 16/32 mm
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,063	7,2	24,3	0,0	0,0	0,0
0,125	10,5	35,4	0,0	0,0	0,0
0,25	17,8	59,8	0,0	0,0	0,0
0,5	22,7	76,3	0,0	0,0	0,0
1	25,8	86,8	0,0	0,0	0,0
2	29,7	100,0	0,0	0,0	0,0
5,6	46,6	100,0	67,7	0,0	0,0
8	54,7	100,0	100,0	0,0	0,0
11,2	65,1	100,0	100,0	42,8	0,0
16	79,0	100,0	100,0	100,0	0,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 25: Stückgrößenverteilung des harten Asphaltgranulates (DIN EN 933-1, TP Gestein-StB Teil 4.1.2)

Die Eigenschaften des Asphaltgranulates mit hoher Bindemittelverhärtung (AG3) sind in Tabelle 25 bis Tabelle 28 sowie Bild 15 bis Bild 18 aufgeführt. Zur möglichst exakten Zusammensetzung der Sieblinie der Kaltasphaltgemische wurden die Asphaltgranulate in mehrere Kornklassen getrennt. Das Asphaltgranulat AG3 wurde in vier Kornklassen getrennt (0/2, 2/8, 8/16, 16/32 mm). In Ergänzung zu den materialtechnischen Prüfergebnissen zeigt Bild 16 Fotos des verwendeten Asphaltgranulates AG3 getrennt in vier Kornklassen.

Eigenschaft	Ergebnis AG3 gesamt
Kennzahl für die Maximale Stückgröße, U	22
Maximaler Gehalt an Feinanteilen	UF_9
Überkornanteil bei Verwendung in Schichten ohne Bindemittel	OC_{90}

Tab. 26: Eigenschaften des harten Asphaltgranulates abhängig von der Stückgrößenverteilung (TL AG-StB)

	AG3 gesamt	AG3 0/2 mm	AG3 2/8 mm	AG3 8/16 mm	AG3 16/32 mm
Löslicher Bindemittelgehalt, B_{SD} [%]	3,77	6,63	7,28	3,10	3,92
Unlöslicher Bindemittelgehalt, B_{unl} [%]	0,23	0,34	0,22	0,19	0,12
Bindemittelgehalt, B [%]	4,00	6,97	7,50	3,29	4,03

Tab. 27: Bindemittelgehalt des harten Asphaltgranulates (DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

Eigenschaft	Ergebnis					
	AG3 gesamt	AG3-G gesamt	AG3 0/2 mm	AG3 2/8 mm	AG3 8/16 mm	AG3 16/32 mm
Rohdichte [g/cm ³]	2,597	2,796	2,493	2,602	2,677	2,626

Tab. 28: Rohdichte des harten Asphaltgranulates und der vier getrennten Kornklassen (DIN EN 1097-6)

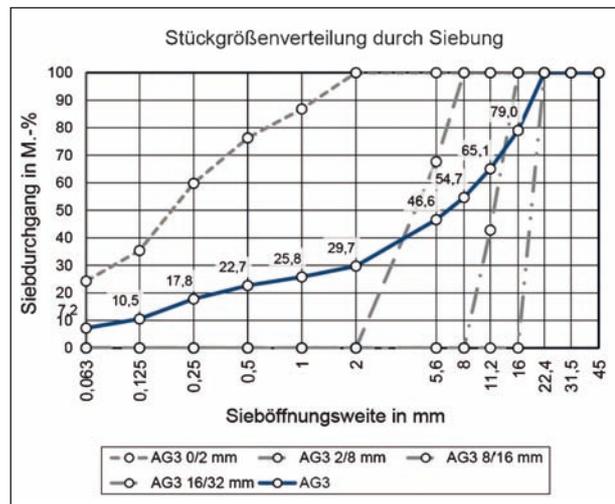


Bild 15: Stückgrößenverteilung des harten Asphaltgranulates (AG3) und der vier getrennten Kornklassen

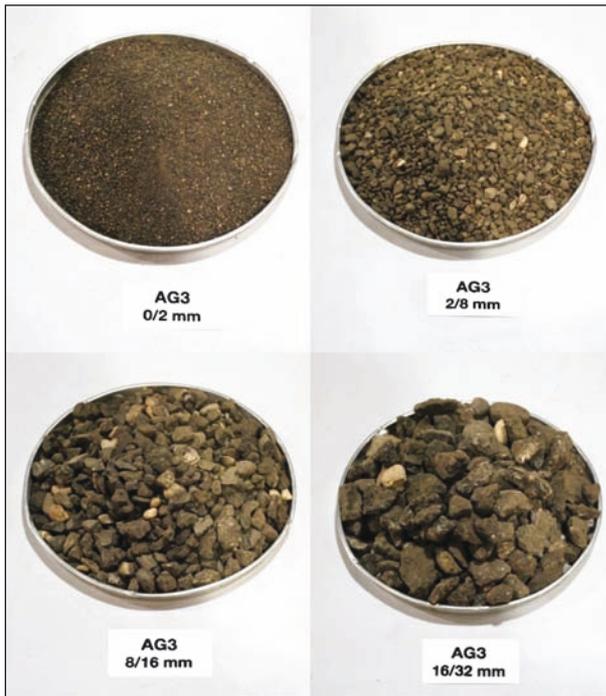


Bild 16: Fotos der Proben des verwendeten Asphaltgranulats AG3 getrennt in die vier Kornklassen

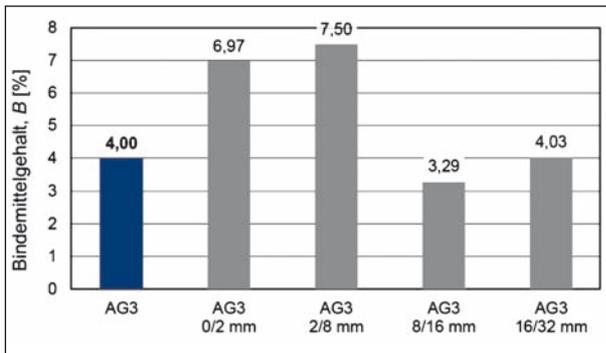


Bild 17: Bindemittelgehalt des verwendeten Asphaltgranulats AG3 insgesamt und der vier getrennten Kornklassen

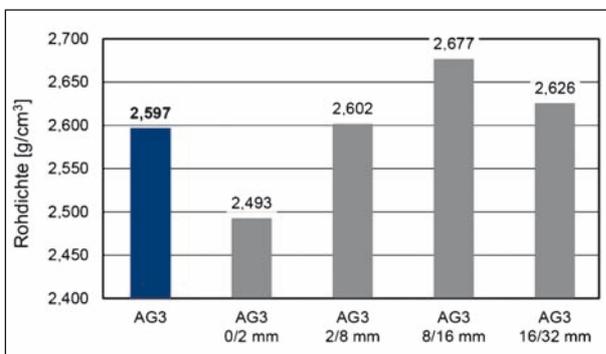


Bild 18: Rohdichte des verwendeten Asphaltgranulats AG3 und der vier getrennten Kornklassen

Wie ersichtlich, beträgt der mittlere Bindemittelgehalt von Asphaltgranulat AG3 4,0 M.-%, jedoch mit einer sehr ungleichmäßigen Verteilung auf die ge-

Siebgröße [mm]	Summe der Siebdurchgänge [%]		
	AG1 gesamt	AG1 0/5 gesamt	AG1 5/22 gesamt
0	0,0	0,0	0,0
0,063	0,3	0,6	0,0
0,125	0,7	1,5	0,0
0,25	1,9	4,5	0,0
0,5	5,7	13,1	0,0
1	11,1	25,7	0,0
2	20,0	46,6	0,0
5,6	43,0	100,0	0,0
8	57,1	100,0	24,8
11,2	71,1	100,0	49,4
16	87,0	100,0	77,5
22,4	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0

Tab. 29: Stückgrößenverteilung des weichen Asphaltgranulates (DIN EN 933-1, TP Gestein-StB Teil 4.1.2)

Eigenschaft	Ergebnis AG1 gesamt
Kennzahl für die Maximale Stückgröße, <i>U</i>	22
Maximaler Gehalt an Feinanteilen	<i>UF</i> ₃
Überkornanteil bei Verwendung in Schichten ohne Bindemittel	<i>OC</i> ₉₀

Tab. 30: Eigenschaften des weichen Asphaltgranulates abhängig von der Stückgrößenverteilung (TL AG-StB)

trennt untersuchten Kornklassen. Somit ist erwartungsgemäß der Bindemittelgehalt in den feineren Kornklassen zum Teil deutlich höher.

Dementsprechend sind die Rohdichten der feineren Kornklassen am niedrigsten.

Die Eigenschaften des Asphaltgranulates mit geringer Bindemittelverhärtung (AG1) sind in Tabelle 29 bis Tabelle 32 und in Bild 19 bis Bild 21 dargestellt. Für das Asphaltgranulat AG1 war aufgrund der stetigeren Stückgrößenverteilung nur eine Aufteilung in zwei Kornklassen (0/5 und 5/22 mm) notwendig. Im Gegensatz zu Asphaltgranulat AG3 ist der Füllergehalt in AG1 deutlich niedriger. Nach der Extraktion des gesamten Asphaltgranulates ergab sich ein

Eigenschaft	Ergebnis		
	AG1 gesamt	AG1 0/5 mm	AG1 5/22 mm
Löslicher Bindemittelgehalt, B_{SD} [%]	4,44	5,89	3,51
Unlöslicher Bindemittelgehalt, B_{unl} [%]	0,24	0,40	0,27
Bindemittelgehalt, B [%]	4,68	6,29	3,78

Tab. 31: Bindemittelgehalt des weichen Asphaltgranulates (DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

Eigenschaft	Ergebnis		
	AG1 gesamt	AG1 0/5 mm	AG1 5/22 mm
Rohdichte [g/cm ³]	2,525	2,523	2,527

Tab. 32: Rohdichte des Asphaltgranulates AG1 und der zwei getrennten Kornklassen (DIN EN 1097-6)

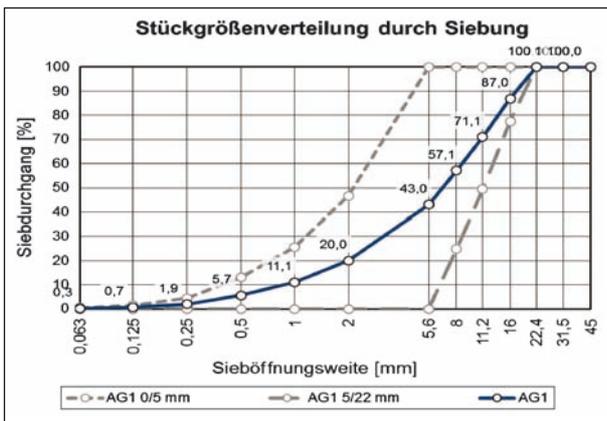


Bild 19: Stückgrößenverteilung des weichen Asphaltgranulates (AG1) und der zwei getrennten Kornklassen

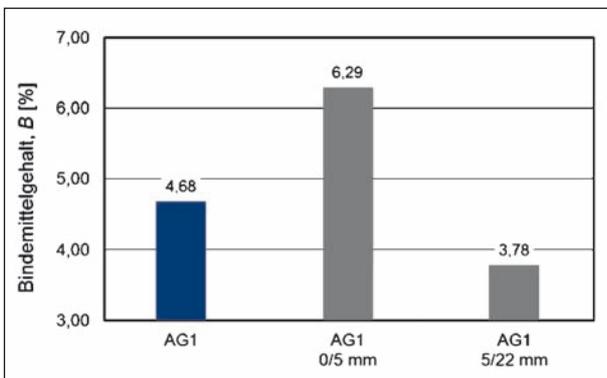


Bild 20: Bindemittelgehalt des weichen Asphaltgranulates (AG1) insgesamt und der zwei getrennten Kornklassen

mittlerer Bindemittelgehalt von 4,7 M.-%. Etwas weniger stark ausgeprägt, aber immer noch deutlich, ist der Unterschied des Bindemittelgehaltes in Ab-

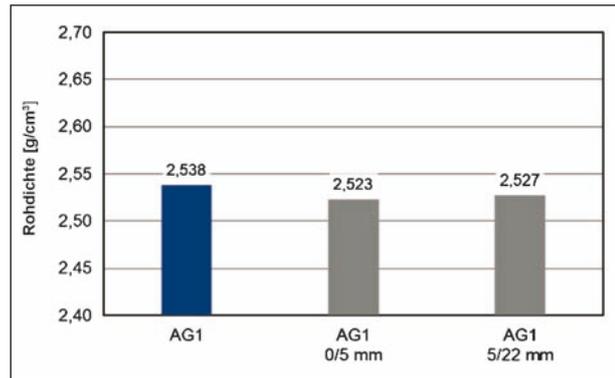


Bild 21: Rohdichte des Asphaltgranulates AG1 und der zwei getrennten Kornklassen

hängigkeit von der Stückgröße. Allerdings hat dies nicht wie bei AG3 auch eine nennenswerte Auswirkung auf die Rohdichte der Asphaltgranulate.

3.4.3 Gesteinskörnungen in den Asphaltgranulaten

Zur Ergänzung der allgemeinen Eigenschaften der Asphaltgranulate wurden zudem granulometrische Untersuchungen an den extrahierten Gesteinskörnungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung durch Siebung und der Kornformkennzahl des Referenz-Asphaltgranulates AG0 sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 sowie im Bild 22 aufgeführt.

Die Korngrößenverteilung des aus dem harten Asphaltgranulat (AG3) extrahierten Gesteinskörnungsgemisches sowie der vier separaten Kornklassen sind in Tabelle 35 und Tabelle 36 sowie in Bild 23 dargestellt. Die entsprechenden Angaben des weichen Asphaltgranulates (AG1) sind in Tabelle 37 und Tabelle 38 sowie in Bild 24 aufgeführt.

Erwartungsgemäß weist die Korngrößenverteilung der rückgewonnenen Gesteinskörnung im Vergleich zur Stückgrößenverteilung deutlich höhere Feinanteile auf. Im Asphaltgranulat sind die feinen Gesteinskörnungen durch das Bitumen verklebt und finden sich dadurch bei der Stückgrößenverteilung in den groben Kornklassen wieder.

Die Korngrößenverteilung der rückgewonnenen Gesteinskörnungen des AG1 und AG3 unterscheiden sich nur geringfügig, hingegen ist die des AG0 deutlich feiner.

Auch bei der Kornform zeigen die beiden erstgenannten Granulate niedrigere Kennzahlen als das AG0. Bis zur Kornklasse 16/22 mm ist lediglich ein

Siebgröße [mm]	Summe der Siebdurchgänge nach Extraktion Gesteinskörnung aus dem Referenz-Asphaltgranulat (AG0-G) [%]
0	0,0
0,063	8,7
0,125	11,1
0,25	33,8
0,5	46,5
1	54,9
2	63,1
5,6	73,2
8	78,5
11,2	85,5
16	89,9
22,4	91,9
31,5	100,0
45	100,0

Tab. 33: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung im Referenz-Asphaltgranulat AG0 (DIN EN 12697-2, TP Asphalt-StB Teil 2, Rückgewinnung nach DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

Siebgröße [mm]	Summe der Siebdurchgänge nach Extraktion [%]				
	AG3-G gesamt	AG3-G 0/2 mm	AG3-G 2/8 mm	AG3-G 8/16 mm	AG3-G 16/32 mm
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,063	9,5	18,2	9,0	6,3	7,7
0,125	11,5	23,9	10,7	7,6	9,2
0,25	20,2	34,7	13,6	9,5	11,9
0,5	27,7	58,2	18,6	13,4	17,0
1	33,7	83,8	23,8	17,3	22,6
2	40,1	99,9	31,7	20,4	27,3
5,6	57,0	100,0	82,4	26,8	37,9
8	67,1	100,0	100,0	37,7	45,9
11,2	79,2	100,0	100,0	72,6	59,1
16	100,0	100,0	100,0	100,0	77,5
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	91,2
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 35: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen im Asphaltgranulat AG3 (DIN EN 12697-2, TP Asphalt-StB Teil 2, Rückgewinnung nach DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

Kornklasse d_i/D_i mit $D_i \leq 2 d_i$ [mm]	Kornformkennzahl, S_i [%] (DIN EN 933-4) AG0-G
5/8	5
8/11	6
11/16	6
16/22	10
22/32	30

Tab. 34: Kornform der groben Gesteinskörnung, extrahiert aus dem Referenz-Asphaltgranulat (AG0-G) (Rückgewinnung nach DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

Kornklasse d_i/D_i mit $D_i \leq 2 d_i$ [mm]	Kornformkennzahl, S_i [%] (DIN EN 933-4) AG3-G
5/8	7
8/11	7
11/16	7
16/22	9
22/32	13

Tab. 36: Kornform der groben Gesteinskörnung, extrahiert aus dem harten Asphaltgranulat (AG3-G) (Rückgewinnung nach DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

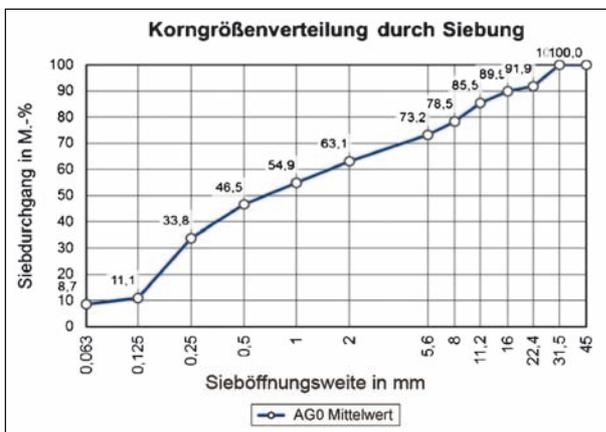


Bild 22: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung im Referenz-Asphaltgranulat AG0 und in den vier getrennten Kornklassen

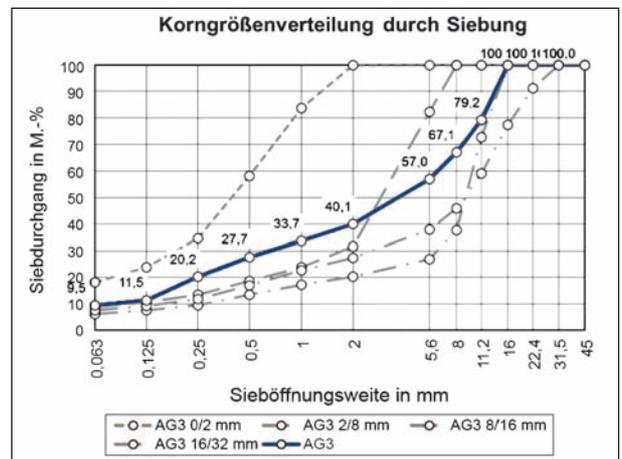


Bild 23: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen im Asphaltgranulat AG3 und in den vier getrennten Kornklassen

Siebgröße [mm]	Summe der Siebdurchgänge nach Extraktion [%]		
	AG1-G gesamt	AG1-G 0/5 mm	AG1-G 5/22 mm
0	0,0	0,0	0,0
0,063	22,4	28,5	17,9
0,125	24,1	30,9	19,0
0,25	28,1	37,0	21,5
0,5	34,3	46,8	25,1
1	39,7	55,8	27,9
2	47,6	69,8	31,4
5,6	66,1	100,0	41,3
8	75,3	100,0	57,2
11,2	86,4	100,0	76,4
16	96,2	100,0	93,4
22,4	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0

Tab. 37: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen im Asphaltgranulat AG1 (DIN EN 12697-2, TP Asphalt-StB Teil 2, Rückgewinnung nach DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

Kornklasse d_i/D_i mit $D_i \leq 2 d_i$ [mm]	Kornformkennzahl, S_f [%] (DIN EN 933-4)
	AG1-G
5/8	3
8/11	4
11/16	4
16/22	5
22/32	8

Tab. 38: Kornform der groben Gesteinskörnung, extrahiert aus dem weichen Asphaltgranulat (AG1-G) (Rückgewinnung nach DIN EN 12697-1, TP Asphalt-StB Teil 1)

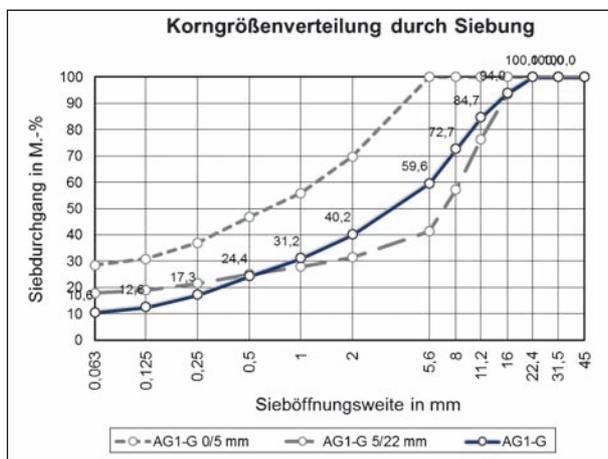


Bild 24: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen im Asphaltgranulat AG1 und in den zwei getrennten Kornklassen

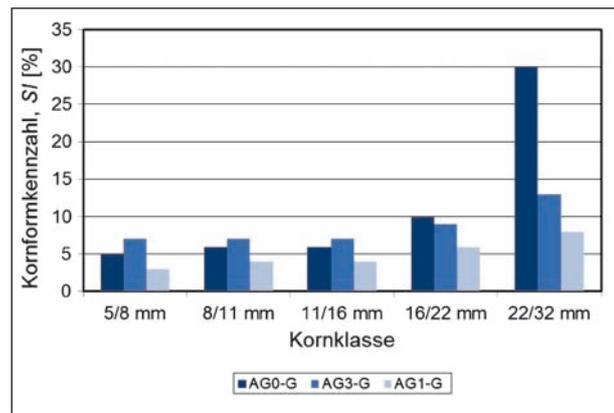


Bild 25: Vergleich der Kornformkennzahlen der rückgewonnenen Gesteinskörnungen aus den Asphaltgranulaten

Anteil von weniger als 10 % ungünstig geformter Körner zu verzeichnen (Bild 27).

Insgesamt könnten daraus möglicherweise positive Einflüsse auf das herzustellende Asphaltgranulat resultieren.

3.4.4 Bindemittel in den Asphaltgranulaten

Nach der Extraktion wurden die rheologischen Eigenschaften der Bindemittel in den Asphaltgranulaten untersucht. Zunächst wurden die Nadelpenetration und der Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt, diese Ergebnisse sind in Tabelle 39 enthalten. Die Unterschiede zwischen den Asphaltgranulaten sind deutlich anhand der klassischen Kennwerte erkennbar.

Im Weiteren wurden die rheologischen Eigenschaften bestimmt. Die Ergebnisse der komplexen Schermoduln und der Phasenwinkeln zeigen die Tabelle 40 und Tabelle 41 sowie Bild 26 bis Bild 29.

Wie bei den klassischen Bindemittelprüfungen weisen die komplexen Schermoduln sowie die Phasenwinkel des Bindemittels aus dem harten Asphaltgranulat (AG3-B) sehr deutliche Unterschiede zu den zwei anderen rückgewonnenen Bindemitteln auf. Dieser Kurvenverlauf des komplexen Schermoduls ist annähernd linear, was möglicherweise auf ein modifiziertes Ausgangsbindemittel hinweisen könnte.

Die mittels Biegebalkenrheometer bestimmten Parameter sind in Tabelle 42 aufgeführt. Aufgrund der hohen Steifigkeit des AG3-B wurde die Prüftemperatur auf -10 °C erhöht. Die hier ermittelten Kennwerte stimmen tendenziell mit den anderen Prüfungsergebnissen überein.

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AG0-B	AG3-B	AG1-B
Nadelpenetration, <i>P</i> (DIN EN 1426)	10 ⁻¹ mm	21,0	6,6	18,6
Erweichungspunkt RuK, <i>T</i> (DIN EN 1427)	°C	59,3	104,8	64,5

Tab. 39: Physikalische Eigenschaften des Bindemittels in drei Asphaltgranulaten (Rückgewinnung nach DIN EN 12697-3, TP Asphalt-StB Teil 3)

Temperatur [°C]	G* [Pa]	δ [°]
	AG0-B	
30	826.188	59,8
40	186.013	66,6
50	42.921	72,9
60	10.547	78,6
70	2.808	83,1
80	831	86,2
90	282	88,2
100	110	89,4
110	48	89,7
120	23	89,6
130	12	89,9
140	7	90,0
150	4	90,0

Tab. 40: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel des Bindemittels im harten Asphaltgranulat (AG3), ermittelt mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR) (DIN EN 14770)

Temperatur [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
	AG3-B		AG1-B	
30	20.770.000	30,5	2.867.625	49,1
40	8.020.667	34,1	664.363	59,4
50	2.901.000	38,8	143.550	66,5
60	1.018.000	43,3	33.083	72,5
70	355.300	47,8	8.464	77,7
80	124.167	52,6	2.352	81,9
90	44.217	57,7	717	85,2
100	15.910	63,3	249	87,7
110	5.729	69,3	99	89,1
120	2.068	74,7	44	90,0
130	752	79,5	21	90,0
140	302	83,4	11	90,0
150	129	86,1	6	90,0

Tab. 41: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel des Bindemittels im harten (AG3) und im weichem Asphaltgranulat (AG1), ermittelt mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR) (DIN EN 14770)

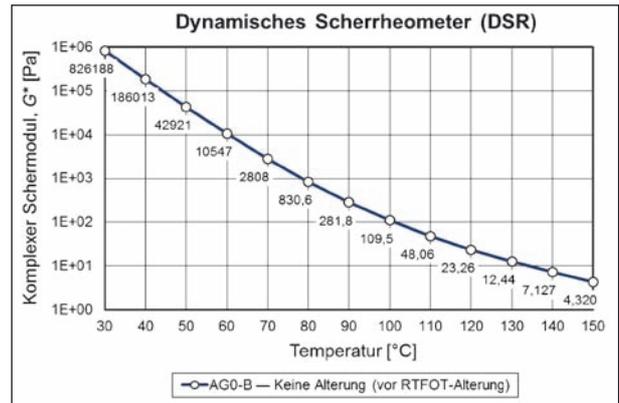


Bild 26: Komplexer Schubmodul des rückgewonnenen Bindemittels aus dem Referenz-Asphaltgranulat (AG0-B)

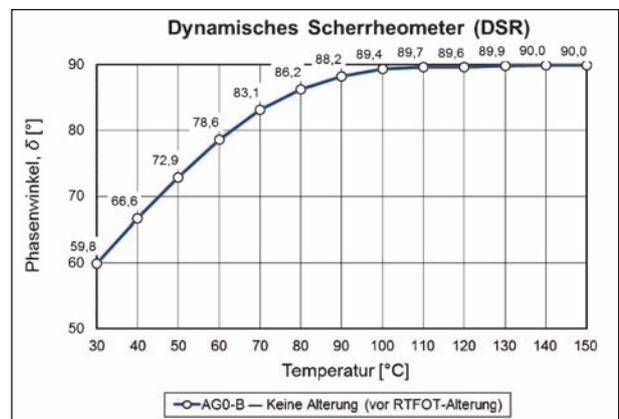


Bild 27: Phasenwinkel des rückgewonnenen Bindemittels aus dem harten Asphaltgranulat (AG3-B)

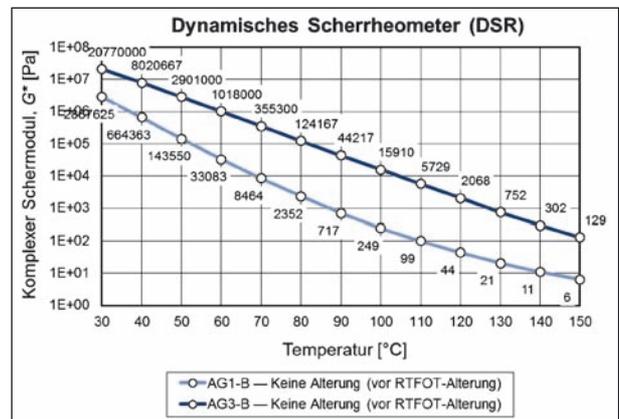


Bild 28: Komplexer Schubmodul der rückgewonnenen Bindemittel aus dem harten (AG3-B) und dem weichen (AG1-B) Asphaltgranulat

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AG0-B	AG3-B	AG1-B
Prüfungstemperatur	°C	-10	-10	-10
Biegekriechsteifigkeit, <i>S_m</i> (60 s)	MPa	144	275	173
<i>m</i> -Wert (60 s)	—	0,360	0,216	0,322

Tab. 42: Biegekriechsteifigkeit der Bindemittel in drei Asphaltgranulaten mittels Biegebalkenrheometer (BBR) (DIN EN 14771)

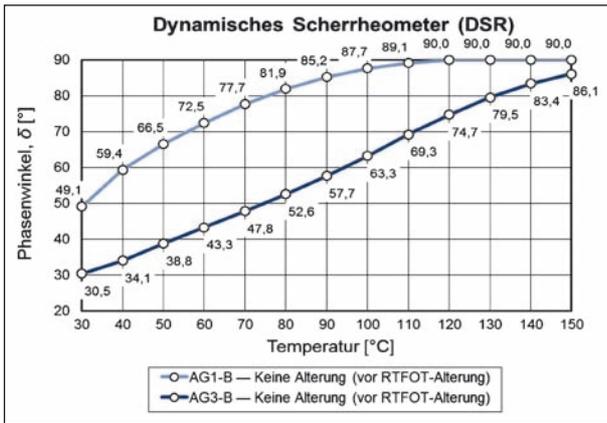


Bild 29: Phasenwinkel der rückgewonnenen Bindemittel aus dem harten (AG3-B) und dem weichen (AG1-B) Asphaltgranulat

3.5 Gesteinskörnungen

An den, als Ergänzungsmaterial vorgesehenen, natürlichen Gesteinskörnungen, wurden Prüfungen zur Bestimmung der geometrischen sowie der physikalischen Eigenschaften durchgeführt. Bild 30 zeigt die verwendeten Gesteinskornklassen. Die Ergebnisse der Prüfungen der geometrischen Eigenschaften sind in Tabelle 43 bis Tabelle 45, und im Bild 31 aufgeführt.

Die Korngrößenverteilung entspricht überwiegend den Anforderungen der TL Gestein-StB. Die Bestimmung der Kornformkennzahlen (Tabelle 44) ergeben, mit Ausnahme der Kornklasse 16/22 mm Diabas, durchschnittlich etwas höhere Kennzahlen im Vergleich zu den Kennzahlen der Asphaltgranulate.



Bild 30: Fotos der Proben der verwendeten Kornklassen der Gesteinskörnungen

Siebgröße [mm]	Summe der Siebdurchgänge [%]							
	Kalkst.-Füller	Quarz-Sand	Diabas					Kalkstein
	F	S 0/2 mm	D 2/5 mm	D 5/8 mm	D 8/11 mm	D 11/16 mm	D 16/22 mm	K 22/32 mm
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,063	82,5	0,2	0,6	0,4	0,3	0,4	0,0	0,0
0,125	100,0	1,6	0,8	0,5	0,4	0,5	0,0	0,0
0,25	100,0	8,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
0,5	100,0	36,1	2,5	0,6	0,6	0,5	0,0	0,0
1	100,0	78,7	2,5	0,6	0,6	0,5	0,0	0,0
2	100,0	96,7	8,1	0,8	0,6	0,5	0,0	0,0
5,6	100,0	100,0	95,9	16,0	1,0	0,7	0,0	0,0
8	100,0	100,0	100,0	92,8	17,0	1,5	0,4	0,0
11,2	100,0	100,0	100,0	100,0	89,3	15,5	0,6	2,7
16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	89,0	10,2	5,4
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	89,8	25,9
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,4
45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 43: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen (DIN EN 933-1, -10, TP Gestein-StB Teil 4.1.2, -3, -4)

Die Rohdichten der einzelnen Kornklassen werden in Tabelle 45 und in Bild 32 aufgeführt. Im Vergleich zum Diabas weisen der Quarzsand und der Kalkstein niedrigere Rohdichten auf.

Zudem wurden die versteifenden Eigenschaften des berücksichtigten Kalksteinfüllers geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 46 zusammengefasst.

Wegen des großen Einflusses der chemischen Eigenschaften der kleineren Kornklassen auf das

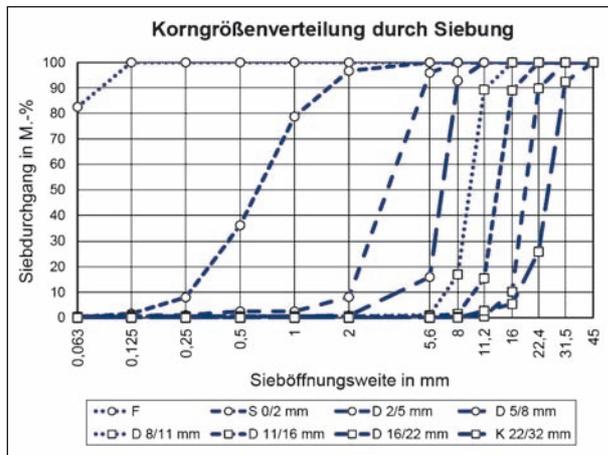


Bild 31: Korngrößenverteilungen der verwendeten Korngruppen der Gesteinskörnung

Eigenschaft	Ergebnis				
	D 5/8 mm	D 8/11 mm	D 11/16 mm	D 16/22 mm	K 22/32 mm
Kornformkennzahl, SI [%] (DIN EN 933-4)	19	14	13	2	17

Tab. 44: Kornform der groben Gesteinskörnungen

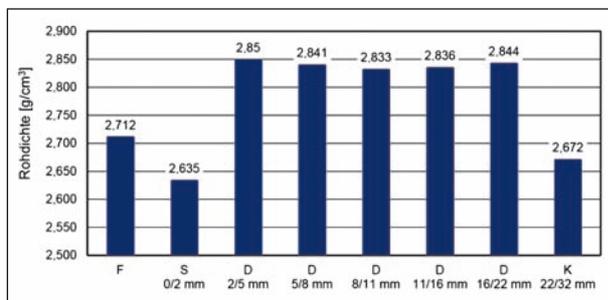


Bild 32: Rohdichte der verwendeten Ergänzungskörnungen

Eigenschaft	Ergebnis							
	F	S 0/2 mm	D 2/5 mm	D 5/8 mm	D 8/11 mm	D 11/16 mm	D 16/22 mm	K 22/32 mm
Rohdichte [g/cm³] (DIN EN 1097-6, -7)	2,712	2,635	2,850	2,841	2,833	2,836	2,844	2,672

Tab. 45: Rohdichte der Gesteinskörnungen

Brechverhalten der Bitumenemulsionen in Abhängigkeit von ihrer mineralogischen Zusammensetzung wurden der Quarzsand und der Kalksteinfüller petrografisch untersucht.

Die mineralogische Zusammensetzung der beiden Materialien sind in Bild 33 und Bild 34 dargestellt in Bild 35 sind die Hauptbestandteile zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Kalksteinfüller etwa 94 % Calcit und Dolomit enthält. Der Quarzsand besteht aus ca. 80 % Quarz und ca. 15 % verschiedene Feldspate. Diese dominierenden Mineralien haben einen primären Einfluss auf die Adhäsion zwischen Gestein und Bindemittel. Darüber hinaus ermöglicht die Kenntnis dieser mineralogischen Zusammensetzung eine Charakterisierung der Bitumenemulsion-Mörtel-Asphaltmischgüter.

Eigenschaft	Ergebnis
Hohlraumgehalt von trocken verdichtetem Füller nach Rigden [%] (DIN EN 1097-4)	36
Erweichungspunkterhöhung „Delta Ring und Kugel“ [°C] (DIN EN 13179-1)	9,5

Tab. 46: Versteifende Eigenschaften des berücksichtigten Kalksteinfüllers

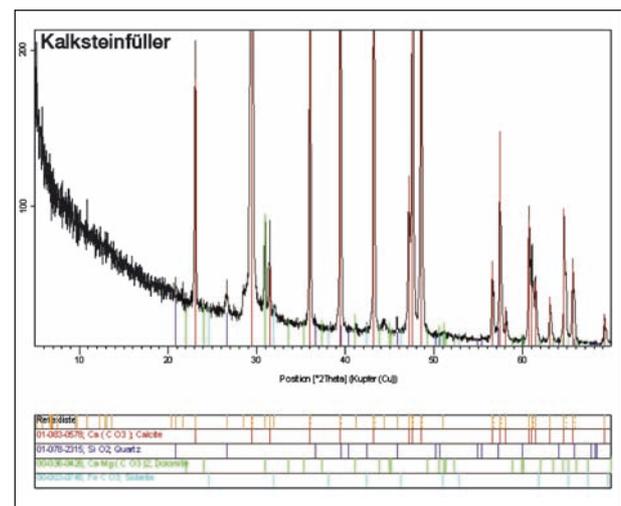


Bild 33: Ausgangsdiagramm der röntgendiffraktometrischen Untersuchung des verwendeten Kalksteinfüllers

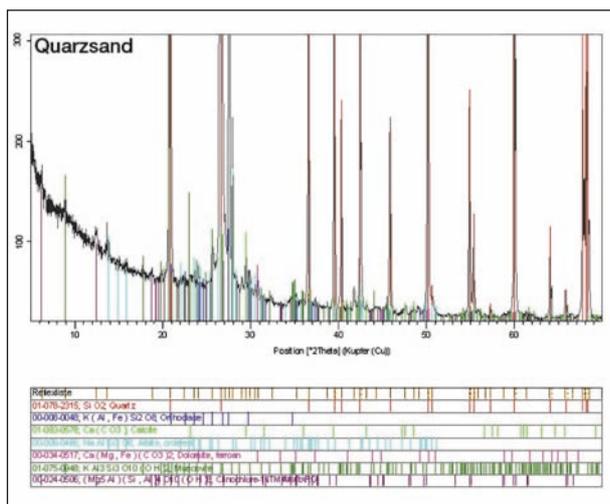


Bild 34: Ausgangsdiagramm der röntgendiffraktometrischen Untersuchung des verwendeten Quarzsands

Mineral	Massenanteil [%]	
	Kalksteinfüller (F)	Natur-Quarzsand (S 0/2 mm)
Calcit CaCO_3	90	2
Dolomit (CaMg) $(\text{CO}_3)_2$	4	—
Muskovit $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	—	3
Kalium-Feldspat KAlSi_3O_8	—	10
Siderit FeCO_3	4	—
Natrium-Feldspat $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	—	5
Quarz SiO_2	2	80

Bild 35: Annäherungswerte der mineralogischen Zusammensetzungen des berücksichtigten Kalksteinfüllers und des Quarzsandes

4 Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische

Aufgrund der in im Kapitel 3 dokumentierten Untersuchungen wurden die Gemische so zusammengesetzt, dass die ausgewählte Korngrößenverteilung (AC 32 T S) erreicht wird. Die angenommenen Massenanteile der Asphaltmischgüter mit weichem und hartem Asphaltgranulat sind in Tabelle 47 bis Tabelle 49 aufgeführt. Die Tabelle 50 und Tabelle 51 und Bild 36 bis Bild 43 enthalten die Stückgrößenverteilungen und die nach Extraktion vorliegenden Korngrößenverteilungen, zusammen mit den Referenzwerten einer Asphalttragschicht mit eine Größtkorn von 32 mm – AC 32 T S (TL Asphalt-StB).

Um eine detaillierte Übersicht über die Verteilung der Massenanteile der Asphaltgranulate sowie der Gesteinskörnungen zu bekommen, wurden die Histogramme für die Asphaltmischgüter AM1 bis AM8 berechnet und gezeichnet. Die resultierenden Histogramme sind in Bild 44 bis Bild 51 dargestellt. In Abhängigkeit vom Größtkorn der Asphaltgranulate zeigen sich Unterschiede in den Granulatan-teilen der größten Fraktionen der resultieren Korn-gemische. Letztendlich gelang es aber, die vorge-sehene Gesamtanteile an Asphaltgranulat, die re-sultierende Sieblinie und eine vergleichsweise gleichmäßige Verteilung des Asphaltgranulates auf die einzelnen Kornbereiche gleichermaßen zu be-achten.

Die resultierenden physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnungsgemische inklusive der er-gänzten natürlichen Gesteinskörnungen sind der Tabelle 52 und dem Bild 52 zu entnehmen. Die durchschnittliche Rohdichte der Gesteinskörn-ungen ist erwartungsgemäß immer größer als die der

Bezeichnung der Komponenten	Einheit	F	S 0/2 mm	D 2/5 mm	D 5/8 mm	D 8/11 mm	D 11/16 mm	D 16/22 mm	K 22/32 mm	AG0
Referenz-Asphaltmischgut AM0										
Massenanteile im Mischgut	%	6,0	11,0	9,0	2,0	2,0	3,0	1,0	18,0	48,0

Tab. 47: Zusammensetzung des Korngemischs der Referenzvariante mit Asphaltgranulat AG0 (AM0.1)

Bezeichnung der Komponente	Einheit	F	Kornklasse 0/5 mm			Kornklasse 5/32 mm					
			S 0/2 mm	D 2/5 mm	AG1 0/5 mm	D 5/8 mm	D 8/11 mm	D 11/16 mm	D 16/22 mm	AG1 5/22 mm	K 22/32 mm
Asphaltmischgut AM1											
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	100,0	45,7	32,6	21,7	8,3	10,4	10,4	12,5	18,8	39,6
Massenanteile im Mischgut	%	6,0	46,0			48,0					
	%	6,0	21,0	15,0	10,0	4,0	5,0	5,0	6,0	9,0	19,0
Asphaltmischgut AM2											
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	100,0	27,7	14,9	57,4	4,3	2,1	2,1	2,1	42,6	46,8
Massenanteile im Mischgut	%	6,0	47,0			47,0					
	%	6,0	13,0	7,0	27,0	2,0	1,0	1,0	1,0	20,0	22,0
Asphaltmischgut AM3											
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	100,0	15,6	0,0	84,4	0,0	0,0	0,0	0,0	82,2	26,7
Massenanteile im Mischgut	%	6,0	45,0								
	%	6,0	7,0	0,0	38,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,0	12,0

Tab. 48: Zusammensetzungen der Korngemische mit weichem Asphaltgranulat (AM1 bis AM3)

Bezeichnung der Komponente	Einheit	F	Kornklasse 0/2 mm		Kornklasse 2/8 mm		
			S 0/2 mm	AG3 0/2 mm	D 2/5 mm	D 5/8 mm	AG3 2/8 mm
Asphaltmischgut AM5							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	100,0	55,0	45,0	65,0	25,0	10,0
Massenanteile im Mischgut	%	4,0	28,0		30,0		
	%	4,0	15,4	12,6	19,5	7,5	3,0
Asphaltmischgut AM6							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	100,0	50,0	50,0	20,0	5,0	75,0
Massenanteile im Mischgut	%	2,0	30,0		30,0		
	%	2,0	15,0	15,0	6,0	1,5	22,5
Asphaltmischgut AM7							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	100,0	10,0	90,0	0,0	0,0	100,0
Massenanteile im Mischgut	%	0,0	32,0		32,0		
	%	0,0	3,2	28,8	0,0	0,0	32,0
Asphaltmischgut AM8							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	100,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
Massenanteile im Mischgut	%	0,0	33,0		30,0		
	%	0,0	0,0	33,0	0,0	0,0	30,0

Tab. 49a: Zusammensetzungen der Korngemische (bis 8 mm) mit hartem Asphaltgranulat (AM5 bis AM8)

Bezeichnung der Komponente	Einheit	Kornklasse 8/16 mm			Kornklasse 16/32 mm		
		D 8/11 mm	D 11/16 mm	AG3 8/16 mm	D 16/22 mm	K 22/32 mm	AG3 16/32 mm
Asphaltemischgut AM5							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	35,0	55,0	10,0	0,0	90,0	10,0
Massenanteile im Mischgut	%	13,0			25,0		
	%	4,6	7,2	1,3	0,0	22,5	2,5
Asphaltemischgut AM6							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	35,0	15,0	50,0	0,0	80,0	20,0
Massenanteile im Mischgut	%	13,0			25,0		
	%	4,6	2,0	6,5	0,0	20,0	5,0
Asphaltemischgut AM7							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	0,0	10,0	90,0	0,0	65,0	35,0
Massenanteile im Mischgut	%	11,0			25,0		
	%	0,0	1,1	9,9	0,0	16,3	8,8
Asphaltemischgut AM8							
Massenanteile innerhalb der Kornklasse	%	0,0	0,0	100,0	30,0	70,0	0,0
Massenanteile im Mischgut	%	17,0			20,0		
	%	0,0	0,0	17,0	6,0	14,0	0,0
KK = Kornklasse; GKG = Gesteinskörnungsgemisch							

Tab. 49b: Zusammensetzungen der Korngemische (> 8 mm) mit hartem Asphaltgranulat (AM5 bis AM8)

Siebgröße [mm]	Summe der Durchgänge [%]									AC 32 T S		
	AM0	AM1	AM2	AM3	AM5	AM6	AM7	AM8	unterer GW	oberer GW	Mittelwert	
	Tatsächlich											
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,063	5,4	5,2	5,2	5,2	6,6	5,4	7,0	8,0	2,0	9,0	5,5	
0,125	7,2	6,7	6,7	6,7	8,9	7,6	10,3	11,7	4,0	14,0	9,0	
0,25	10,0	8,3	8,3	8,3	13,1	12,3	17,5	19,7	(9,3)	(20,5)	(14,9)	
0,5	17,4	15,3	14,4	13,5	19,8	19,0	23,1	25,2	(14,5)	(27,0)	(20,8)	
1	26,5	25,5	23,4	21,3	27,6	27,0	27,5	28,6	(19,8)	(33,5)	(26,6)	
2	33,7	32,3	31,8	30,5	33,2	32,0	31,9	33,0	25,0	40,0	32,5	
5,6	53,6	52,1	53,0	51,0	54,0	53,3	53,7	53,3	(46,3)	(61,3)	(53,8)	
8	60,7	58,9	60,0	60,2	62,3	62,7	64,0	63,0	(53,7)	(68,7)	(61,2)	
11,2	67,8	66,2	66,5	69,6	68,3	69,7	68,8	70,7	(60,7)	(75,7)	(68,2)	
16	75,2	74,1	73,7	80,3	75,4	75,9	75,8	81,4	(68,0)	(83,0)	(75,5)	
22,4	83,7	85,3	83,6	91,1	83,3	85,2	88,0	89,0	75,0	90,0	82,5	
31,5	97,9	98,6	98,3	99,1	98,3	98,5	98,8	98,9	90,0	100,0	95,0	
45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
GW = Grenzwert												

Tab. 50: Tatsächliche Stückgrößenverteilungen und Grenzbereiche einer AC 32 T S (TL Asphalt-StB)

Siebgröße [mm]	Summe der Durchgänge [%]								AC 32 T S		
	AM0-G	AM1-G	AM2-G	AM3-G	AM5-G	AM6-G	AM7-G	AM8-G	unterer GW	oberer GW	Mittelwert
	Tatsächlich										
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,063	9,2	9,6	16,3	22,4	6,4	7,3	9,4	9,8	2,0	9,0	5,5
0,125	11,6	11,3	18,4	24,9	8,1	9,3	11,9	12,4	4,0	14,0	9,0
0,25	23,2	13,5	21,4	28,6	10,7	12,8	16,6	17,1	(9,3)	(20,5)	(14,9)
0,5	32,5	21,0	28,5	35,6	18,6	22,2	26,7	27,1	(14,5)	(27,0)	(20,8)
1	41,3	31,1	37,1	43,1	28,8	34,2	38,0	37,7	(19,8)	(33,5)	(26,6)
2	47,7	37,4	44,3	50,9	35,1	41,8	46,4	45,9	25,0	40,0	32,5
5,6	61,1	55,8	61,3	66,3	55,8	60,2	64,4	62,3	(46,3)	(61,3)	(53,8)
8	65,9	61,8	66,5	72,2	64,0	67,4	71,8	69,4	(53,7)	(68,7)	(61,2)
11,2	71,8	68,7	71,9	79,6	70,2	74,6	77,0	75,8	(60,7)	(75,7)	(68,2)
16	76,9	75,5	76,9	86,2	77,4	79,7	82,5	81,4	(68,0)	(83,0)	(75,5)
22,4	82,7	85,3	83,6	91,1	83,1	84,7	87,2	89,0	75,0	90,0	82,5
31,5	98,6	98,6	98,3	99,1	98,3	98,5	98,8	98,9	90,0	100,0	95,0
45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

GW = Grenzwert

Tab. 51: Berechnete Korngrößenverteilungen und Grenzbereiche einer AC 32 T S (TL Asphalt-StB)

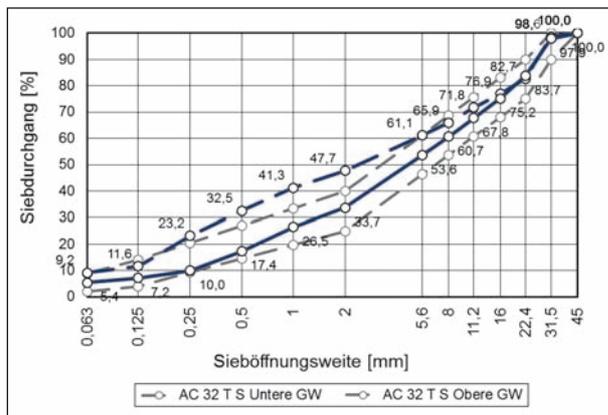


Bild 36: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM0

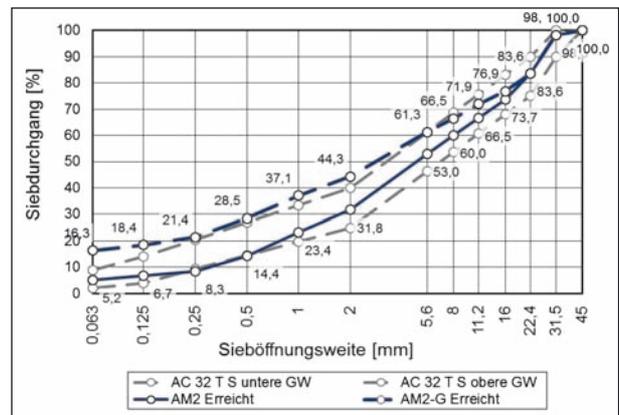


Bild 38: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM2

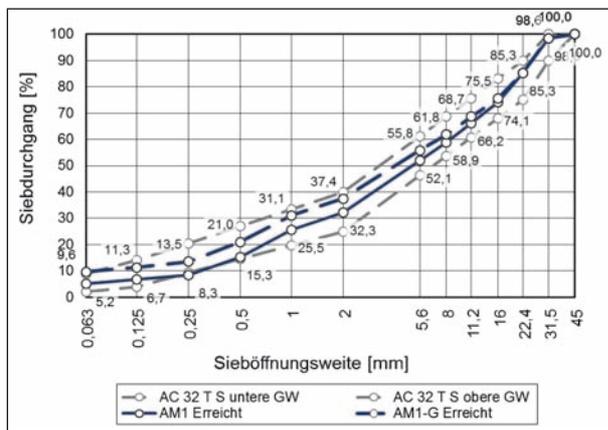


Bild 37: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM1

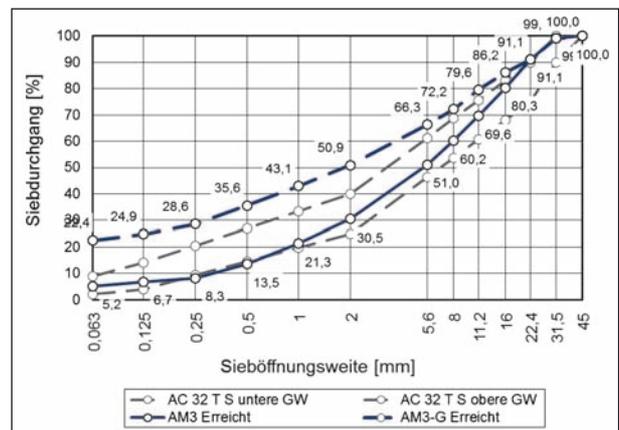


Bild 39: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM3

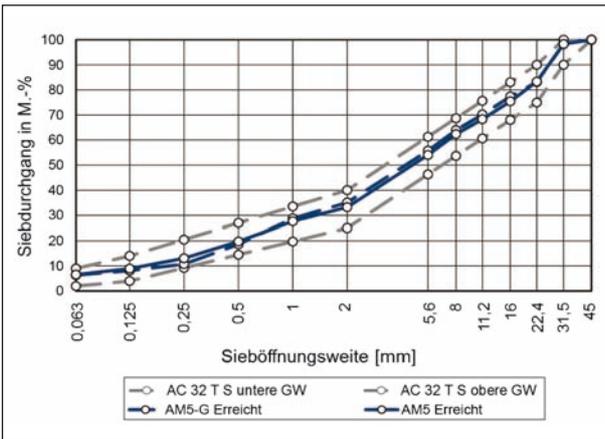


Bild 40: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM5

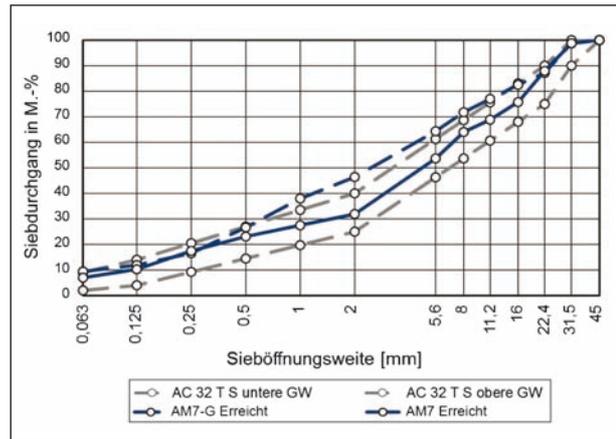


Bild 42: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM7

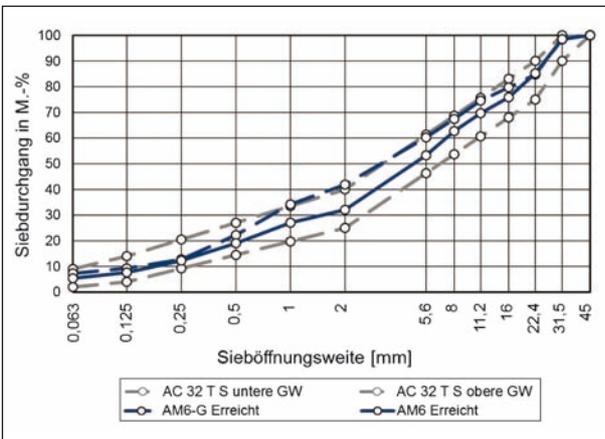


Bild 41: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM6

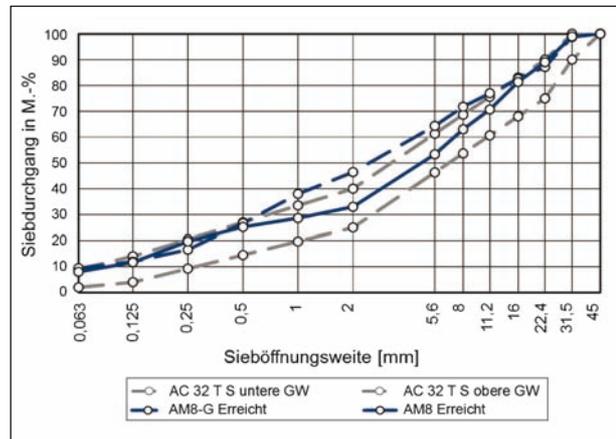


Bild 43: Stückgrößenverteilung und berechnete Korngrößenverteilung der Variante AM8

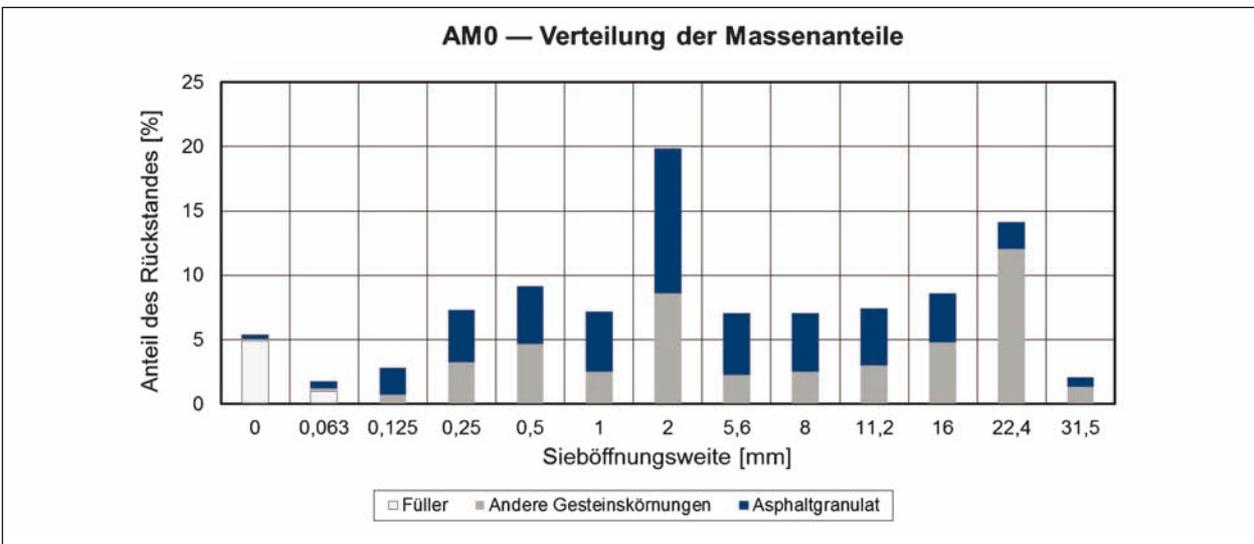


Bild 44: Stoffliche Verteilung der Referenzvariante AM0 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

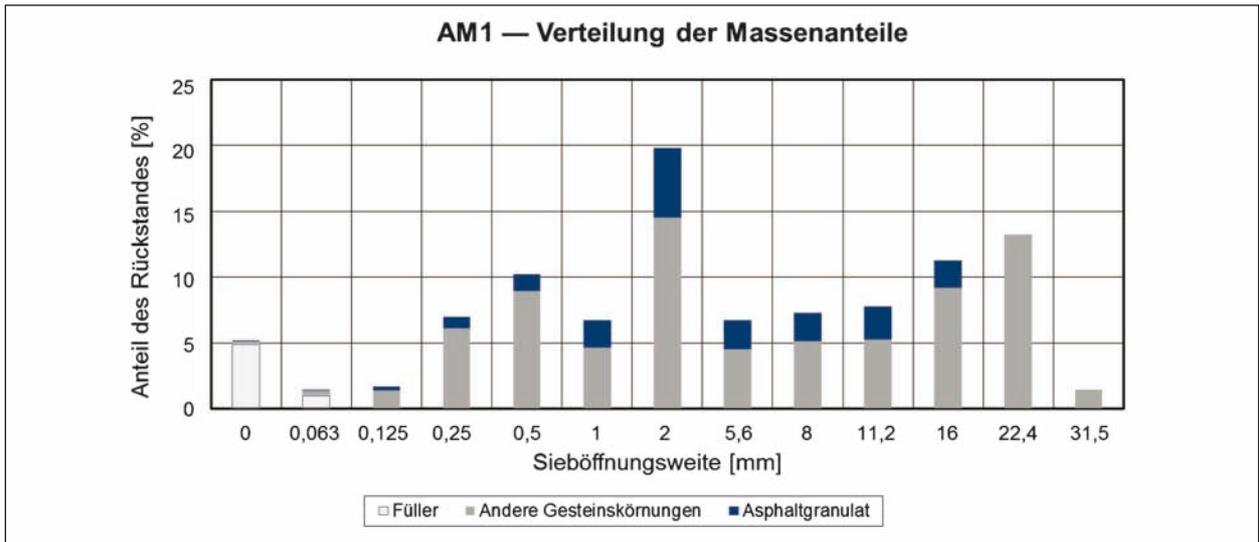


Bild 45: Stoffliche Verteilung der Variante AM1 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

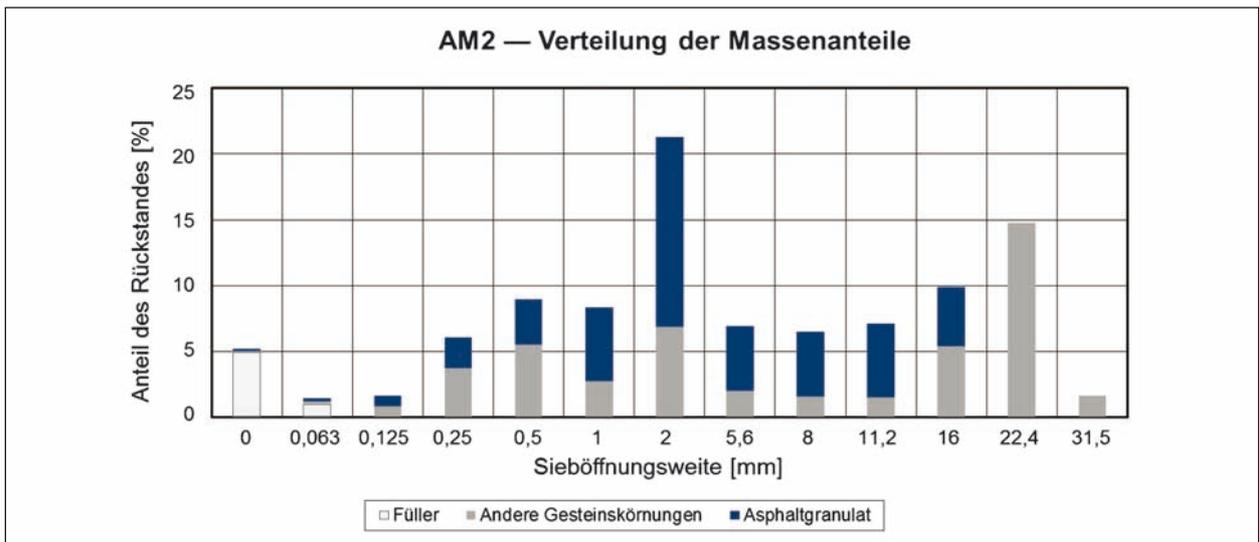


Bild 46: Stoffliche Verteilung der Variante AM2 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

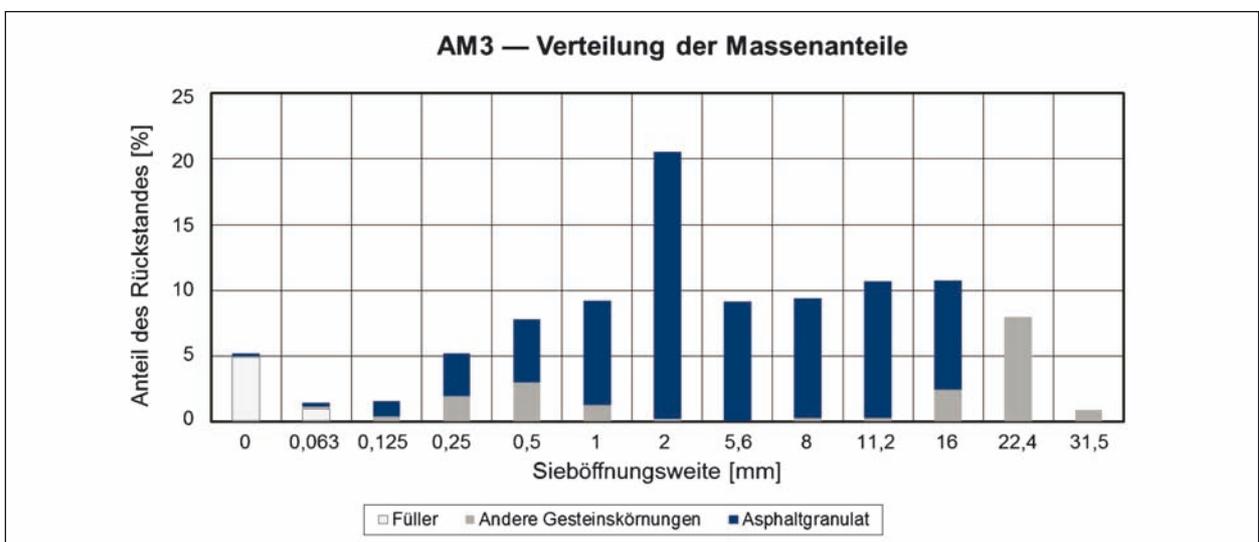


Bild 47: Stoffliche Verteilung der Variante AM3 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

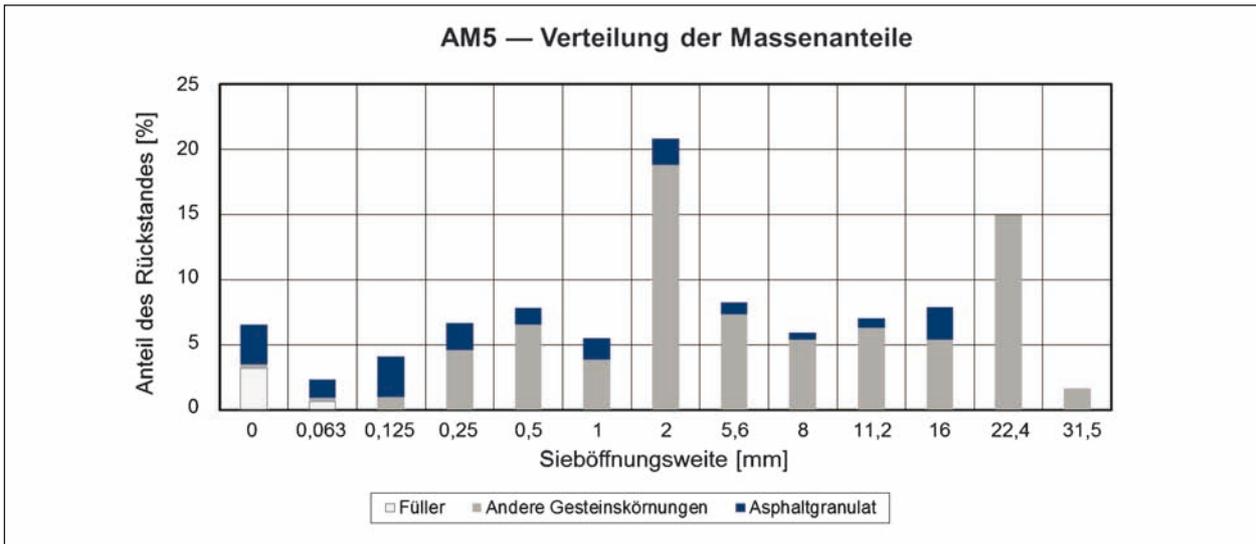


Bild 48: Stoffliche Verteilung der Variante AM5 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

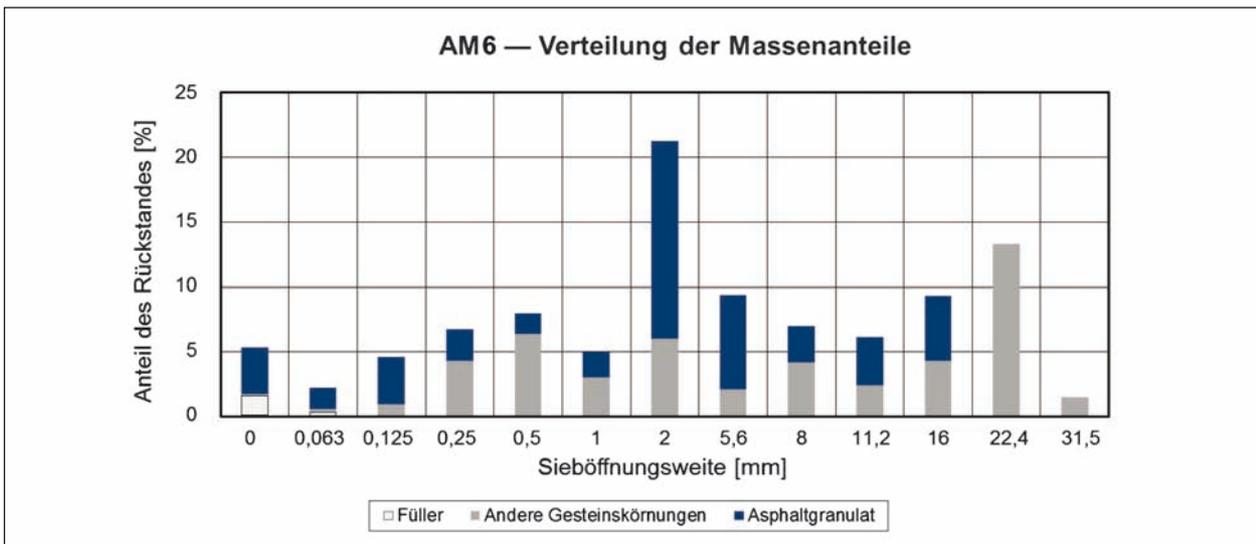


Bild 49: Stoffliche Verteilung der Variante AM6 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

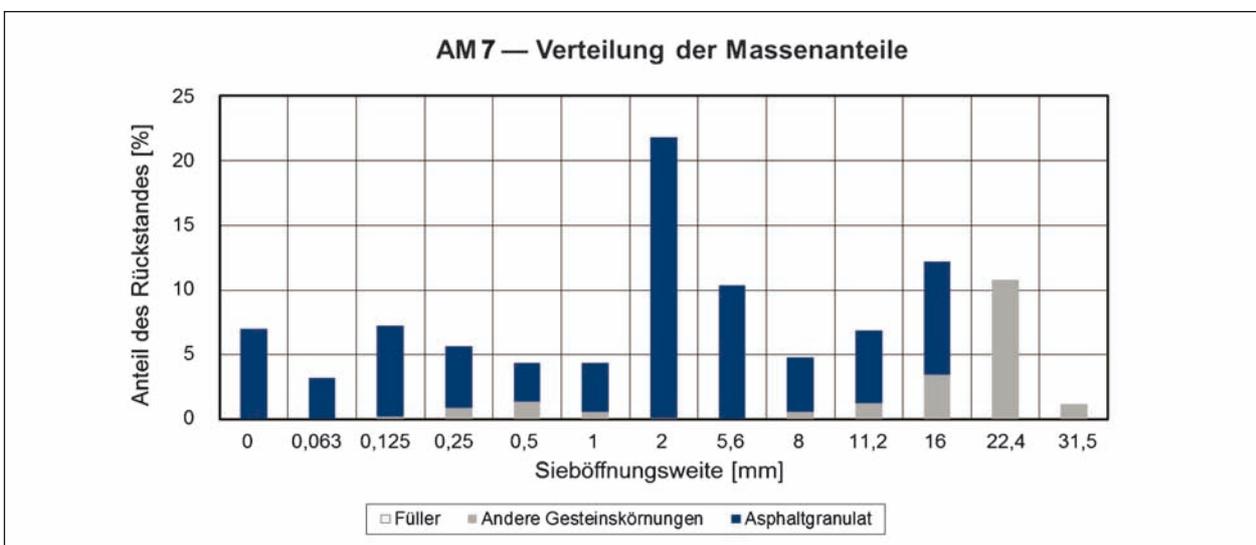


Bild 50: Stoffliche Verteilung der Variante AM7 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

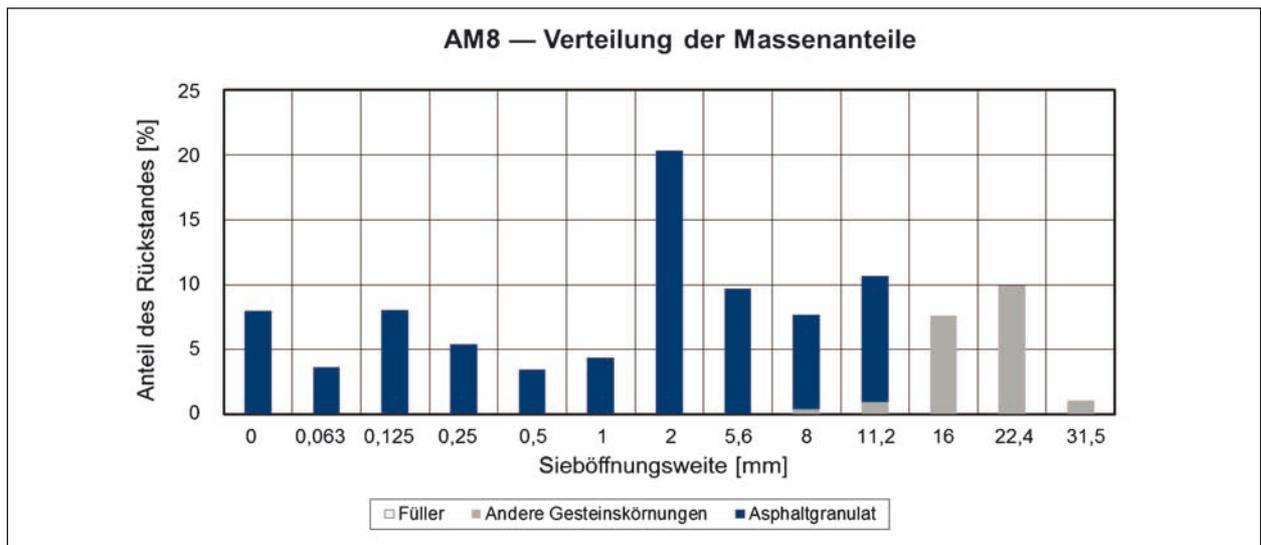


Bild 51: Stoffliche Verteilung der Variante AM8 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser

Variante	Einheit	Rohdichte
AM0-G	g/cm ³	2,633
AM1-G		2,694
AM2-G		2,617
AM3-G		2,560
AM5-G		2,703
AM6-G		2,643
AM7-G		2,593
AM8-G		2,600

Tab. 52: Rohdichte der Gesteinskörnungen der Varianten AM0 bis AM8

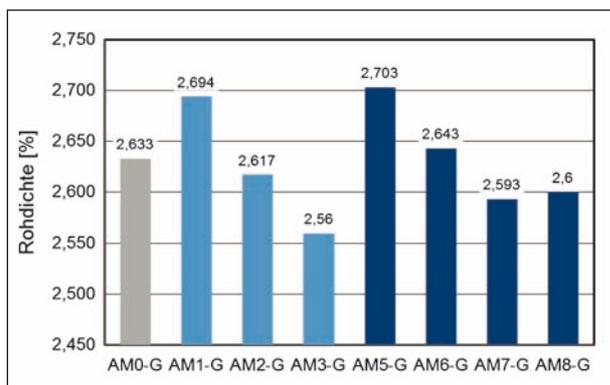


Bild 52: Rohdichte der Gesteinskörnungen der Varianten AM0 bis AM8

Asphaltgranulate. Demzufolge haben die Gemische mit den höchsten Anteilen an Asphaltgranulat die niedrigsten Raumdichten. Die Gemische mit gleichen Anteilen an Asphaltgranulat haben folglich auch etwa die gleichen Rohdichten.

Asphaltmischgut	Einheit	Massenanteil des Asphaltgranulates	
		tatsächlich	Abweichung von dem Zielanteil
AM0	%	51,5	01,5
AM1		20,2	+0,2
AM2		50,0	0,0
AM3		79,8	-0,2
AM5		20,2	+0,2
AM6		50,0	0,0
AM7		79,5	-0,5
AM8		80,0	0,0

Tab. 53: Tatsächliche Gesamtanteile der Asphaltgranulate im Gesteinskörnungsgemische

Die Abweichungen der tatsächlichen zu den angestrebten Gehalten (Soll-Gehalte) an Asphaltgranulat liegen zwischen -0,5 und +1,5 % und sind in Tabelle 53 aufgeführt. Diese Abweichungen sind als gering und unbedeutend zu bezeichnen, sodass im weiteren Text der Soll-Gehalt für die Bezeichnung der Asphaltmischgüter verwendet werden.

5 Optimierung des Gehaltes an Bitumenemulsion

Zur Festlegung eines optimalen Bindemittelgehaltes wurden Probekörper gemäß Anhang 2 des Merkblattes VB-K (M VB-K) hergestellt und nach 7 bzw. 28 Tagen geprüft. Die Herstellung der Probekörper wurde nach dem Doppelkolbenprinzip



Bild 53: Statische Verdichtung des Probekörpers nach dem Doppelkolbenprinzip

durchgeführt, d. h. mit einem Verdichtungsanschub von beiden Seiten, sodass der Einfluss der Reibung an der Mantelfläche möglichst gering ist. Das Bild 53 zeigt die Prüfvorrichtung für die statische Verdichtung des Probekörpers nach dem Doppelkolbenprinzip und die zugehörige zylindrische Verdichtungsform.

Die Probekörper wurden einen Tag nach der Herstellung ausgeformt. In den ersten zwei Tagen nach der Ausformung wurden die Probekörper bei (20 ± 2) °C und bei mindestens 95 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert (feuchte Lagerung). Vom dritten Tag an erfolgte eine Trockenlagerung bei 40 bis 70 % relativer Luftfeuchtigkeit und bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C auf einer flachen Oberfläche. Nach insgesamt 7 oder 28 Tagen nach Verdichtung der Probekörper erfolgte die Bestimmung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften gemäß M KRC. Tabelle 54 bis Tabelle 57 enthalten die Prüfergebnisse an den verdichteten Probekörper nach 7 und 28 Tagen jeweils mit drei unterschiedlichen Bindemittelgehalten. Die Spaltzugfestigkeiten wurden bei einer Prüftemperatur von 5 °C ermittelt. Die Bindemittelgehalte wurden zunächst ohne Berücksichtigung des Bindemittelanteils aus dem Asphaltgranulat gewählt. Weitere Ergebnisdarstellungen dieser Untersuchungen sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
Asphaltmischgut AM5				
Probekörperserie	—	S1	S2	S3
BE-Gehalt	%	6,0	7,0	8,0
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	3,60	4,20	4,80
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	1,13	1,12	1,11
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	4,73	5,32	5,91
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	0,36	0,36	0,36
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,555	2,532	2,509
AM5.1 nach 7 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,199	2,299	2,269
Hohlraumgehalt, V	%	13,95	9,20	9,55
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	21,67	18,62	20,17
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	35,82	50,58	52,88
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	0,841	0,886	0,967
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	4,676	4,654	5,887
E-Modul, E_{SZ}	MPa	2,516	2,715	1,624
AM5.1 nach 28 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,192	2,270	2,275
Hohlraumgehalt, V	%	14,21	10,33	9,32
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	21,91	19,63	19,98
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	35,15	47,54	53,35
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,141	1,391	1,449
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	3,499	3,426	4,553
E-Modul, E_{SZ}	MPa	4,079	5,048	3,489
AM5.3 nach 7 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,297	2,322	—
Hohlraumgehalt, V	%	10,09	8,30	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	18,16	17,82	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	44,46	53,43	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	0,604	0,711	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	7,022	8,183	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	1,181	1,137	—
AM5.3 nach 28 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,243	2,258	—
Hohlraumgehalt, V	%	12,20	10,80	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	20,08	20,06	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	39,26	46,14	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,142	1,241	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	3,398	4,068	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	4,983	4,064	—
¹ die angenommene Eigenfeuchte des Asphaltgranulates beträgt 2,0 M.-%				

Tab. 54: Volumetrische und mechanische Eigenschaften des Asphaltmischgutes AM5 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
Asphaltmischgut AM6				
Probekörperserie	—	S1	S2	S3
BE-Gehalt	%	6,0	7,0	8,0
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	3,60	4,20	4,80
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	2,85	2,82	2,79
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	6,45	7,02	7,59
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	0,91	0,90	0,89
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,504	2,482	2,460
AM5.1 nach 7 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,268	2,267	2,261
Hohlraumgehalt, V	%	9,42	8,65	8,07
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	17,38	17,94	18,66
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	45,84	51,81	56,75
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,097	1,149	0,943
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	3,769	4,447	6,797
E-Modul, E_{SZ}	MPa	3.132	3.080	1.984
AM5.1 nach 28 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,239	2,279	2,262
Hohlraumgehalt, V	%	10,60	8,16	8,07
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	18,46	17,50	18,66
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	42,95	53,60	57,07
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,546	1,612	1,562
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	3,681	3,140	3,741
E-Modul, E_{SZ}	MPa	4.798	5.431	4.128
AM5.3 nach 7 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,285	2,300	—
Hohlraumgehalt, V	%	8,74	7,32	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	16,77	16,75	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	47,87	56,30	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	0,662	0,685	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	10,495	10,652	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	958	775	—
AM5.3 nach 28 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,237	2,234	—
Hohlraumgehalt, V	%	10,68	10,00	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	18,53	19,15	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	42,38	48,08	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,151	1,367	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	4,763	3,911	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	2.852	3.512	—
¹ die angenommene Eigenfeuchte des Asphaltgranulates beträgt 2,0 M.-%				

Tab. 55: Volumetrische und mechanische Eigenschaften des Asphaltmischgutes AM6 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
Asphaltmischgut AM7				
Probekörperserie	—	S1	S2	S3
BE-Gehalt	%	5,0	6,0	7,0
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	3,00	3,60	4,20
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	4,66	4,61	4,56
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	7,66	8,21	8,76
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	1,49	1,47	1,45
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,483	2,462	2,440
AM5.1 nach 7 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,231	2,263	2,241
Hohlraumgehalt, V	%	10,16	8,10	8,16
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	16,69	16,05	17,34
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	39,34	49,57	53,00
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,048	1,273	1,205
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	3,796	4,105	5,308
E-Modul, E_{SZ}	MPa	3.092	3.350	2.246
AM5.1 nach 28 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,190	2,260	2,238
Hohlraumgehalt, V	%	11,80	8,59	9,08
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	18,21	15,87	16,94
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	35,21	45,84	46,40
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,554	1,746	1,686
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	2,748	2,975	3,806
E-Modul, E_{SZ}	MPa	5.828	5.402	4.208
AM5.3 nach 7 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	—	2,277	—
Hohlraumgehalt, V	%	—	7,72	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	—	15,71	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	—	50,95	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	—	0,697	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	—	10,354	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	—	780	—
AM5.3 nach 28 Tagen				
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	—	2,264	—
Hohlraumgehalt, V	%	—	8,03	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	—	15,98	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	—	49,77	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	—	1,416	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	—	3,105	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	—	3.800	—
¹ die angenommene Eigenfeuchte des Asphaltgranulates beträgt 2,0 M.-%				

Tab. 56: Volumetrische und mechanische Eigenschaften des Asphaltmischgutes AM7 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
Asphaltmischgut AM8				
Probekörperserie	—	S1	S2	S3
BE-Gehalt	%	5,0	6,0	7,0
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	3,00	3,60	4,20
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	4,68	4,63	4,58
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	7,68	8,23	8,78
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	1,50	1,48	1,46
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,489	2,467	2,446
AM5.1 nach 7 Tagen				
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,233	2,243	2,234
Hohlraumgehalt, V	%	10,27	9,06	8,68
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	16,81	16,94	17,84
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	38,90	46,52	51,33
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	0,997	1,121	1,143
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	4,054	4,519	7,685
E-Modul, E_{SZ}	MPa	2,425	2,080	1,640
AM5.1 nach 28 Tagen				
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,231	2,255	2,254
Hohlraumgehalt, V	%	10,38	8,58	7,86
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	16,91	16,50	17,09
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	38,62	48,02	54,05
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	1,377	1,559	1,560
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	2,830	2,731	5,174
E-Modul, E_{SZ}	MPa	4,291	4,315	3,278
AM5.3 nach 7 Tagen				
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	—	2,269	—
Hohlraumgehalt, V	%	—	8,04	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	—	16,01	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	—	49,82	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	—	0,725	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	—	11,473	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	—	910	—
AM5.3 nach 28 Tagen				
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	—	2,282	—
Hohlraumgehalt, V	%	—	7,50	—
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	—	15,51	—
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	—	51,68	—
Spaltzugfestigkeit, β_{SZ}	N/mm ²	—	1,492	—
Bruchdehnung, ϵ_{SZ}	‰	—	3,109	—
E-Modul, E_{SZ}	MPa	—	4,556	—
¹ die angenommene Eigenfeuchte des Asphaltgranulates beträgt 2,0 M.-%				

Tab. 57: Volumetrische und mechanische Eigenschaften des Asphaltmischgutes AM8 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)



Bild 54: Der Probekörper AM6.1 S3 nach Prüfung der Spaltzugfestigkeit

Das Bild 54 zeigt einen typischen Probekörper nach der Prüfung der Spaltzugfestigkeit. Anhand dieses repräsentativen Fotos und der visuellen Auswertung aller Bruchflächen und Bruchverläufe wurden als Bruchart entweder reine Zugbrüche oder eine Kombination aus Zugbruch und Verformung festgestellt. Das heißt, dass die Probekörper mit einer begrenzten Bruchlinie und größeren verformten Bereich in der Nähe der Druckstreifen vorlagen (DIN EN 12697-23). Das Kombinationsversagen trat besonders bei den Asphaltgemischen mit höherem Gehalt an Asphaltgranulat auf.

Aufgrund der physikalischen und mechanischen Eigenschaften ist es offensichtlich, dass der Wassergehalt bzw. der Wasserverlust im Laufe der Probenlagerung eine wichtige Einflussgröße auf die Gebrauchseigenschaften der Kaltasphaltgemische ist. Dieser Einfluss wird anhand der Kraft-Querverformungs-Diagramme offensichtlich. Typische Kraft-Querverformungs-Diagramme sind in Bild 55 bis Bild 58 dargestellt. Die höheren Bruchlasten und das tendenziell sprödere Bruchversagen sind bei einer Lagerungsdauer von 28 Tagen festzustellen. In diesem Zusammenhang bleibt als offene Frage, ob noch mögliche Restwassermengen zu einer weiteren Veränderung der Materialeigenschaften nach Lagerungszeiten über 28 Tage hinaus führen.

Die physikalischen Eigenschaften wie z. B. die Raumdichte und der Hohlraumgehalt, sowie die Spaltzugfestigkeit sind wesentliche Parameter für eine Bewertung der einzelnen Mischgutkonzepte. Aufgrund dieser Werte wurde eine Auswahl über die optimalen Bitumenemulsionszugabe getroffen.

Grundsätzlich wurde dabei festgestellt, dass Kaltasphaltgemische, die mit einem geringeren Anteil

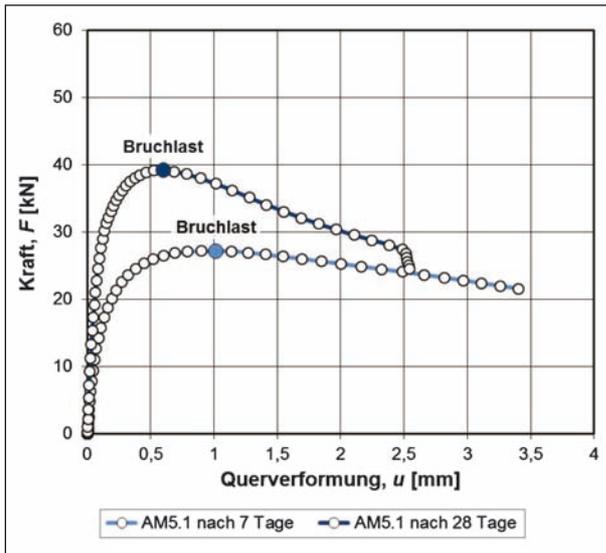


Bild 55: Darstellung der typischen Abhängigkeit zwischen der Kraft (Last) und der Querverformung im Spaltzugversuch des Asphaltmischgutes AM5.1

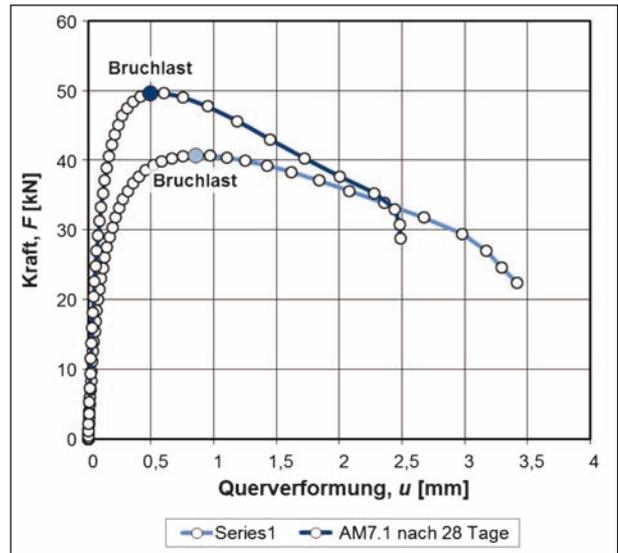


Bild 57: Darstellung der typischen Abhängigkeit zwischen der Kraft (Last) und der Querverformung im Spaltzugversuch des Asphaltmischgutes AM7.1

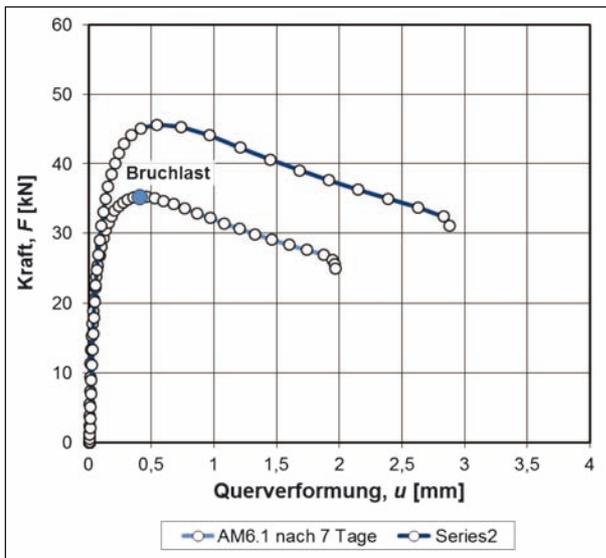


Bild 56: Darstellung der typischen Abhängigkeit zwischen der Kraft (Last) und der Querverformung im Spaltzugversuch des Asphaltmischgutes AM6.1

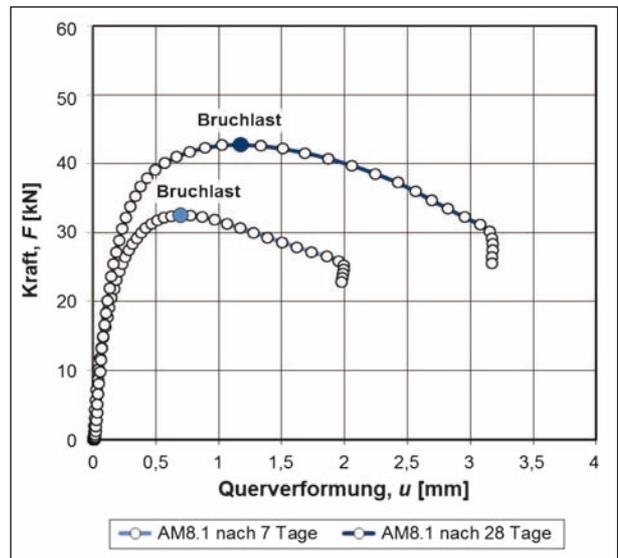


Bild 58: Darstellung der typischen Abhängigkeit zwischen der Kraft (Last) und der Querverformung im Spaltzugversuch des Asphaltmischgutes AM8.1

von Asphaltgranulat hergestellt wurden, eine höhere Zugabemenge an Bitumenemulsionen benötigen. Grundsätzlich wurde zudem berücksichtigt, dass höhere Bindemittelgehalte sich i. Allg. positiv auf die Verdichtbarkeit des Mischgutes auswirken. Höhere Mengen an Bitumenemulsion führen aber auf der anderen Seite in den ersten Wochen auch zu niedrigeren Steifigkeiten. Unter Berücksichtigung dieser Auswahlbedingungen wurden die in Tabelle 58 aufgeführten Emulsionsgehalte gewählt. Die Kaltasphaltgemische wurden alle mit einem einheitlichen Zementgehalt von 1,5 M.-% hergestellt.

Asphaltmischgut	Angenommene optimale Bitumenemulsionsgehalt [%]
AM5	7,50
AM6	7,00
AM7	6,00
AM8	6,00

Tab. 58: Ausgewählte Bitumenemulsionsgehalte

6 Prüfung der mechanischen Eigenschaften im Spaltzug-Schwellversuch

6.1 Herstellung der Asphalt-Probepplatten mit dem WSV

Die Mischgutherstellung erfolgte in einem konventionellen Labormischer (Bild 59). Aus den Asphaltgemischen AM5.1, AM5.3, AM6.1, AM6.3, AM7.1, AM7.3, AM8.1 und AM8.3 sowie aus dem Referenz-Asphaltmischgut AM6.0 wurden Asphalt-Probepplatten im Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV) hergestellt. Als Verdichtungsverfahren wurde die wegge-regelte Verdichtung mit Verdichtungsschritten von ca. 0,35 mm pro Übergang gewählt. Das Abfließen des Wassers, das nach Brechen der Bitumenemulsion austreten kann, muss dabei grundsätzlich ermöglicht werden. Dafür wurde eine 10 mm dicke Bronze-Filterplatte auf den Boden der Verdichtungsform gesetzt. Auf der Oberseite dieser Filterplatte wurde zusätzlich Filterpapier gelegt. Dies dient dem Schutz des Verdichtungsgerätes vor Wassereintritt in elektrische Anlagenteile. Die verwendete Filterplatte ist in Bild 60, die Verdichtung einer Asphalt-Probepplatte im Walzsektor-Verdichtungsgerät in Bild 61 dargestellt.

Aus den Probepplatten, die für eine Prüfung nach 7 Tagen Lagerung vorgesehen waren, wurden am fünften Tag die erforderlichen Bohrkerne entnommen. Platten für die Prüfung nach 28 Tagen wurden nach drei Wochen Lagerung gebohrt. Drei Tage vor der Prüfung wurden alle Probekörper in einem Klimaschrank bei 25 °C mit Luftzirkulation konditioniert. Für die Ermittlung des Steifigkeitsmoduls wurden vier Probekörper von jeder Asphaltmischgutart verwendet.



Bild 59: Das Asphaltmischgut AM5.1 in dem Labormischer

6.2 Physikalische Eigenschaften der Asphalt-Probepplatten

6.2.1 Kaltasphaltgemische mit Asphaltgranulat AG3 (AG4)

Die durch die Bohrung der Asphalt-Probepplatten gewonnenen Probekörper wurden zunächst für die Bestimmung der volumetrischen Kenndaten verwendet. Die Ergebnisse der Eigenschaften der Referenzvarianten sind in Tabelle 59 aufgeführt. Die physikalischen Eigenschaften der Kaltasphaltgemische mit den Asphaltgranulaten AG3 (hohe Binde-mittelverhärtung) sind in Tabelle 60 bis Tabelle 63 aufgeführt. Ein Vergleich der physikalischen Eigenschaften ist in Bild 62 bis Bild 65 vorgenommen werden.



Bild 60: Bronze-Filterplatte zum Drainieren des austretenden Wassers

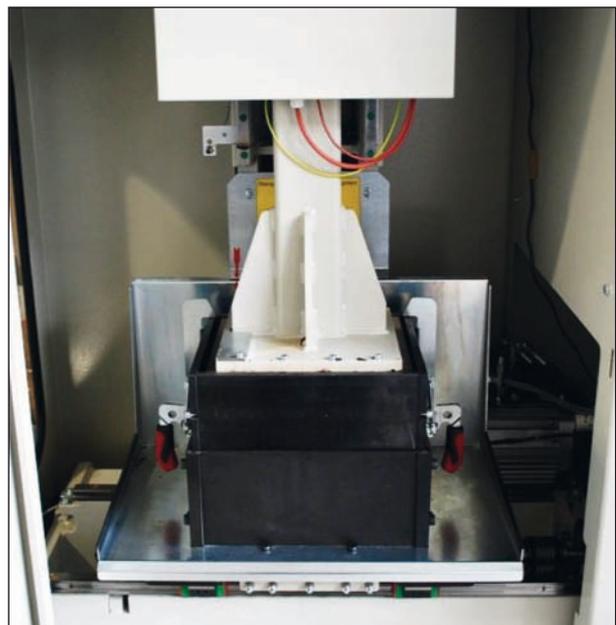


Bild 61: Die Verdichtung der Asphalt-Probepplatte in dem Walzsektor-Verdichtungsgerät

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
		AM0.1 nach 28 Tagen	Heiß-Asphaltmischgut AM6.0
Gehalt des Straßenbaubitumens	%	—	2,5
BE-Gehalt	%	7,00	—
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	4,20	—
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	1,94	3,02
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	6,14	5,52
Zugabewasser ¹	%	0,88	0,00
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,474	2,546
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,273	2,481
Hohlraumgehalt, V	%	8,12	2,55
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	17,44	8,61
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	53,85	70,74
¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates			

Tab. 59: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten AM0.1 und AM6.0 (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AM6.1 nach 7 Tagen	AM6.1 nach 28 Tagen	AM6.3 nach 28 Tagen
BE-Gehalt	%	7,00		
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	4,20		
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	2,82		
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	7,02		
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	0,90		
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,482		
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,292	2,365	2,360
Hohlraumgehalt, V	%	7,65	4,71	4,90
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	17,04	14,40	9,80
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	55,37	32,71	49,97
¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates				

Tab. 61: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten aus AM6 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AM5.1 nach 7 Tagen	AM5.1 nach 28 Tagen	AM5.3 nach 28 Tagen
BE-Gehalt	%	7,50		
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	4,50		
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	1,11		
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	5,61		
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	0,35		
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,520		
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,336	2,350	2,346
Hohlraumgehalt, V	%	7,29	6,74	6,91
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	17,55	17,06	17,21
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	58,51	60,62	59,96
¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates				

Tab. 60: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten aus AM5 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AM7.1 nach 7 Tagen	AM7.1 nach 28 Tagen	AM7.3 nach 28 Tagen
BE-Gehalt	%	6,00		
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	3,60		
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	4,61		
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	8,21		
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	1,47		
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,462		
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,231	2,269	2,276
Hohlraumgehalt, V	%	9,38	7,84	7,53
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	17,22	15,81	15,53
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	45,53	50,57	51,63
¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates				

Tab. 62: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten aus AM7 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AM8.1 nach 7 Tagen	AM8.1 nach 28 Tagen	AM8.3 nach 28 Tagen
BE-Gehalt	%	6,00		
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	3,60		
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	4,63		
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	8,23		
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	1,48		
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,467		
Raumdichte, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,279	2,312	2,335
Hohlraumgehalt, V	%	7,62	6,27	5,36
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	15,63	14,40	13,56
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	51,24	56,63	60,70

¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates

Tab. 63: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten aus AM8 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

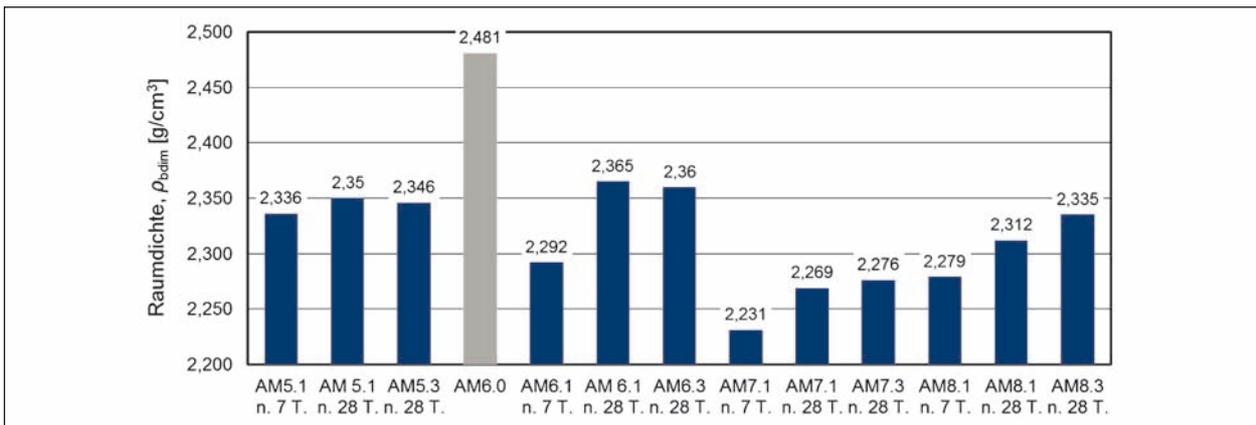


Bild 62: Raumdichte der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG3 (AG4)

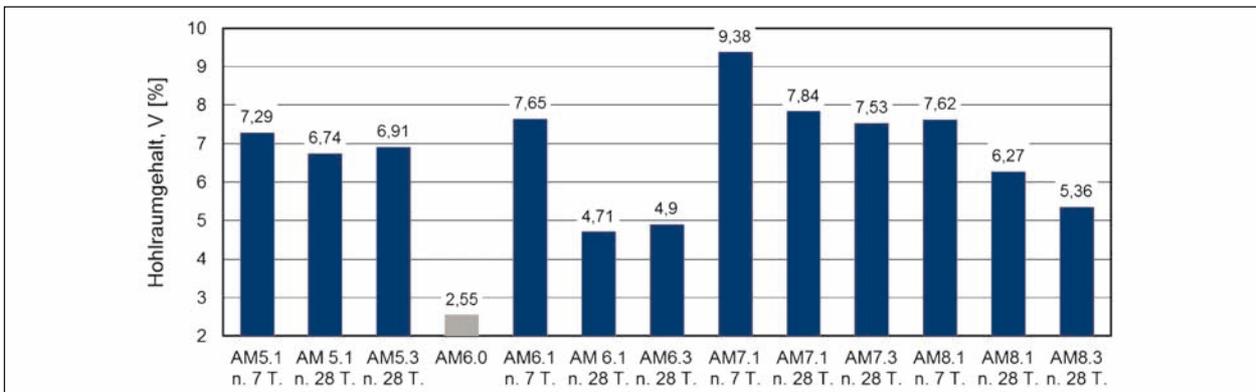


Bild 63: Hohlraumgehalt der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG3 (AG4)

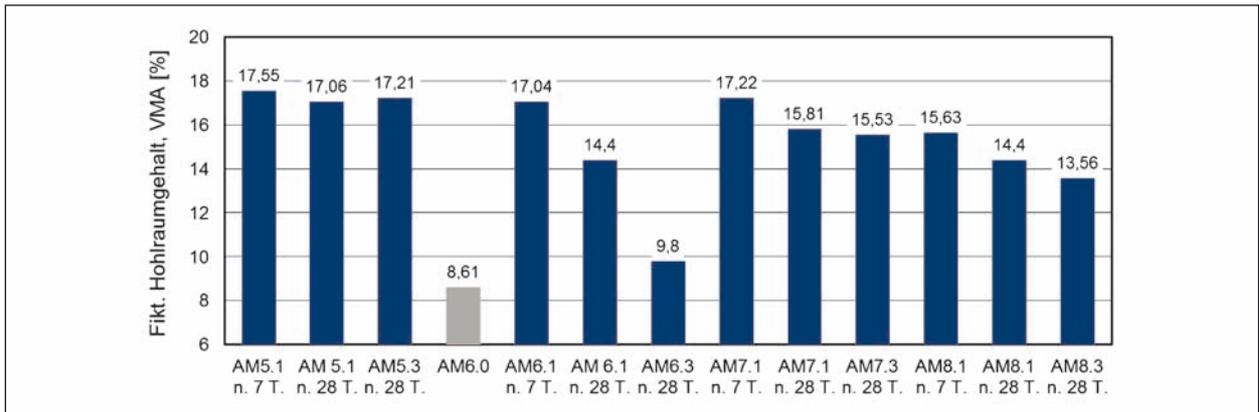


Bild 64: Fiktiver Hohlraumgehalt der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG3 (AG4)

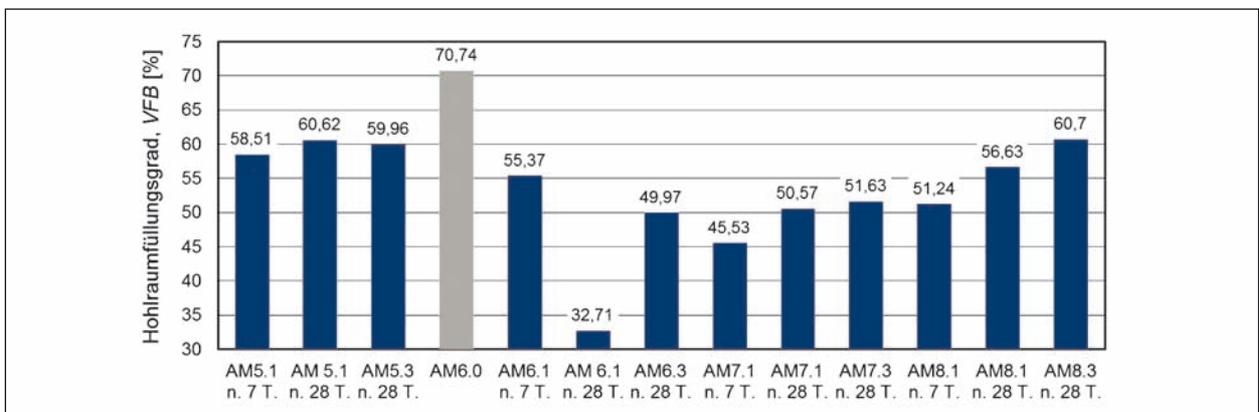


Bild 65: Hohlraumfüllungsgrad der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG3 (AG4)

6.2.2 Kaltasphaltgemische mit Asphaltgranulat AG1

Tabelle 64 bis Tabelle 66 enthalten die Prüfergebnisse der Kaltasphaltgemische mit dem Asphaltgranulat AG1 (geringe Bindemittelverhärtung). Ein Vergleich der physikalischen Eigenschaften wurde in Bild 66 bis Bild 69 vorgenommen.

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AM1.1 nach 7 Tagen	AM1.1 nach 28 Tagen	AM1.3 nach 28 Tagen
BE-Gehalt	%	7,50		
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	4,50		
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	0,86		
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	5,36		
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	0,34		
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,512		
Raumdichte, ρ_{dim}	g/cm ³	2,335	2,325	2,370
Hohlraumgehalt, V	%	5,30	7,48	5,69
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	15,62	17,69	16,09
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	69,56	57,80	64,72

¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates

Tab. 64: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten aus AM1 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AM2.1 nach 7 Tagen	AM2.1 nach 28 Tagen	AM2.3 nach 28 Tagen
BE-Gehalt	%	7,00		
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	4,20		
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	2,20		
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	6,40		
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	0,84		
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,460		
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,334	2,312	2,320
Hohlraumgehalt, V	%	3,85	6,03	5,71
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	13,48	15,51	15,22
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	73,95	61,13	62,55

¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates

Tab. 65: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten aus AM2 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis		
		AM3.1 nach 7 Tagen	AM3.1 nach 28 Tagen	AM3.3 nach 28 Tagen
BE-Gehalt	%	6,00		
Bindemittelgehalt aus Bitumenemulsion	%	3,60		
Bindemittelgehalt aus Asphaltgranulat	%	3,43		
Gesamt Bindemittelgehalt im Asphaltmischgut	%	7,03		
Gehalt des Zementes	%	1,5		
Zugabewasser ¹	%	1,36		
Rohdichte des Asphaltmischgutes, ρ_m	g/cm ³	2,433		
Raumdicke, ρ_{bdim}	g/cm ³	2,288	2,276	2,292
Hohlraumgehalt, V	%	4,29	6,47	5,83
Fiktiver Hohlraumgehalt, VMA	%	12,38	14,46	13,88
Hohlraumfüllungsgrad, VFB	%	69,08	55,53	58,16

¹ die angenommene Eigenfeuchte beträgt 2,0 M.-% des vorhandenen Asphaltgranulates

Tab. 66: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Varianten aus AM3 nach 7 und 28 Tagen (DIN EN 12697-8, TP Asphalt-StB Teil 8, DIN EN 12697-23, TP Asphalt-StB Teil 23, M KRC)

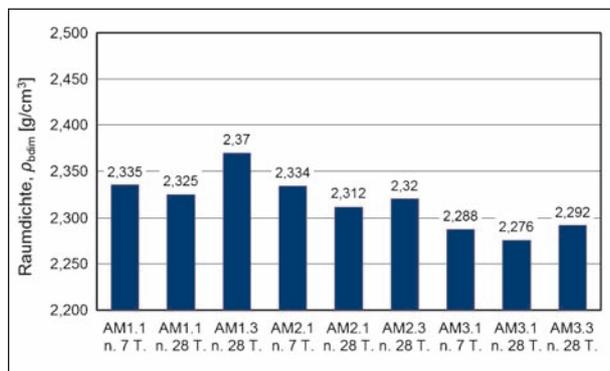


Bild 66: Raumdicke der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG1

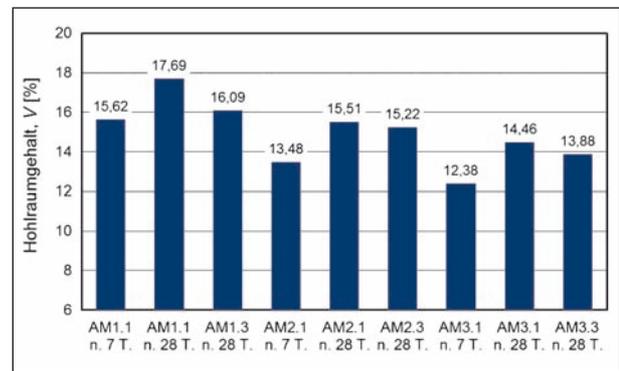


Bild 68: Fiktiver Hohlraumgehalt der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG1

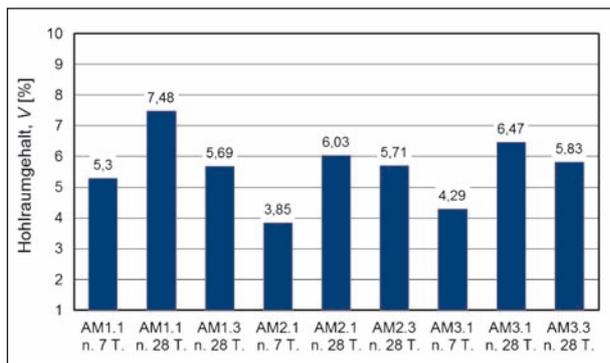


Bild 67: Hohlraumgehalt der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG1

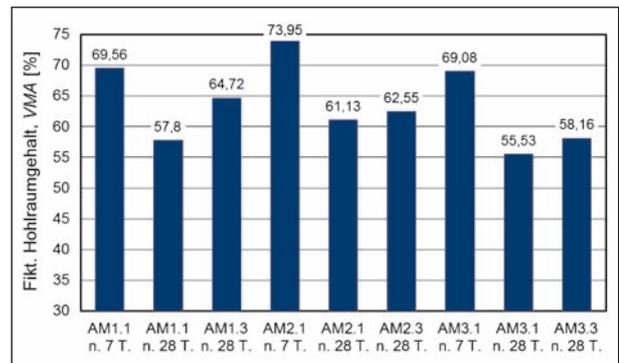


Bild 69: Hohlraumfüllungsgrad der aus den Asphalt-Probeplatten gewonnenen Bohrkern mit AG1

6.3 Steifigkeiten

Die Bestimmung der Steifigkeiten erfolgte bei den Prüftemperaturen -10, 0, 10, und 20 °C, sowie bei den Prüffrequenzen 0,1, 1, 5 und 10 Hz (nach AL Sp-Asphalt 09). Die zudem geplante Bestimmung der Steifigkeiten bei 30 und 40 °C war aufgrund zu hoher Verformungen unmöglich, daher wurden diese Werte mathematisch mittels der Hauptkurve extrapoliert. In Bild 70 ist der Prüfaufbau für die Ermittlung der Steifigkeiten dargestellt.

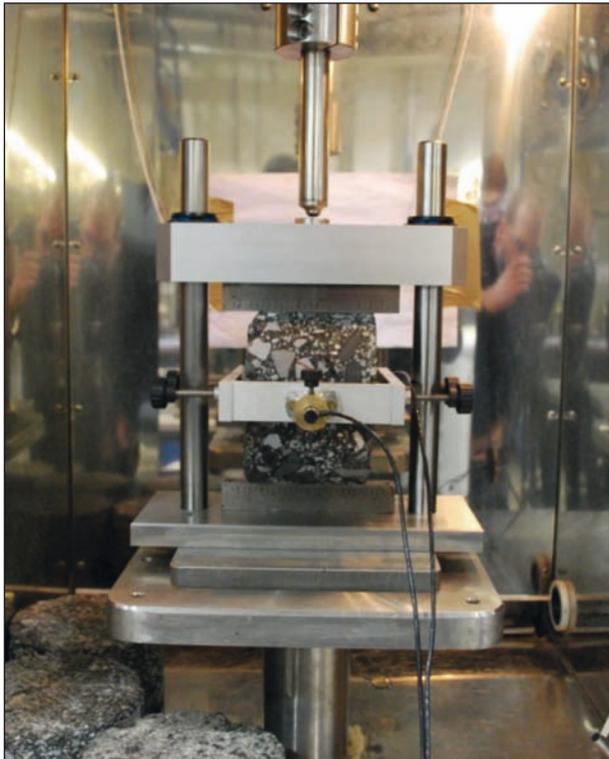


Bild 70: Asphaltprobekörper in der Klimakammer der Prüfvorrichtung für den Spaltzug-Schwellversuch

6.3.1 Steifigkeiten der Referenzvarianten

Die Steifigkeiten der Referenzvarianten sind in Tabelle 67 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und der Frequenz dargestellt. Anhand dieser Werte wurden die Hauptkurven ermittelt. Bild 71 und 72 enthalten die Diagramme der Steifigkeits-Temperaturfunktionen. Die prognostizierten Werte der Steifigkeiten für den Temperaturbereich von -20 bis 40 °C sind in Tabelle 68 aufgeführt. Bild 73 und 74 zeigen diese Ergebnisse noch einmal in grafischer Form.

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]	
		Referenz-Asphaltmischgut AM0.1	Referenz-Asphaltmischgut AM6.0
20	10	2.928	10.486
	5	2.723	8.904
	1	2.201	5.575
	0,1	1.682	2.277
10	10	3.617	16.684
	5	3.368	14.954
	1	2.694	11.372
	0,1	2.233	6.684
0	10	4.524	23.744
	5	4.341	22.858
	1	3.793	19.071
	0,1	3.037	14.160
-10	10	7.627	28.648
	5	7.445	27.783
	1	6.620	25.467
	0,1	5.720	21.429

Tab. 67: Steifigkeiten der Referenzvarianten AM0.1 und AM6

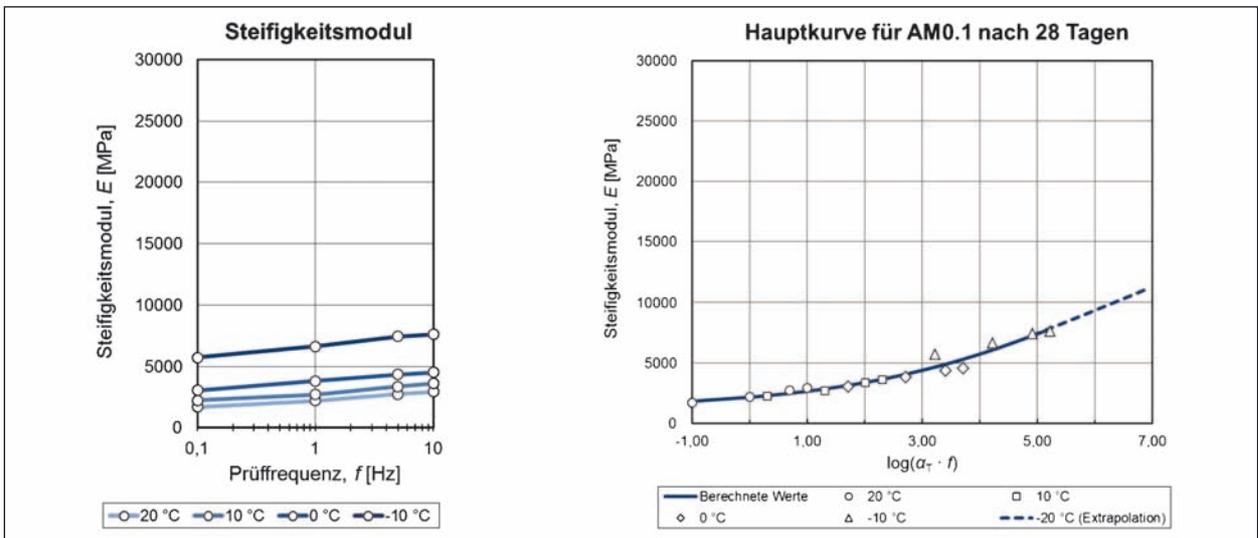


Bild 71: Hauptkurve der Referenzvariante AM0.1 mit dem Asphaltgranulat aus der BAB 30 (AG0)

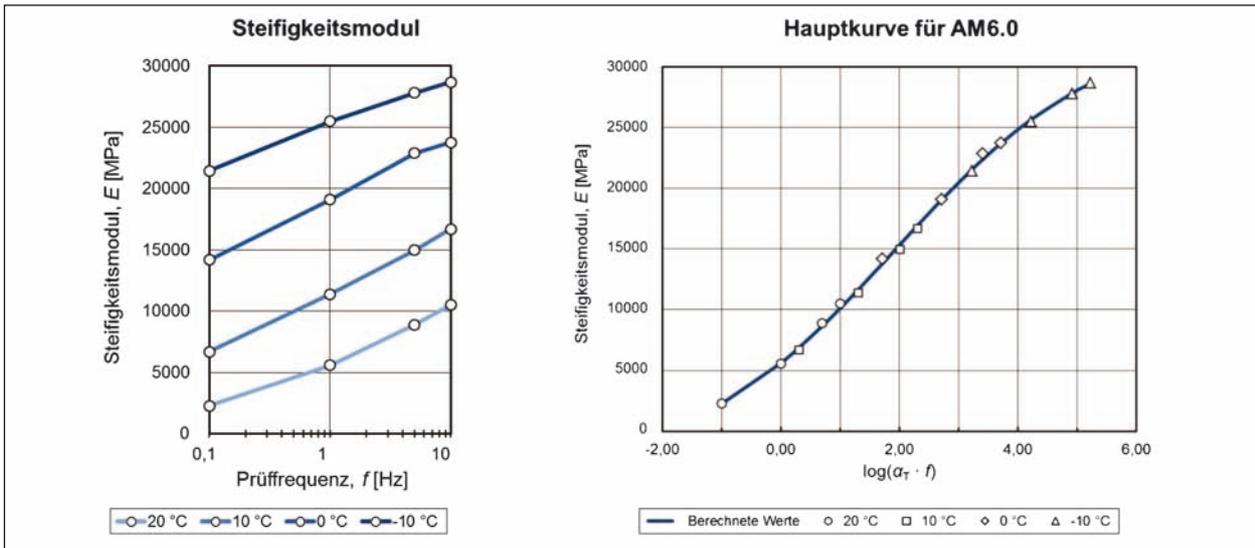


Bild 72: Hauptkurve der Referenzvariante AM6.0

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]	
		Referenzmischgut AM0.1	Referenzmischgut AM6.0
10	-20	11.045	31.382
	-10	7.824	28.612
	0	5.310	23.682
	10	3.653	16.948
	20	2.655	10.110
	30	2.074	4.780
	40	1.738	1.318
5	-20	10.443	31.021
	-10	7.270	27.838
	0	4.898	22.388
	10	3.381	15.354
	20	2.485	8.659
	30	1.970	3.724
	40	1.673	644
1	-20	9.044	29.942
	-10	6.082	25.649
	0	4.063	19.044
	10	2.850	11.673
	20	2.160	5.631
	30	1.772	1.676
	40	1.551	-607
0,1	-20	7.150	27.651
	-10	4.658	21.537
	0	3.142	13.794
	10	2.293	6.906
	20	1.829	2.269
	30	1.574	-381
	40	1.430	-1.794

Tab. 68: Prognostizierte Steifigkeiten der Referenzvarianten AM0.1 und AM6 im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

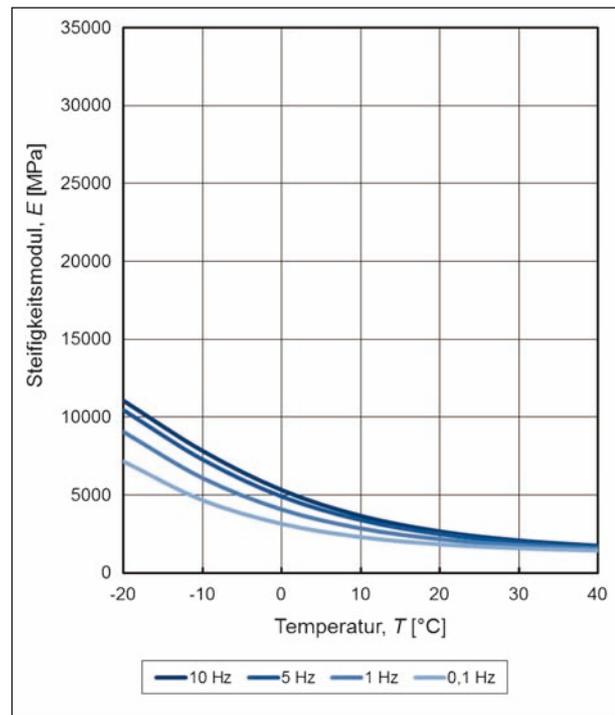


Bild 73: Prognostizierte Steifigkeiten der Referenzvariante AM0.1 im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C bei vier Prüffrequenzen

Bei hohen Prüftemperaturen und gleichzeitig niedrigen Prüffrequenzen ergeben sich rechnerisch negative Steifigkeiten, die in Tabelle 68 und – soweit vorhanden – auch in den folgenden Tabellen der prognostizierten Steifigkeiten (Kapitel 6.3.2 und 6.3.3) grau markiert sind. Grundsätzlich dokumentieren die negativen Steifigkeiten einen material- und belastungsabhängigen Bereich, bei dem keine nennenswerten elastischen Stoffeigenschaften mehr zu erwarten sind.

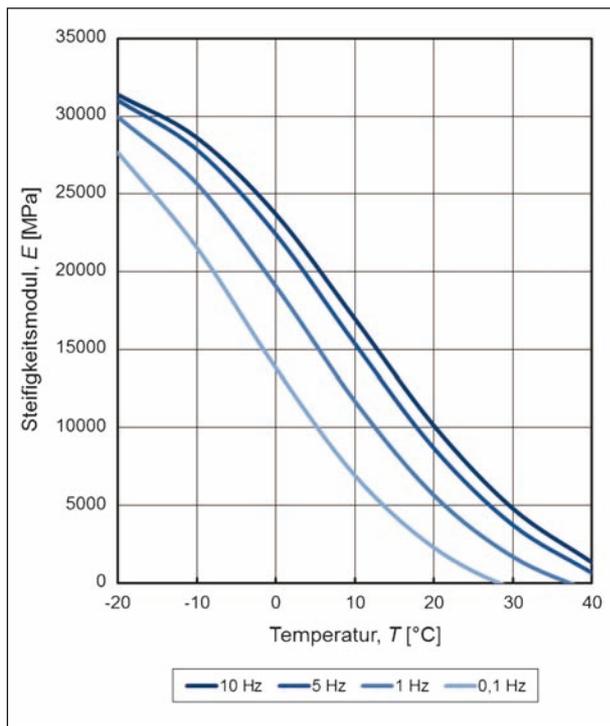


Bild 74: Prognostizierte Steifigkeiten der Referenzvariante AM6.0 im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C bei vier Prüffrequenzen

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM5.1 nach 7 Tagen	AM5.1 nach 28 Tagen	AM5.3 nach 28 Tagen
20	10	2.584	3.518	2.086
	5	2.115	2.962	1.655
	1	1.224	1.776	762
	0,1	657	566	122
10	10	4.386	5.958	4.372
	5	3.814	5.273	3.672
	1	2.666	3.602	2.187
	0,1	1.323	2.090	851
0	10	6.430	8.792	7.736
	5	5.840	8.045	6.905
	1	4.447	6.311	4.963
	0,1	2.683	4.058	2.698
-10	10	11.090	13.781	13.528
	5	10.404	13.148	12.691
	1	8.949	11.502	10.624
	0,1	6.712	9.002	7.775

Tab. 69: Steifigkeiten der Variante AM5 nach 7 und 28 Tagen

6.3.2 Steifigkeiten der Varianten mit AG3

Die Steifigkeiten der Kaltasphaltvarianten mit dem Asphaltgranulat mit hoher Bindemittelverhärtung (AG3) sind in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und der Prüffrequenz in Tabelle 70 bis Tabelle 72 tabellarisch und in Bild 75 bis Bild 86 grafisch dargestellt. Darüber hinaus sind die aus den Prüfergebnissen prognostizierten Werte der Steifigkeiten für den Temperaturbereich von -20 bis 40 °C in Tabelle 73 bis Tabelle 76 und in Bild 87 bis Bild 98 aufgeführt.

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM6.1 nach 7 Tagen	AM6.1 nach 28 Tagen	AM6.3 nach 28 Tagen
20	10	2.090	4.215	2.349
	5	1.748	3.777	1.975
	1	1.066	2.787	1.169
	0,1	282	1.633	362
10	10	3.315	6.110	4.220
	5	2.885	5.618	3.622
	1	1.809	4.371	2.509
	0,1	739	3.112	1.353
0	10	5.184	8.100	7.005
	5	4.835	7.617	6.353
	1	3.758	6.205	4.873
	0,1	2.413	4.573	2.977
-10	10	10.724	11.945	11.374
	5	10.174	11.402	10.706
	1	8.981	10.064	9.101
	0,1	6.900	8.206	6.616

Tab. 70: Steifigkeiten der Variante AM6 nach 7 und 28 Tagen

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM7.1 nach 7 Tagen	AM7.1 nach 28 Tagen	AM7.3 nach 28 Tagen
20	10	2.232	2.772	1.926
	5	1.877	2.372	1.588
	1	1.229	1.594	878
	0,1	633	634	196
10	10	4.460	4.177	3.055
	5	3.841	3.706	2.666
	1	2.654	2.865	1.693
	0,1	1.487	1.771	678
0	10	8.170	5.648	4.467
	5	7.278	5.324	4.107
	1	5.399	4.263	3.063
	0,1	3.301	2.825	1.761
-10	10	12.876	10.461	9.469
	5	11.960	10.036	9.024
	1	9.760	8.625	7.631
	0,1	6.746	6.674	5.619

Tab. 71: Steifigkeiten der Variante AM7 nach 7 und 28 Tagen

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM8.1 nach 7 Tagen	AM8.1 nach 28 Tagen	AM8.3 nach 28 Tagen
20	10	2.126	2.608	1.671
	5	1.756	2.242	1.411
	1	995	1.294	793
	0,1	317	335	188
10	10	4.050	4.704	3.074
	5	3.595	4.203	2.626
	1	2.444	2.911	1.733
	0,1	1.225	1.484	752
0	10	6.011	7.338	5.444
	5	5.648	6.766	5.017
	1	4.557	5.517	3.833
	0,1	3.134	3.794	2.476
-10	10	12.081	13.001	10.369
	5	11.605	12.498	9.898
	1	10.245	11.101	8.686
	0,1	8.191	9.010	6.733

Tab. 72: Steifigkeiten der Variante AM8 nach 7 und 28 Tagen

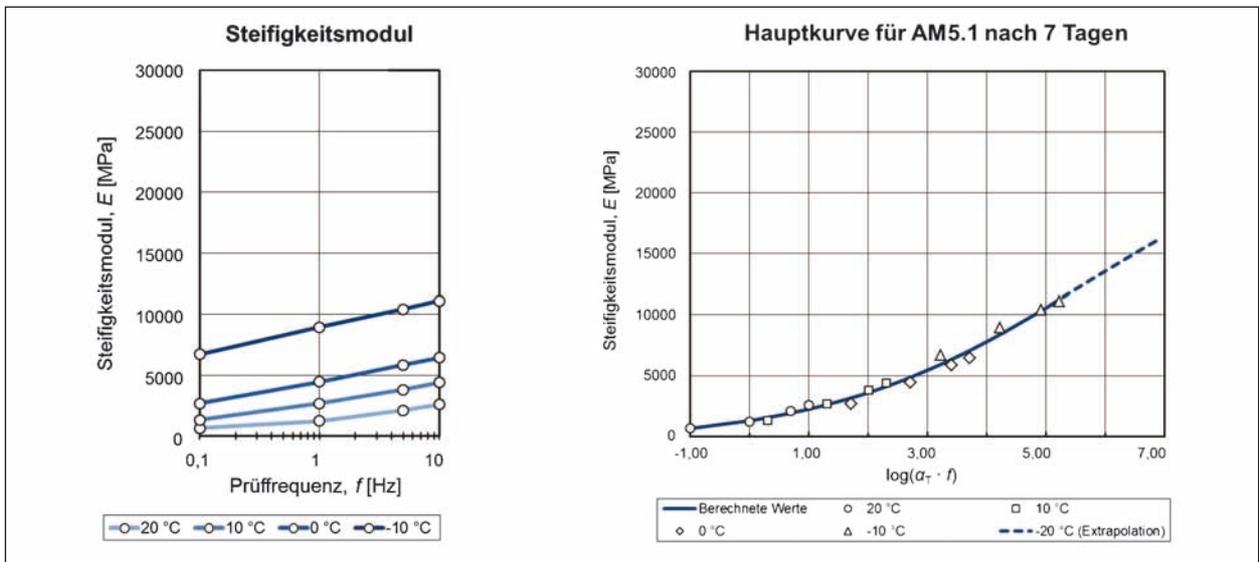


Bild 75: Hauptkurve der Variante AM5.1 nach 7 Tagen Lagerung

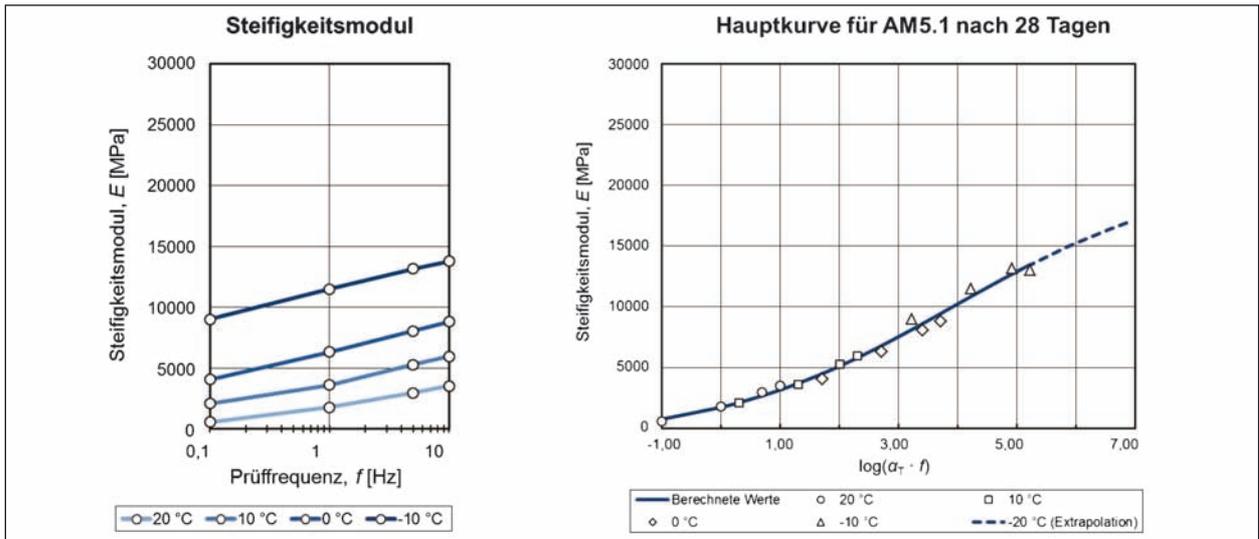


Bild 76: Hauptkurve der Variante AM5.1 nach 28 Tagen Lagerung

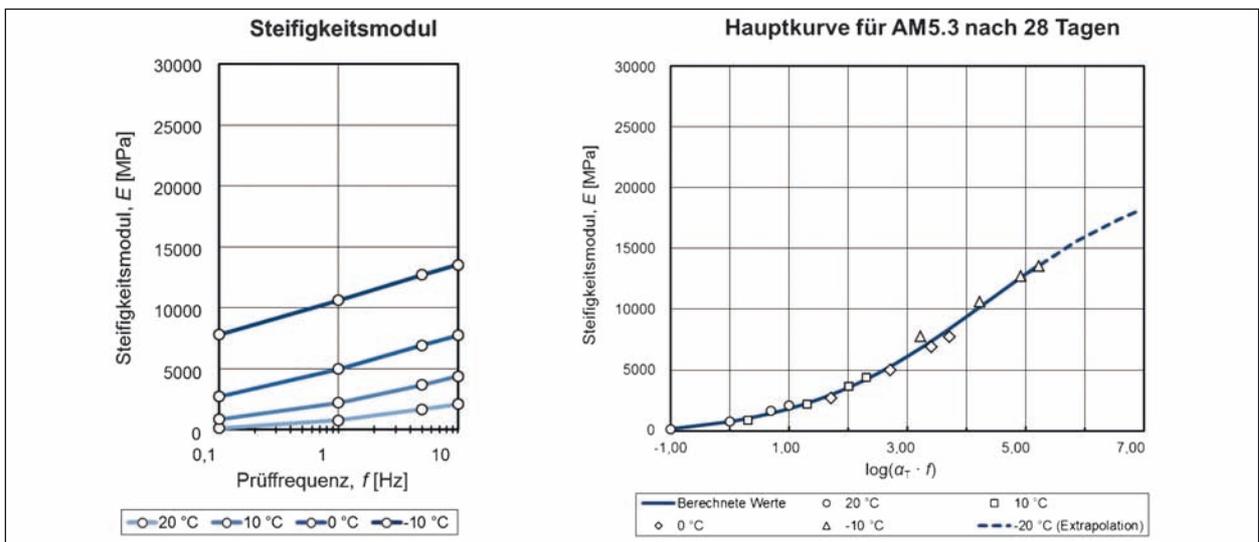


Bild 77: Hauptkurve der Variante AM5.3 nach 28 Tagen Lagerung

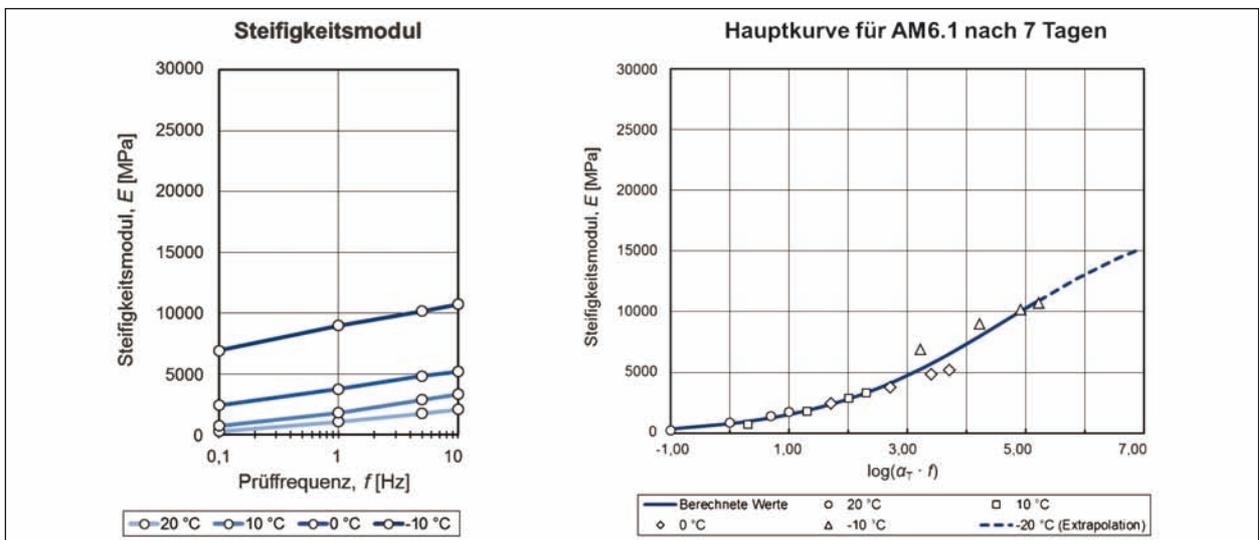


Bild 78: Hauptkurve der Variante AM6.1 nach 7 Tagen Lagerung

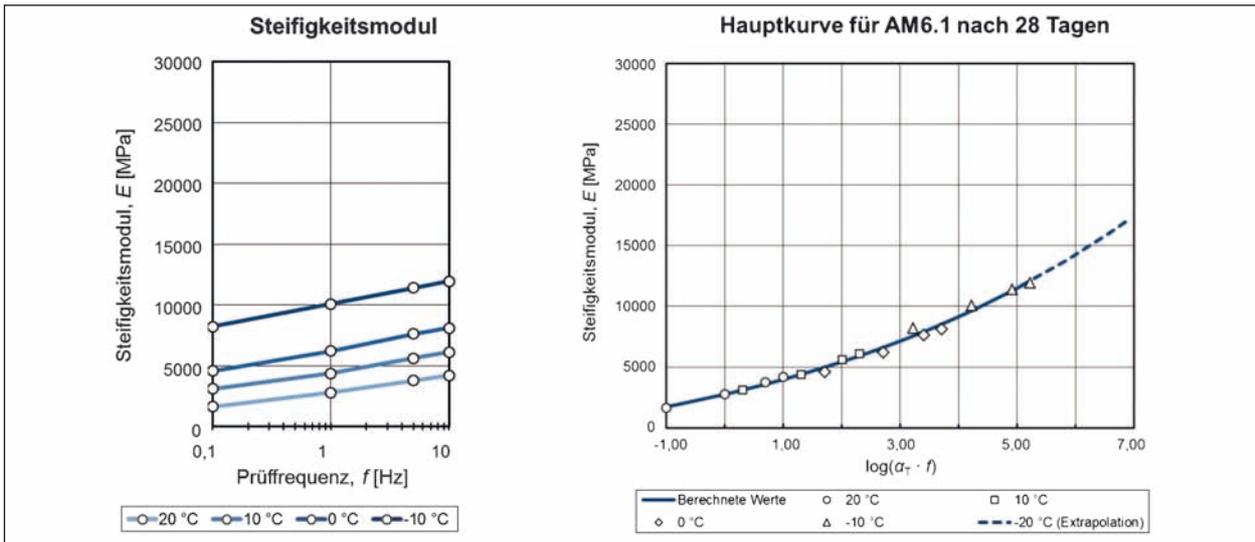


Bild 79: Hauptkurve der Variante AM6.1 nach 28 Tagen Lagerung

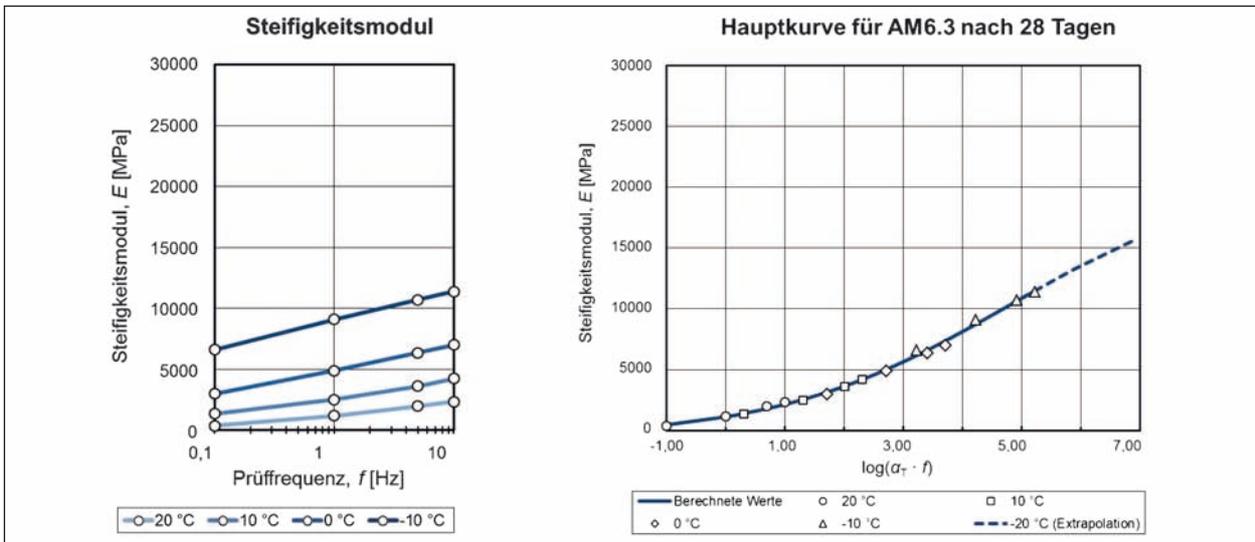


Bild 80: Hauptkurve der Variante AM6.3 nach 28 Tagen Lagerung

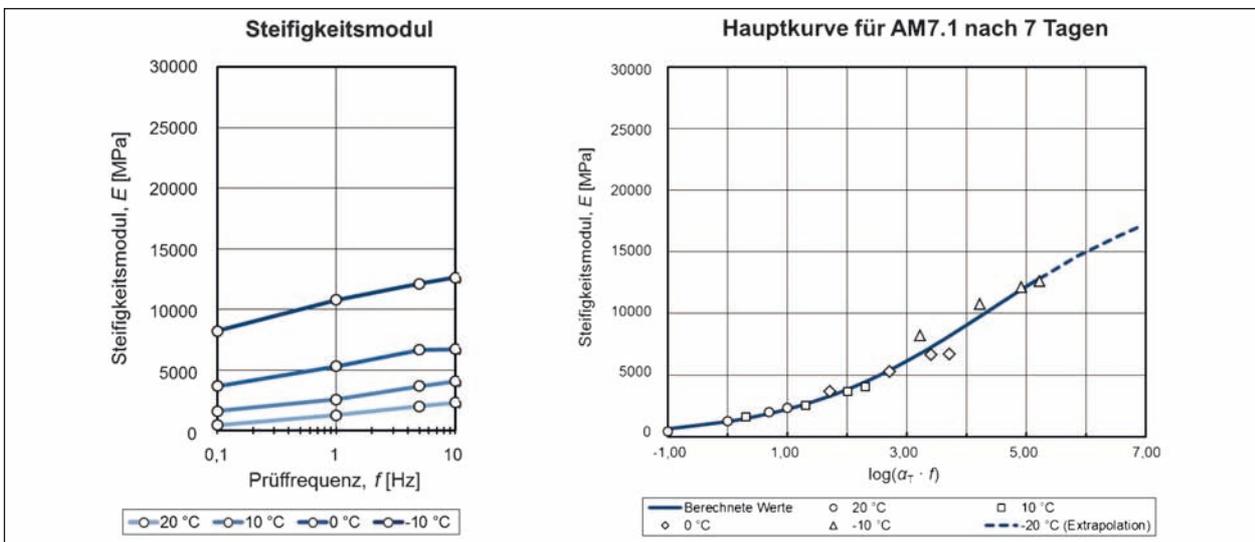


Bild 81: Hauptkurve der Variante AM7.1 nach 7 Tagen Lagerung

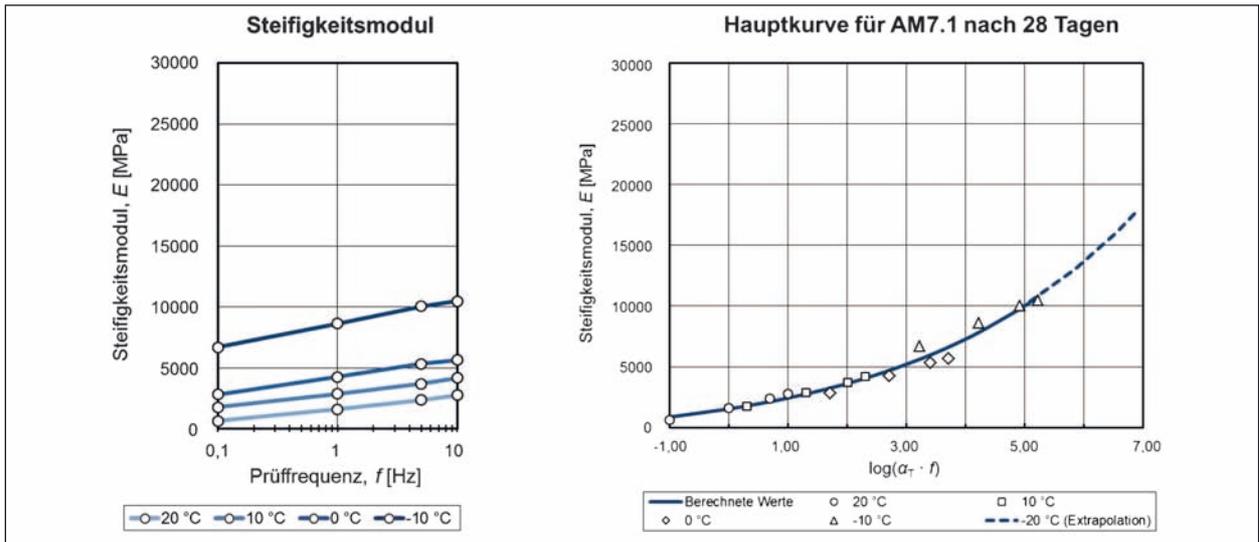


Bild 82: Hauptkurve der Variante AM7.1 nach 28 Tagen Lagerung

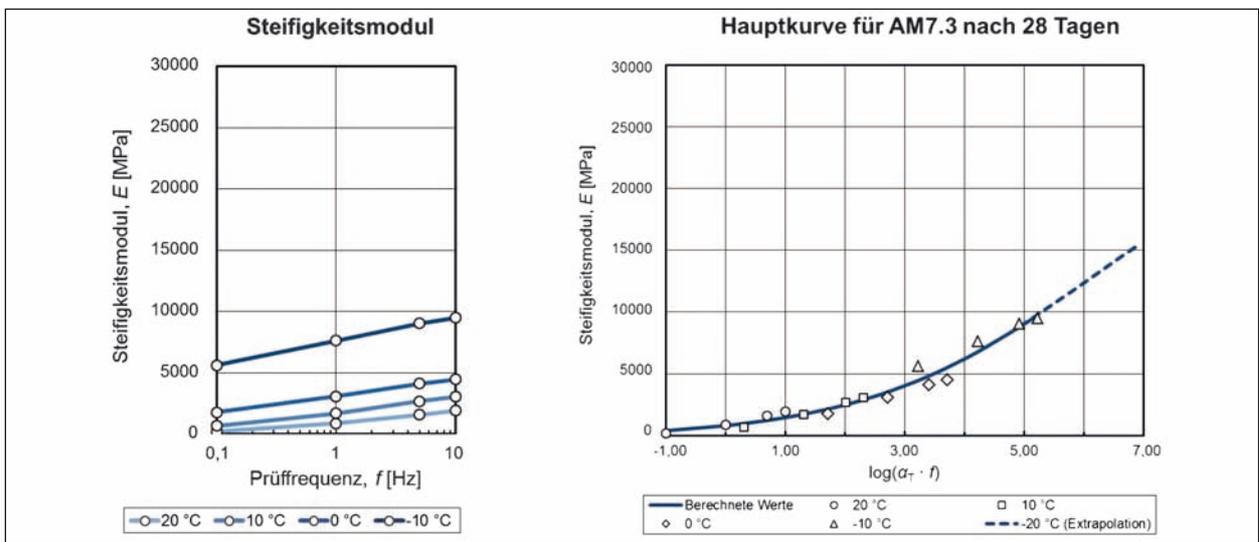


Bild 83: Hauptkurve der Variante AM7.3 nach 28 Tagen Lagerung

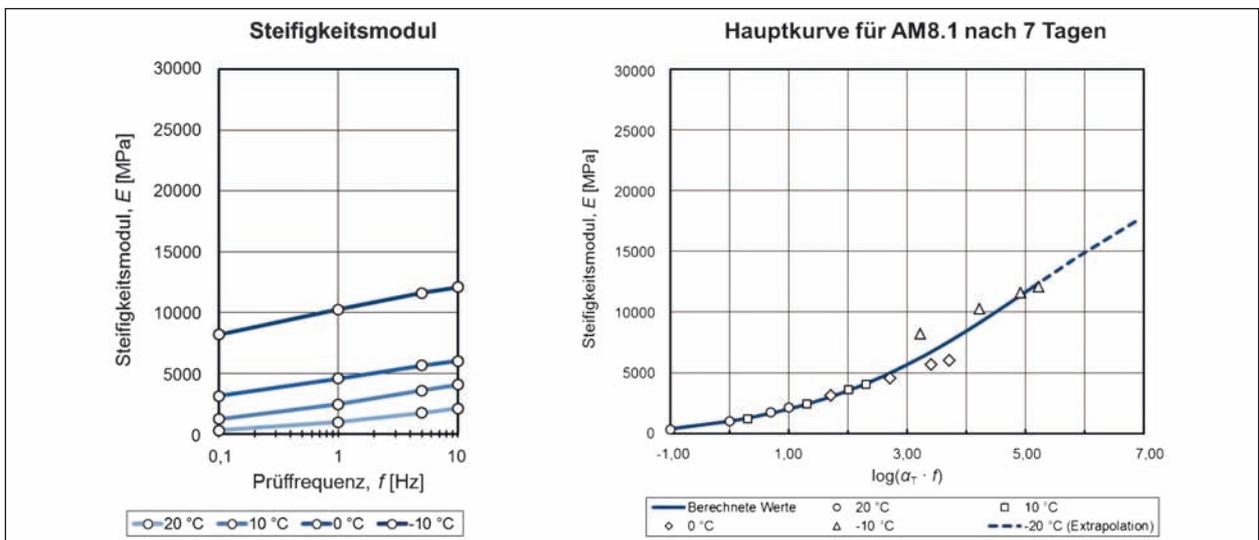


Bild 84: Hauptkurve der Variante AM8.1 nach 7 Tagen Lagerung

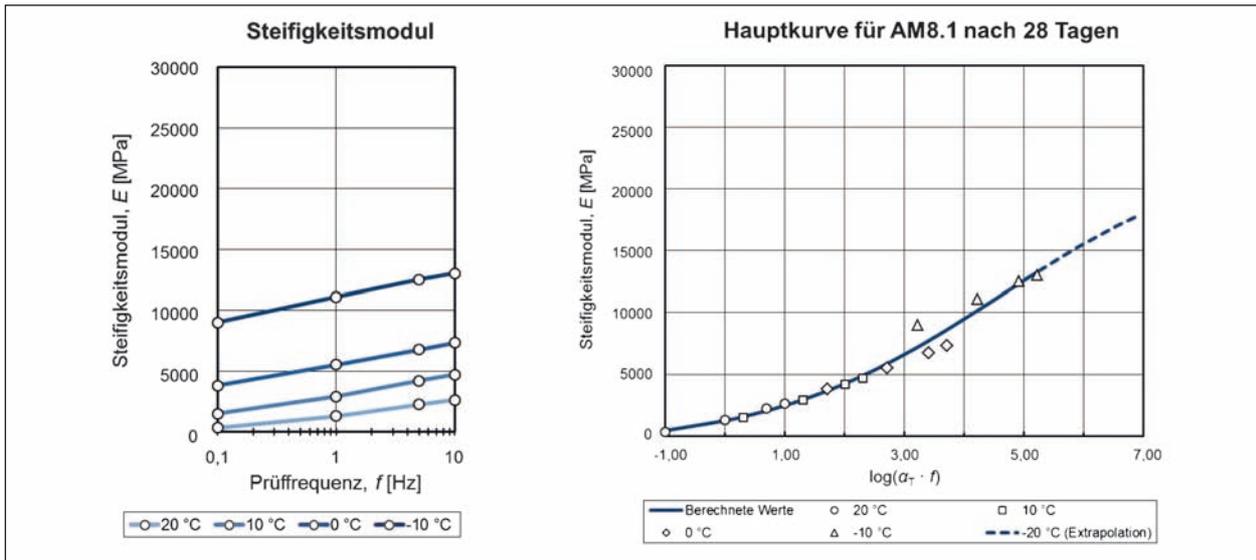


Bild 85: Hauptkurve der Variante AM8.1 nach 28 Tagen Lagerung

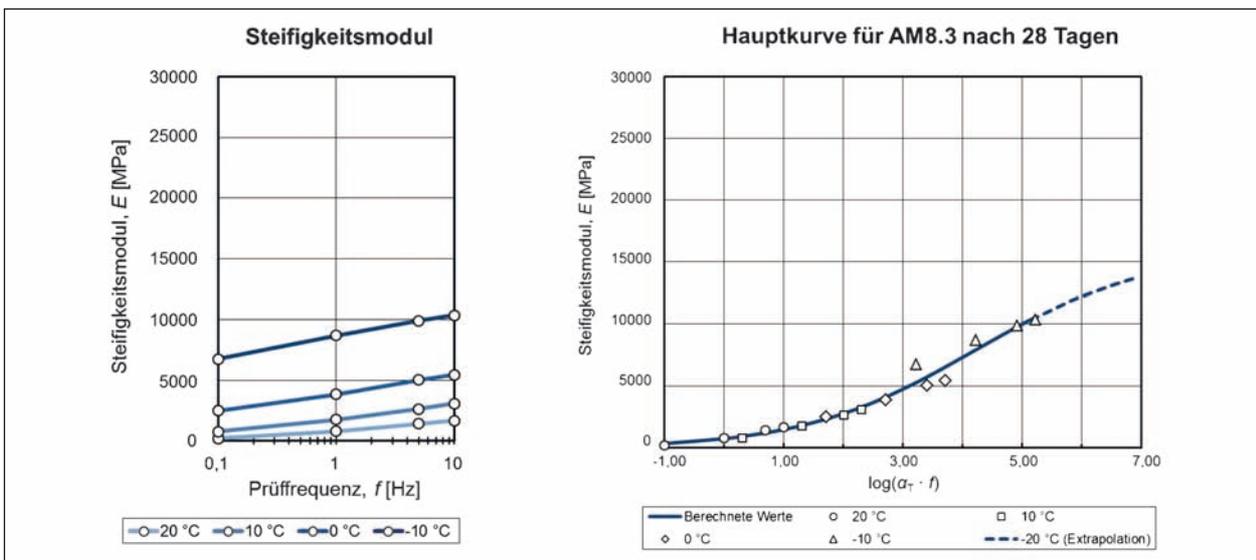


Bild 86: Hauptkurve der Variante AM8.3 nach 28 Tagen Lagerung

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM5.1 nach 7 Tagen	AM5.1 nach 28 Tagen	AM5.3 nach 28 Tagen
10	-20	16.029	16.873	17.995
	-10	11.224	13.467	13.639
	0	7.066	9.441	8.395
	10	4.111	5.808	4.251
	20	2.246	3.163	1.824
	30	1.133	1.480	599
	40	479	479	10
5	-20	15.172	16.346	17.357
	-10	10.341	12.707	12.629
	0	6.348	8.622	7.394
	10	3.610	5.124	3.569
	20	1.923	2.681	1.445
	30	931	1.170	405
	40	353	286	-89
1	-20	13.110	14.942	15.578
	-10	8.383	10.844	10.179
	0	4.858	6.793	5.292
	10	2.616	3.708	2.276
	20	1.299	1.734	766
	30	546	580	65
	40	115	-72	-260
0,1	-20	10.146	12.533	12.398
	-10	5.925	8.121	6.798
	0	3.165	4.498	2.978
	10	1.555	2.124	1.036
	20	657	750	158
	30	159	-7	-230
	40	-122	-421	-406

Tab. 73: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM5 nach 7 und 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

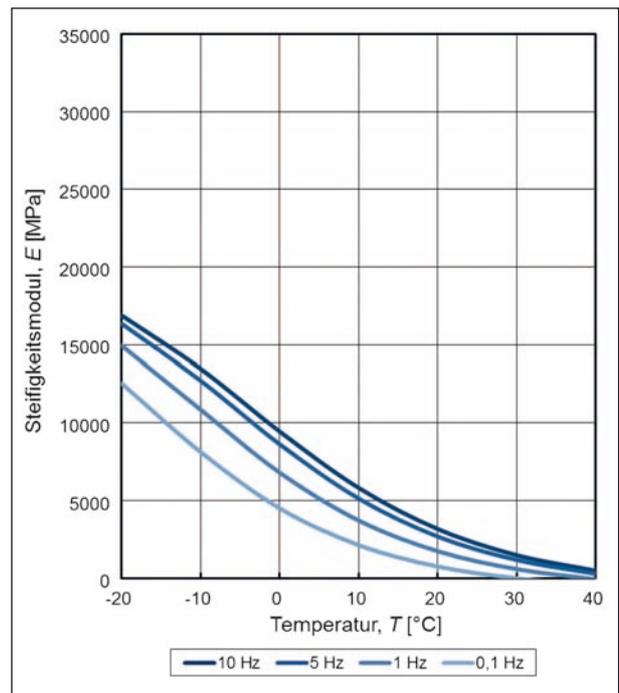


Bild 88: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM5.1 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

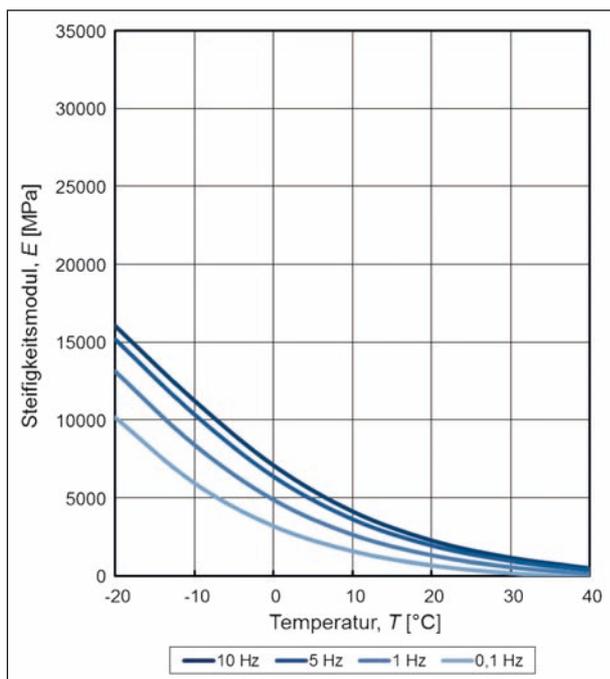


Bild 87: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM5.1 nach 7 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

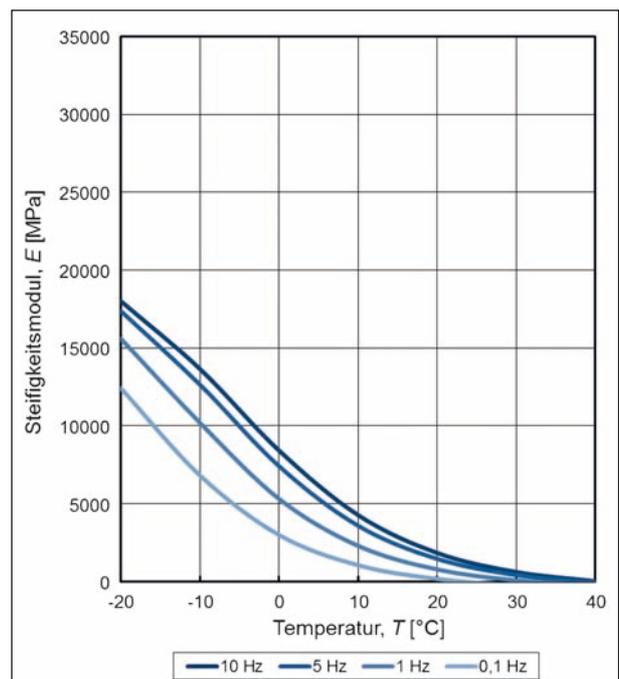


Bild 89: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM5.3 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM6.1 nach 7 Tagen	AM6.1 nach 28 Tagen	AM6.3 nach 28 Tagen
10	-20	14.997	16.956	15.507
	-10	10.947	12.085	11.484
	0	6.537	8.544	7.378
	10	3.332	5.937	4.195
	20	1.546	3.991	2.150
	30	665	2.518	959
	40	243	1.389	292
5	-20	14.378	15.965	14.850
	-10	10.062	11.312	10.657
	0	5.742	7.935	6.620
	10	2.824	5.451	3.645
	20	1.273	3.600	1.800
	30	525	2.200	749
	40	172	1.127	167
1	-20	12.701	13.829	13.160
	-10	7.987	9.650	8.735
	0	4.117	6.629	5.013
	10	1.875	4.413	2.554
	20	785	2.765	1.134
	30	282	1.520	358
	40	49	568	-62
0,1	-20	9.863	11.144	10.472
	-10	5.275	7.571	6.168
	0	2.388	5.001	3.155
	10	978	3.122	1.405
	20	349	1.728	470
	30	70	678	-21
	40	-57	-125	-280

Tab. 74: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM6 nach 7 und 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

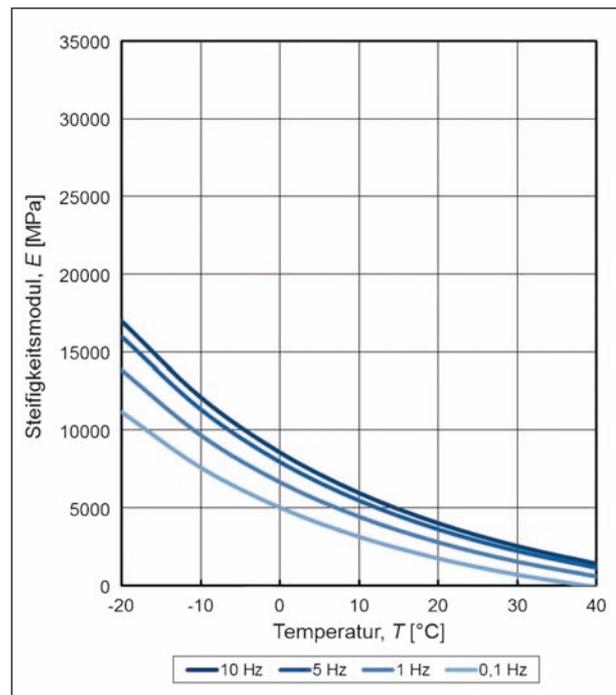


Bild 91: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM6.1 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

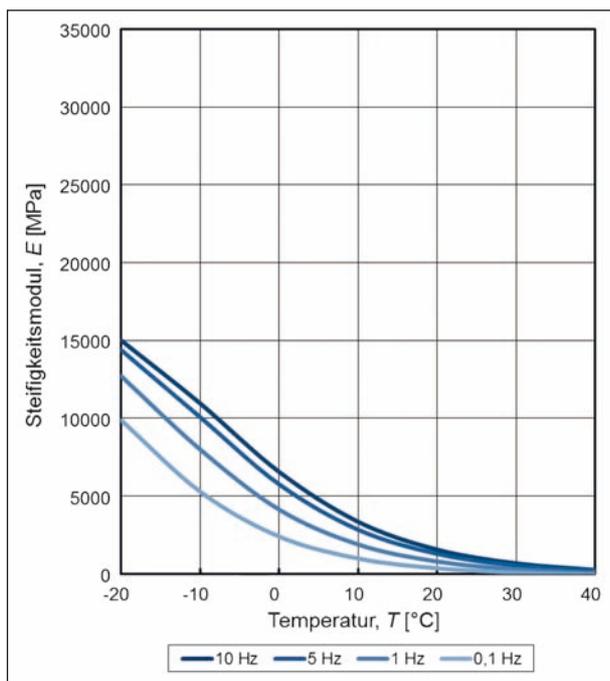


Bild 90: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM6.1 nach 7 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

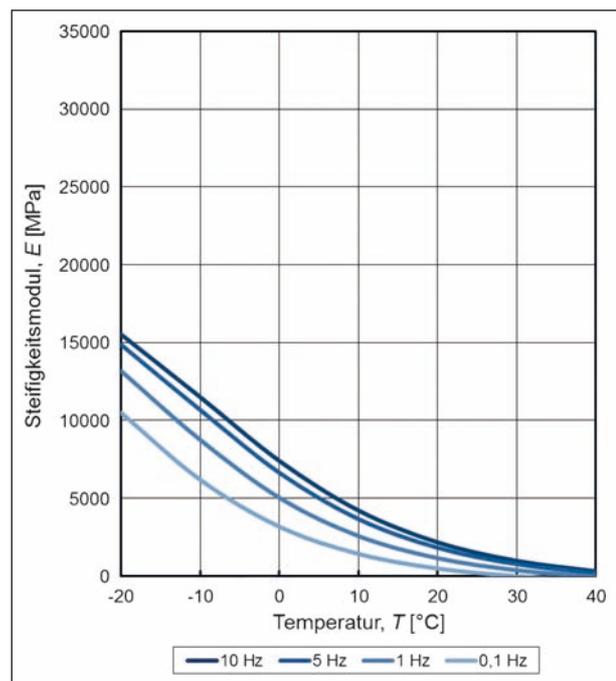


Bild 92: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM6.3 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM7.1 nach 7 Tagen	AM7.1 nach 28 Tagen	AM7.3 nach 28 Tagen
10	-20	16.939	17.582	15.250
	-10	12.876	10.744	9.746
	0	8.170	6.619	5.511
	10	4.460	4.063	2.900
	20	2.232	2.434	1.461
	30	1.067	1.371	697
	40	484	658	291
5	-20	16.328	16.085	14.234
	-10	11.960	9.781	8.799
	0	7.278	5.984	4.843
	10	3.841	3.634	2.496
	20	1.877	2.138	1.231
	30	877	1.160	567
	40	384	506	217
1	-20	14.657	13.041	11.844
	-10	9.760	7.829	6.788
	0	5.399	4.700	3.525
	10	2.654	2.767	1.732
	20	1.229	1.538	806
	30	539	736	331
	40	208	200	82
0,1	-20	11.752	9.576	8593
	-10	6.746	5.616	4.460
	0	3.301	3.249	2.148
	10	1.487	1.789	977
	20	633	862	397
	30	239	258	107
	40	54	-146	-44

Tab. 75: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM7 nach 7 und 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

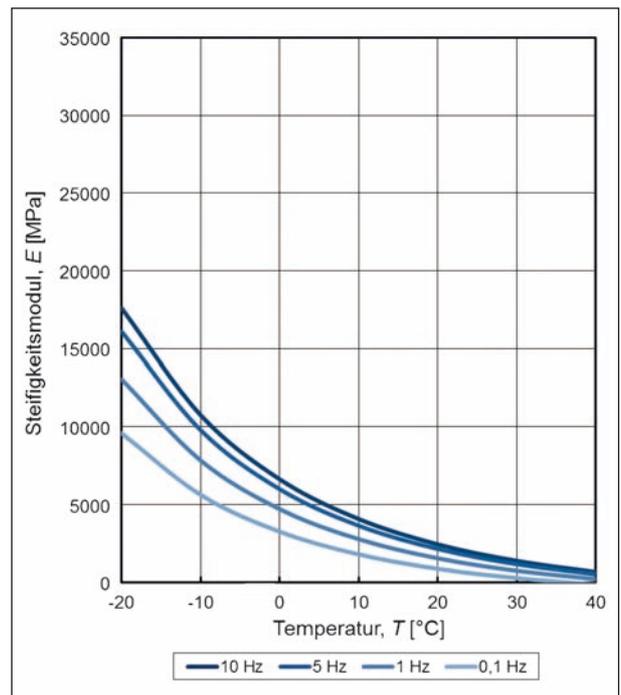


Bild 94: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM7.1 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

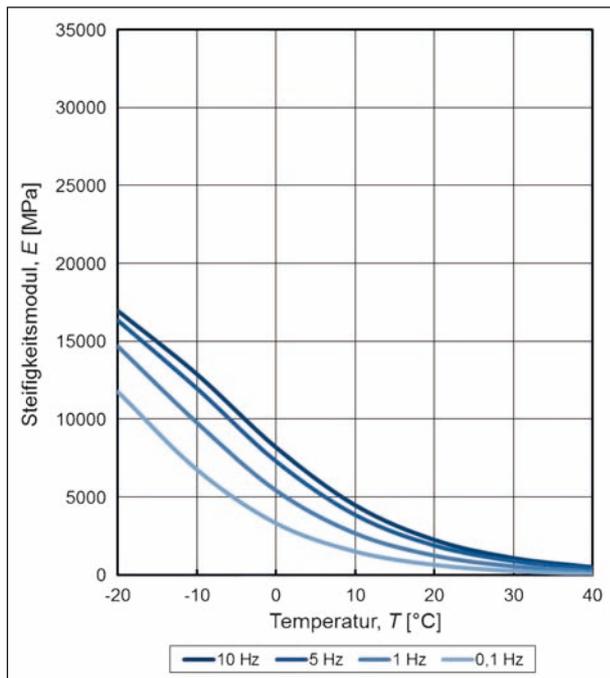


Bild 93: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM7.1 nach 7 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

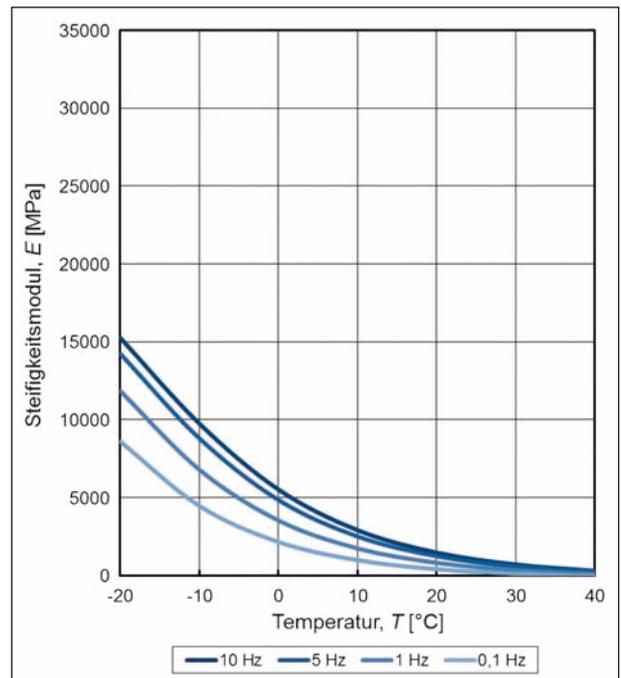


Bild 95: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM7.3 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM8.1 nach 7 Tagen	AM8.1 nach 28 Tagen	AM8.3 nach 28 Tagen
10	-20	17.417	17.685	13.622
	-10	12.385	13.263	10.561
	0	7.585	8.614	6.526
	10	4.120	4.908	3.284
	20	2.022	2.475	1.468
	30	853	1.039	615
	40	219	226	234
5	-20	16.575	16.971	13.200
	-10	11.391	12.338	9.804
	0	6.739	7.740	5.738
	10	3.545	4.257	2.763
	20	1.674	2.055	1.198
	30	652	784	487
	40	102	74	173
1	-20	14.445	15.121	11.970
	-10	9.132	10.166	7.922
	0	4.988	5.869	4.090
	10	2.427	2.959	1.797
	20	1.022	1.250	728
	30	281	308	268
	40	-110	-206	71
0,1	-20	11.169	12.130	9.630
	-10	6.241	7.216	5.269
	0	3.040	3.676	2.317
	10	1.286	1.579	912
	20	386	443	328
	30	-71	-155	89
	40	-308	-474	-12

Tab. 76: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM8 nach 7 und 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

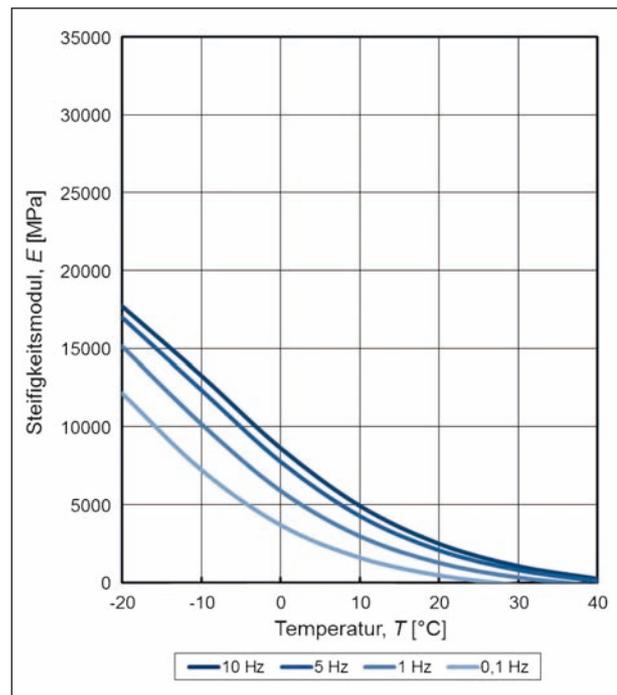


Bild 97: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM8.1 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

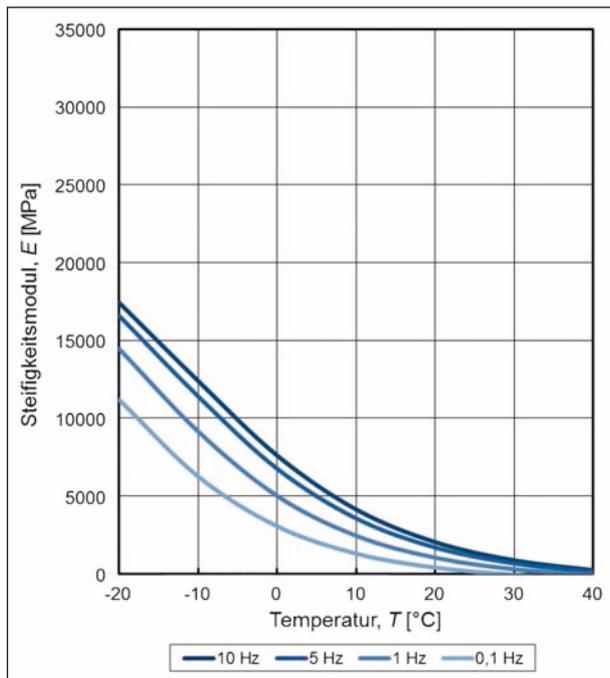


Bild 96: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM8.1 nach 7 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

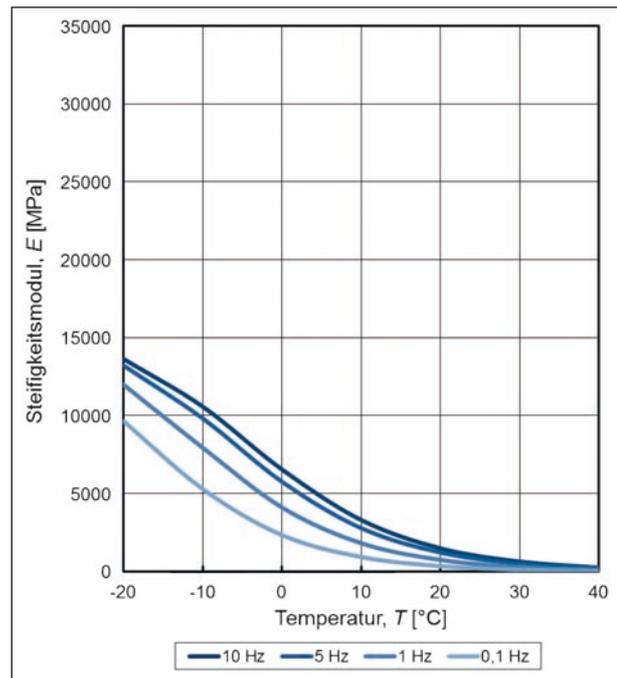


Bild 98: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM8.3 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

6.3.3 Steifigkeiten der Varianten mit AG1

Die Steifigkeiten der Kaltasphaltvarianten mit dem Asphaltgranulat mit geringer Bindemittelverhärtung (AG1) sind in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und der Prüffrequenz in Tabelle 77 bis Tabelle 79 tabellarisch und in Bild 99 bis Bild 107 grafisch dargestellt. Darüber hinaus sind die aus den Prüfergebnissen prognostizierten Werte der Steifigkeiten für den Temperaturbereich von -20 bis 40 °C in Tabelle 80 bis Tabelle 82 und in Bild 108 bis Bild 116 aufgeführt.

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM1.1 nach 7 Tagen	AM1.1 nach 28 Tagen	AM1.3 nach 28 Tagen
20	10	3.231	3.335	2.720
	5	2.782	2.263	2.234
	1	1.862	1.951	1.358
	0,1	636	663	435
10	10	4.629	4.729	4.755
	5	4.106	4.220	4.075
	1	2.912	3.015	2.508
	0,1	1.587	1.503	1.000
0	10	6.307	6.507	9.200
	5	6.004	6.201	8.141
	1	4.792	4.850	6.049
	0,1	3.010	3.105	3.614
-10	10	15.629	15.900	13.859
	5	14.770	14.810	12.989
	1	13.016	13.151	11.138
	0,1	10.226	10.310	8.412

Tab. 77: Steifigkeiten der Variante AM1 nach 7 und 28 Tagen

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM2.1 nach 7 Tagen	AM2.1 nach 28 Tagen	AM2.3 nach 28 Tagen
20	10	7.375	2.857	2.536
	5	6.780	2.481	2.142
	1	4.750	1.720	1.377
	0,1	4.063	786	557
10	10	10.482	4.841	4.377
	5	9.422	4.330	3.756
	1	7.884	3.073	2.663
	0,1	6.191	1.829	1.505
0	10	12.040	7.147	6.847
	5	11.500	6.507	6.074
	1	10.000	5.347	4.624
	0,1	8.126	3.758	2.900
-10	10	15.533	12.385	12.057
	5	15.112	12.052	11.590
	1	13.786	10.924	10.035
	0,1	12.092	9.052	7.725

Tab. 78: Steifigkeiten der Variante AM2 nach 7 und 28 Tagen

Temp. T [°C]	Frequenz f [Hz]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM3.1 nach 7 Tagen	AM3.1 nach 28 Tagen	AM3.3 nach 28 Tagen
20	10	3.593	3.850	2.556
	5	3.091	3.440	2.176
	1	2.220	2.369	1.390
	0,1	1.197	1.310	590
10	10	5.235	5.692	4.632
	5	4.610	5.116	3.817
	1	3.496	3.950	2.684
	0,1	2.189	2.574	1.537
0	10	7.658	7.722	6.759
	5	7.085	7.255	6.152
	1	5.829	5.991	4.801
	0,1	4.145	4.345	3.135
-10	10	14.201	14.344	12.680
	5	13.564	13.950	12.046
	1	12.176	12.472	10.424
	0,1	10.142	10.569	8.222

Tab. 79: Steifigkeiten der Variante AM3 nach 7 und 28 Tagen

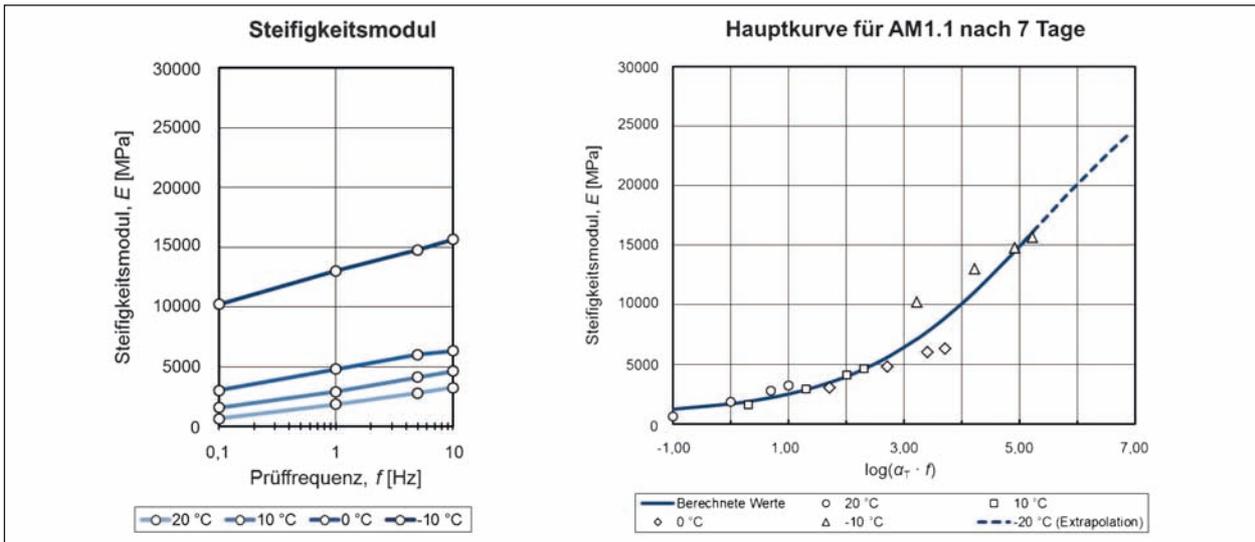


Bild 99: Hauptkurve der Variante AM1.1 nach 7 Tagen Lagerung

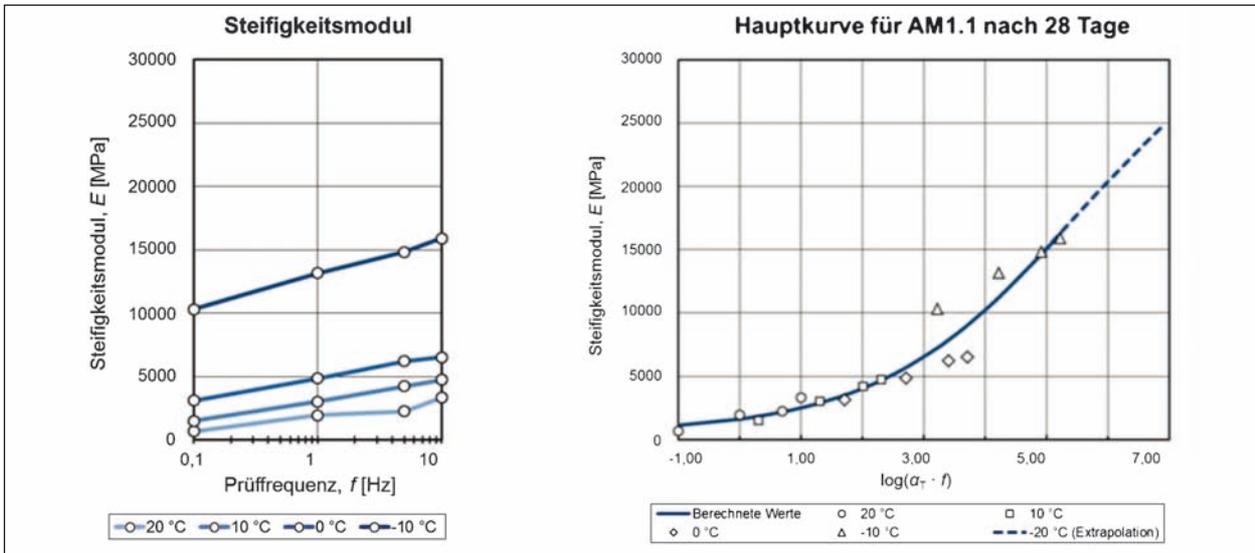


Bild 100: Hauptkurve der Variante AM1.1 nach 28 Tagen Lagerung

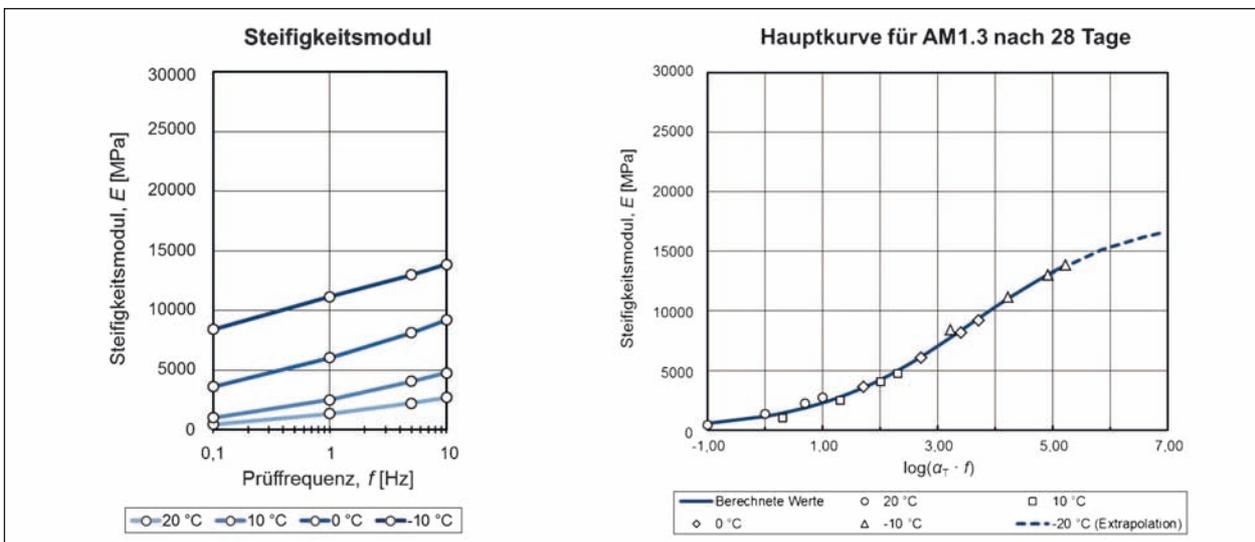


Bild 101: Hauptkurve der Variante AM1.3 nach 28 Tagen Lagerung

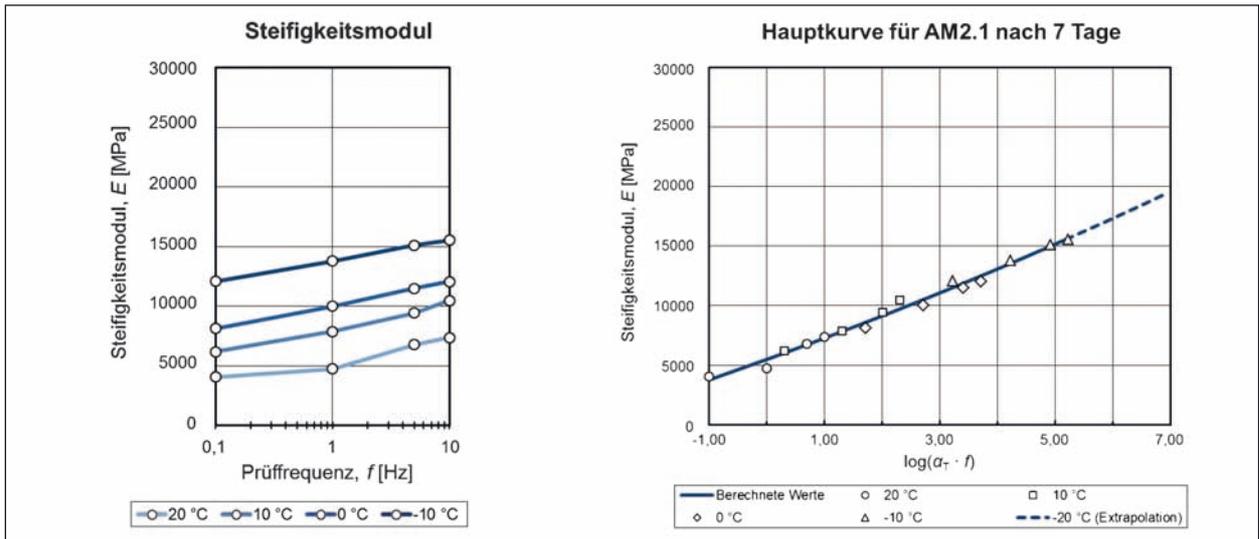


Bild 102: Hauptkurve der Variante AM2.1 nach 7 Tagen Lagerung

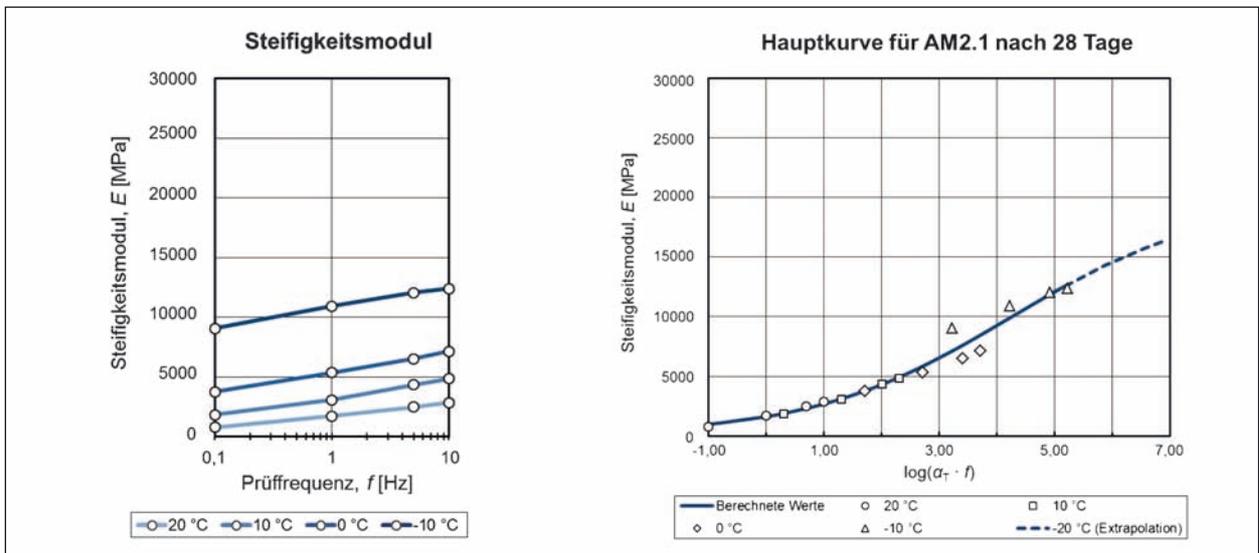


Bild 103: Hauptkurve der Variante AM2.1 nach 28 Tagen Lagerung

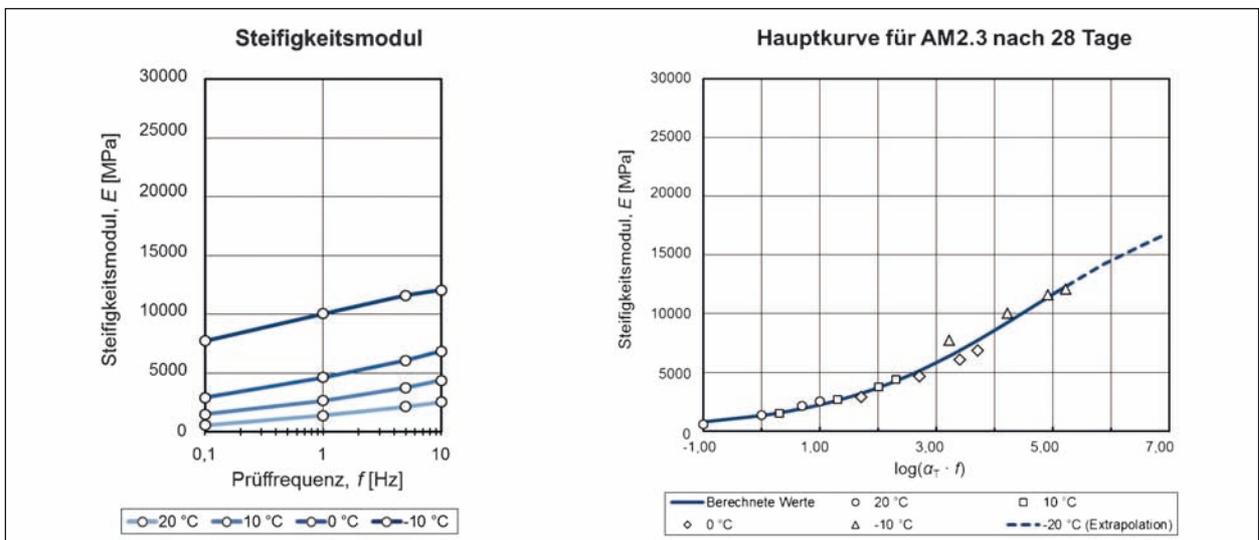


Bild 104: Hauptkurve der Variante AM2.3 nach 28 Tagen Lagerung

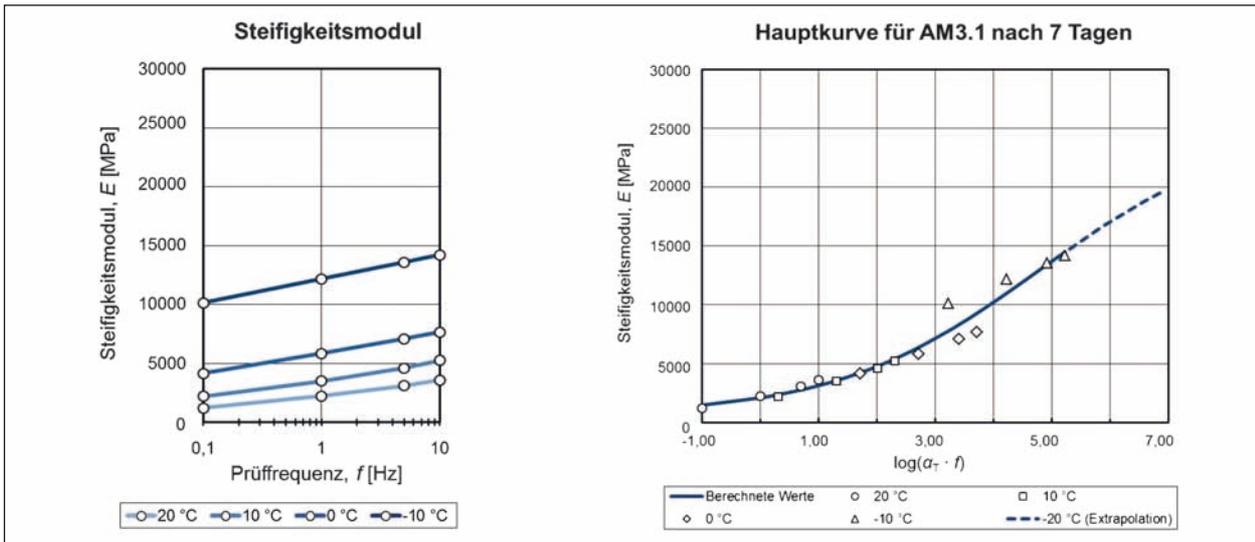


Bild 105: Hauptkurve der Variante AM3.1 nach 7 Tagen Lagerung

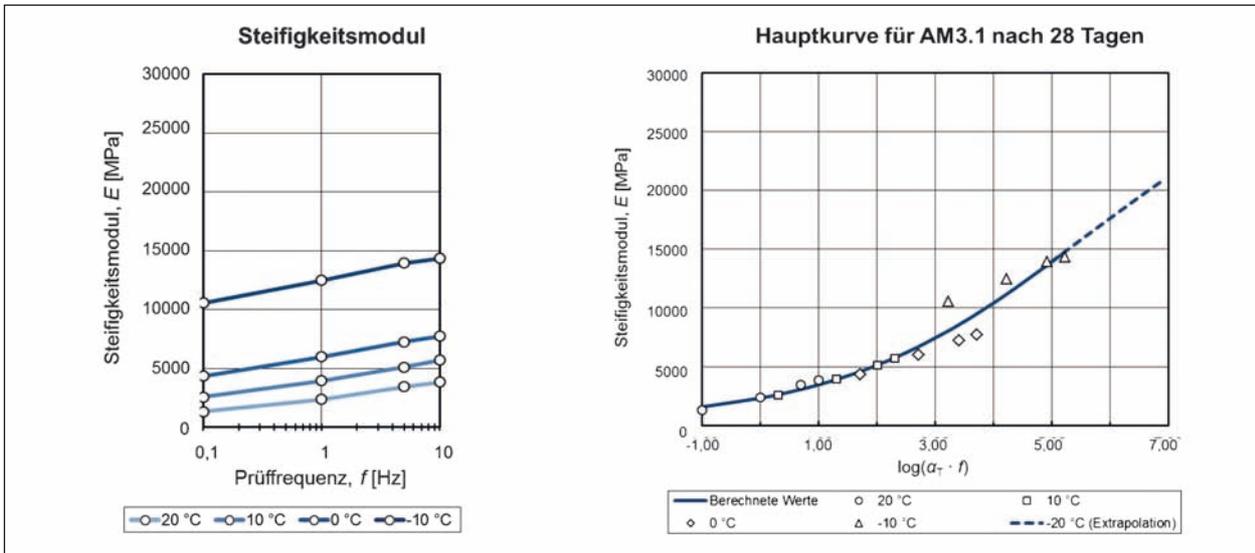


Bild 106: Hauptkurve der Variante AM3.1 nach 28 Tagen Lagerung

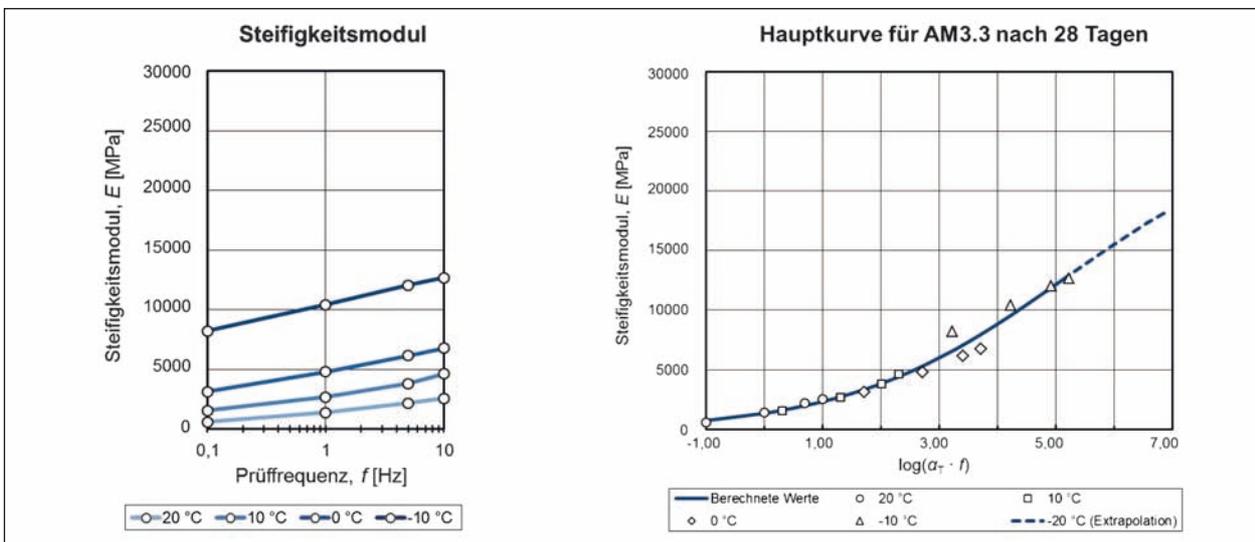


Bild 107: Hauptkurve der Variante AM3.3 nach 28 Tagen Lagerung

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM1.1 nach 7 Tagen	AM1.1 nach 28 Tagen	AM1.3 nach 28 Tagen
10	-20	24.163	24.572	16.482
	-10	16.075	16.255	13.824
	0	8.903	9.045	9.376
	10	4.602	4.685	4.997
	20	2.507	2.507	2.282
	30	1.554	1.488	987
	40	1.121	1.011	424
5	-20	22.825	23.171	16.151
	-10	14.508	14.675	13.074
	0	7.770	7.903	8.376
	10	3.985	4.050	4.233
	20	2.205	2.187	1.871
	30	1.409	1.329	795
	40	1.050	931	337
1	-20	19.386	19.621	15.123
	-10	11.091	11.243	11.040
	0	5.591	5.696	6.150
	10	2.876	2.897	2.783
	20	1.680	1.624	1.156
	30	1.160	1.055	473
	40	929	794	193
0,1	-20	14.163	14.329	12.895
	-10	7.126	7.253	7.762
	0	3.468	3.514	3.568
	10	1.885	1.846	1.435
	20	1.228	1.130	560
	30	950	818	217
	40	827	677	81

Tab. 80: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM1 nach 7 und 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

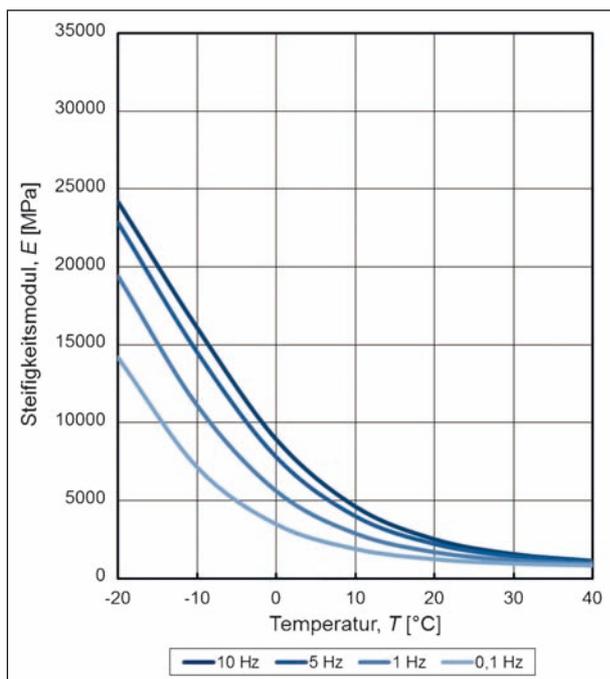


Bild 108: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM1 nach 7 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

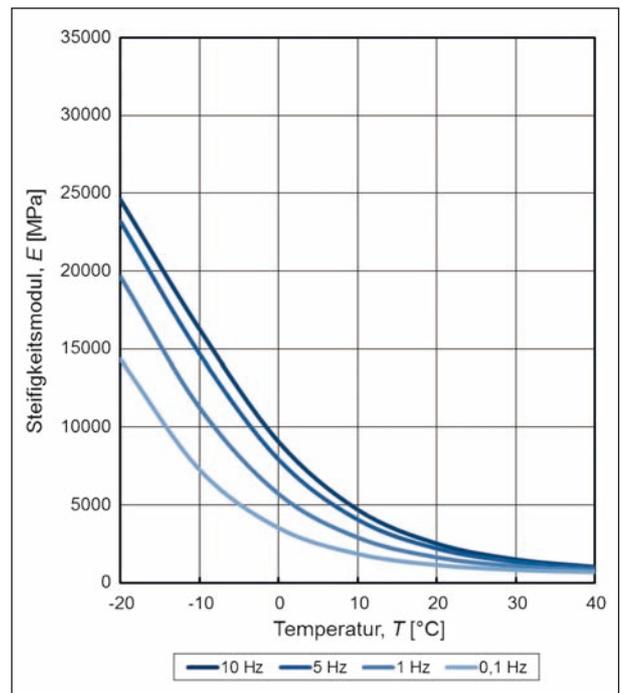


Bild 109: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM1.1 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

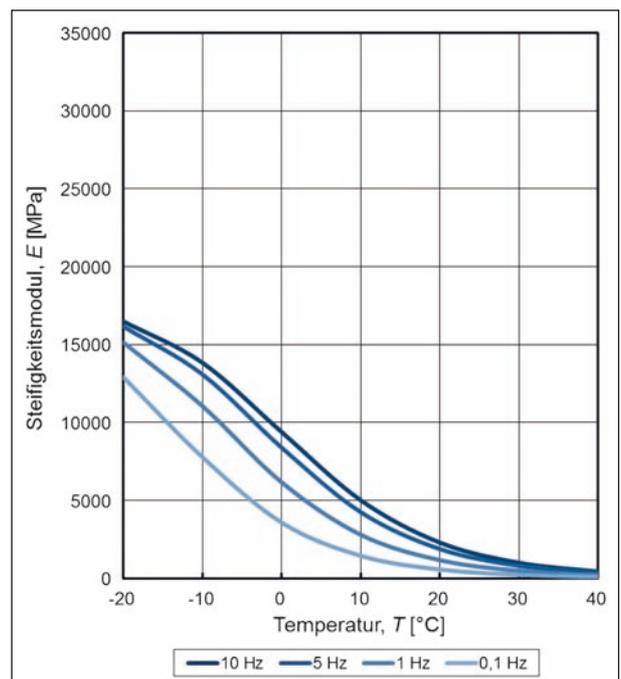


Bild 110: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM1.3 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM2.1 nach 7 Tagen	AM2.1 nach 28 Tagen	AM2.3 nach 28 Tagen
10	-20	19.236	16.279	16.542
	-10	15.641	12.688	12.326
	0	12.492	8.446	7.734
	10	9.721	4.928	4.272
	20	7.270	2.682	2.236
	30	5.092	1.440	1.176
	40	3.148	790	643
5	-20	18.558	15.738	15.890
	-10	15.000	11.875	11.411
	0	11.886	7.618	6.890
	10	9.146	4.317	3.704
	20	6.724	2.310	1.913
	30	4.572	1.231	1.002
	40	2.651	675	551
1	-20	17.008	14.263	14.141
	-10	13.539	9.899	9.257
	0	10.505	5.839	5.137
	10	7.837	3.118	2.620
	20	5.481	1.617	1.323
	30	3.389	853	693
	40	1.523	469	388
0,1	-20	14.858	11.689	11.205
	-10	11.513	7.120	6.391
	0	8.592	3.776	3.210
	10	6.027	1.896	1.559
	20	3.762	959	779
	30	1.754	506	417
	40	-36	284	244

Tab. 81: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM2 nach 7 und 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

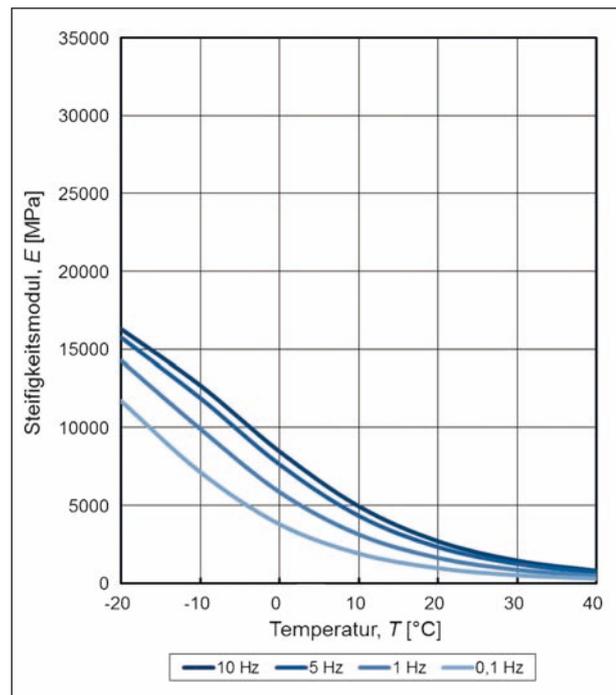


Bild 112: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM2.1 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

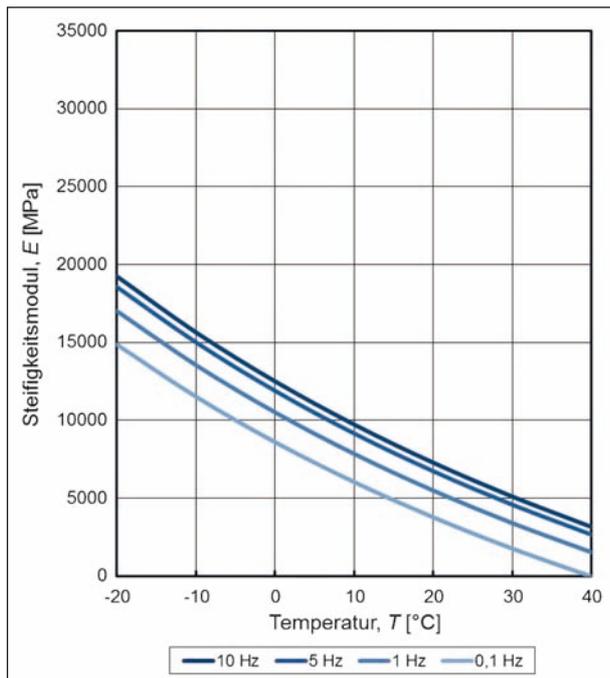


Bild 111: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM2.1 nach 7 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

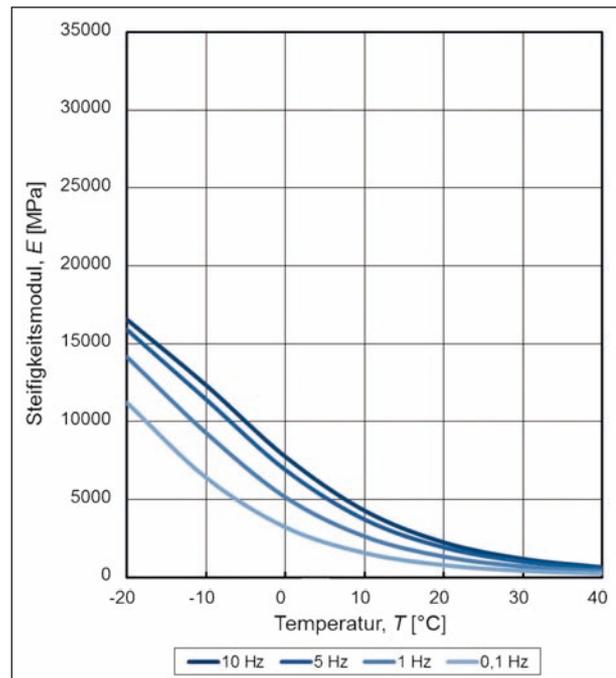


Bild 113: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM2.3 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

Frequenz f [Hz]	Temp. T [°C]	Steifigkeit, E [MPa]		
		AM3.1 nach 7 Tagen	AM3.1 nach 28 Tagen	AM3.3 nach 28 Tagen
10	-20	19.491	20.674	18.137
	-10	14.487	14.758	12.919
	0	9.268	9.498	7.954
	10	5.408	5.770	4.423
	20	3.132	3.468	2.327
	30	1.928	2.136	1.184
	40	1.311	1.378	575
5	-20	18.698	19.640	17.267
	-10	13.432	13.647	11.887
	0	8.324	8.588	7.086
	10	4.775	5.146	3.844
	20	2.767	3.078	1.985
	30	1.728	1.899	989
	40	1.203	1.235	465
1	-20	16.608	17.111	15.058
	-10	10.980	11.170	9.548
	0	6.371	6.707	5.301
	10	3.563	3.920	2.729
	20	2.097	2.332	1.347
	30	1.370	1.454	634
	40	1.010	969	265
0,1	-20	13.195	13.402	11.657
	-10	7.768	8.053	6.576
	0	4.224	4.595	3.338
	10	2.365	2.636	1.604
	20	1.470	1.582	735
	30	1.044	1.017	301
	40	837	710	80

Tab. 82: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM3 nach 7 und 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C

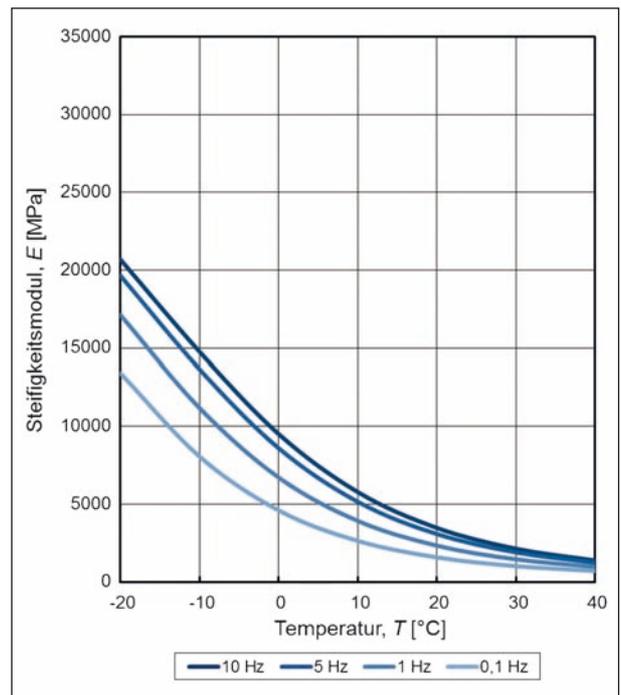


Bild 115: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM3.1 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

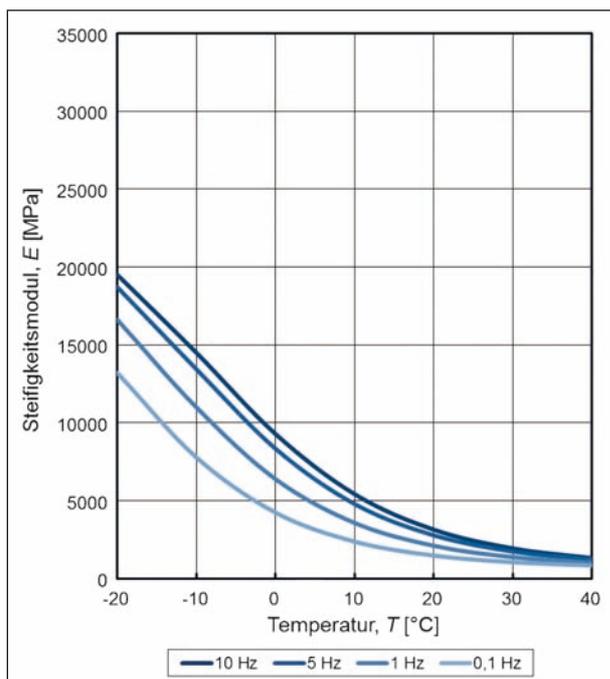


Bild 114: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM3.1 nach 7 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

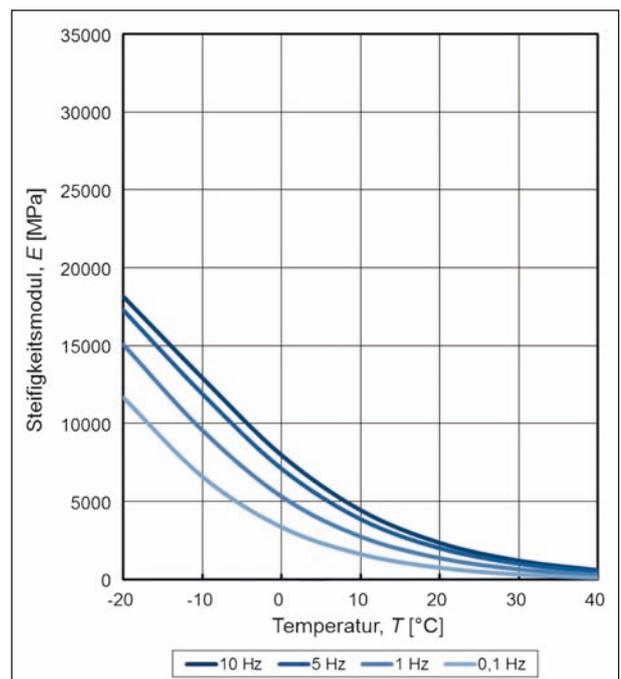


Bild 116: Prognostizierte Steifigkeiten der Variante AM3.3 nach 28 Tagen im Temperaturbereich von -20 bis 40 °C für vier Prüffrequenzen

6.4 Ermüdungsfunktion

Zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion sind dynamische Spaltzug-Schwellversuche mit mindestens drei unterschiedlichen Spannungsamplituden (Variation der Oberspannung) erforderlich. Die anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen im Probekörpermittelpunkt müssen dabei in einem Bereich von 0,05 bis 0,30 ‰ liegen. Die Unterspannung wird während des Versuches mit 0,035 MPa konstant gehalten. Die hier durchgeführten Ermüdungsversuche wurden einheitlich mit einer Belastungsfrequenz von 10 Hz durchgeführt. Die Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums sollte in einem Bereich von ca. 103 bis 106 liegen.

Als Ermüdungslastwechselzahl wird die Lastwechselzahl N_{Makro} definiert, bei welcher während des Ermüdungsversuches der Beginn des Auftretens von Makrorissen im Probekörper beobachtet werden kann. Der weitere Versuchsverlauf ist durch schnell fortschreitende Rissbildung gekennzeichnet, welche zum völligen Versagen des Probekörpers führt. Die Lastwechselzahl N_{Makro} wird nach der Methode der dissipierten Energie bestimmt. Hierfür wird zunächst die sogenannte „Energy Ratio“ ER als Produkt aus der Lastwechselzahl N

und dem für N berechneten absoluten E-Modul $|E(N)|$ definiert:

$$ER(N) = |E(N)| \cdot N$$

mit

ER(N) [MPa] Energy Ratio

$|E(N)|$ [MPa] bei dem betrachteten Lastwechsel berechneter absoluter E-Modul

N [-] zugehörige Lastwechselzahl

Wird ER(N) als Funktion von N dargestellt, so kann anhand des Verlaufs dieser Funktion die Ermüdungslastwechselzahl für das Kriterium Makroriss N_{Makro} bei dem Maximum der ER(N) ermittelt werden.

Aus den Ergebnissen der Ermüdungsuntersuchungen sind mithilfe einer mathematischen Regression Ermüdungsfunktionen abzuleiten, deren Bestimmtheitsmaß den in Tabelle 83 geforderten Forderungen erfüllen muss.

Die in den Kapiteln 6.4.1 bis 6.4.4 aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass nicht alle Prüfserien das für Asphalttragschichten erforderliche Bestimmtheitsmaß R_2 erreichen.

Material	Bestimmtheitsmaß
Asphaltdeckschicht	$R^2 > 0,90$
Asphaltbinderschicht	$R^2 > 0,90$
Asphalttragschicht	$R^2 > 0,80$

Tab. 83: Mindestanforderungen für das Bestimmtheitsmaß R^2 der Ermüdungsfunktionen nach dem AL SP-Asphalt

6.4.1 Ermüdungsfunktion der Referenzvarianten

Die Ermüdungsfunktionen der Referenzvarianten sind in Bild 117 und Bild 118 dargestellt. Die aus der Regression der Prüfergebnisse abgeleiteten Parameter der Ermüdungsfunktion sind in Tabelle 84 aufgeführt.

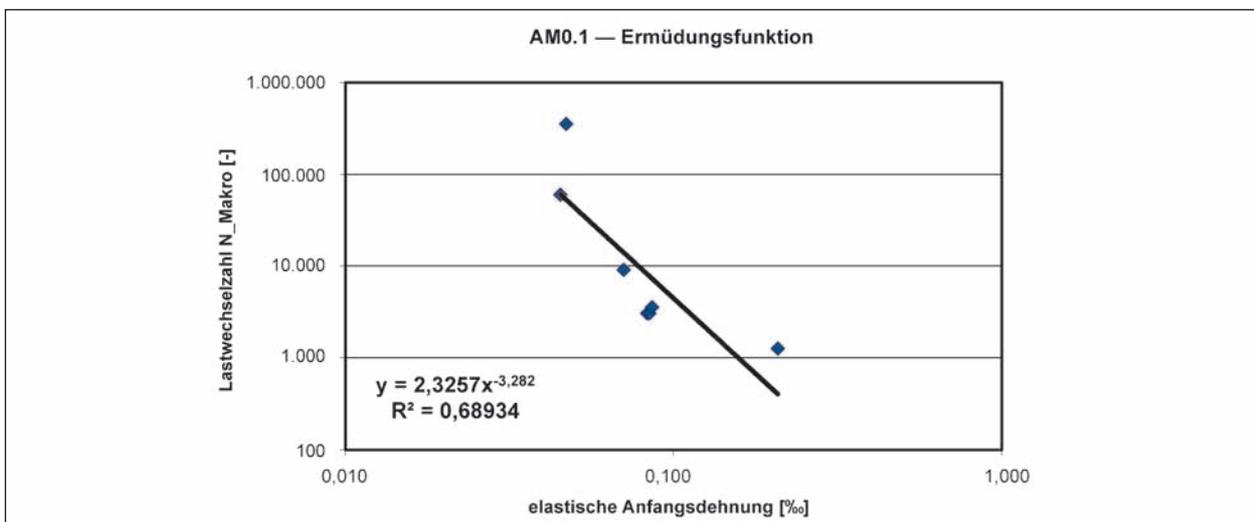


Bild 117: Ermüdungsfunktion der Referenzvariante AM0.1 (Asphaltgranulat aus BAB 30)

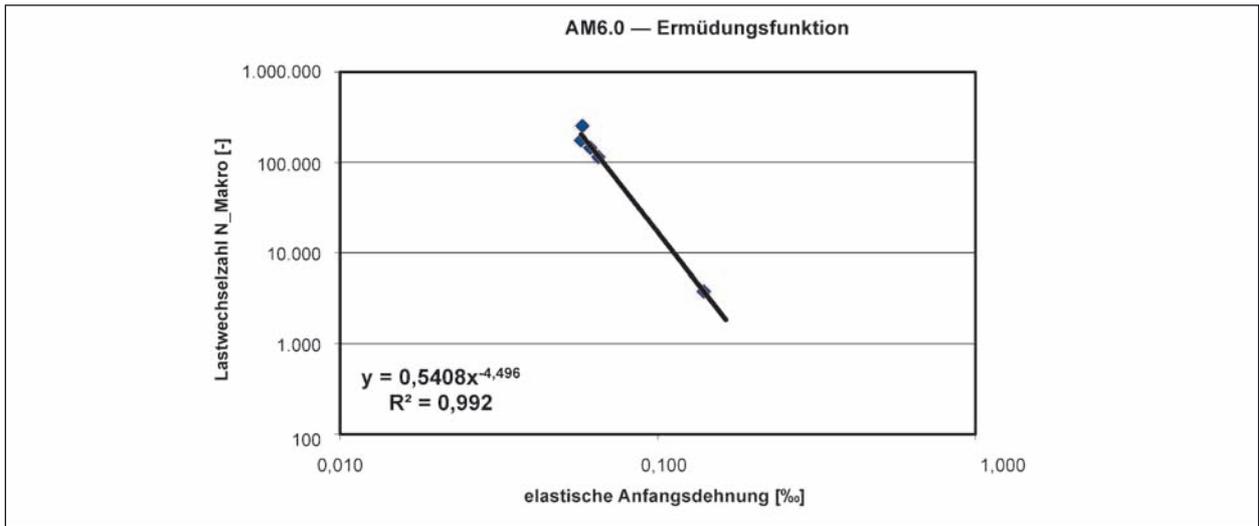


Bild 118: Ermüdungsfunktion der Referenzvariante AM6.0 mit AG3

Materialspezifische Parameter	Art des Asphaltmischgutes	
	AM0.1	AM6.0
C ¹	2,33	0,541
C ²	-3,282	-4,496
R ₂	0,6893	0,9920

6.4.2 Ermüdungsfunktion der Varianten mit AG3

Die Ermüdungsfunktionen der Kaltasphaltvarianten mit dem Asphaltgranulat AG3 (AG4 für AM8) sind in Bild 119 bis Bild 126 dargestellt. Die aus der Regression errechneten Parameter der Ermüdungsfunktion sind in Tabelle 85 aufgeführt.

Tab. 84: Regressionsparameter der Ermüdungsfunktionen der Referenzvarianten AM0.1 und AM6.0

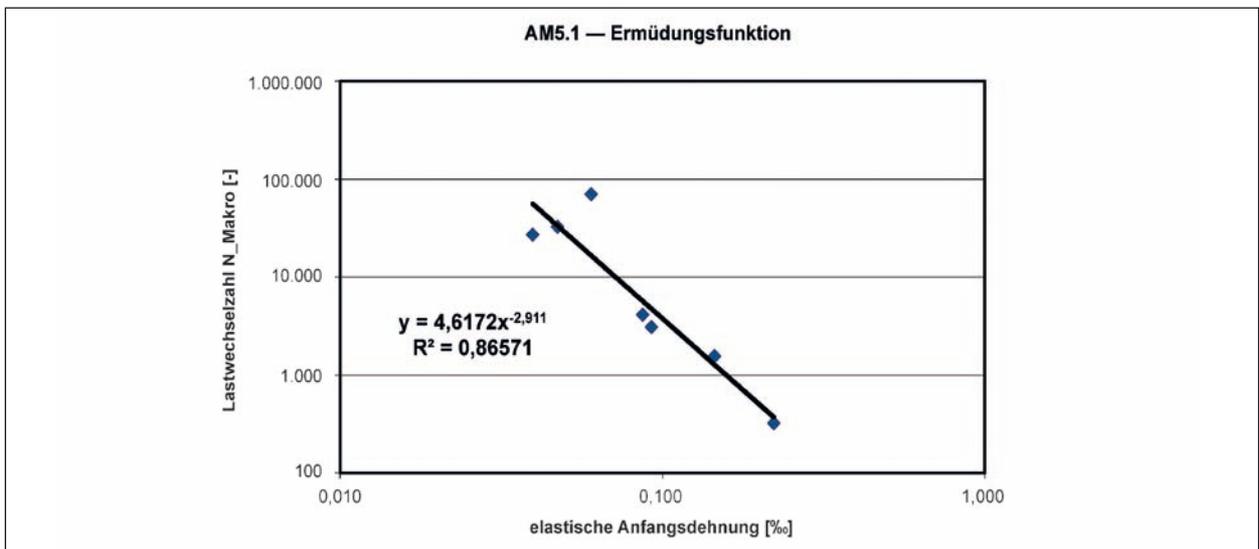


Bild 119: Ermüdungsfunktion der Variante AM5.1 mit AG3

Materialspezifische Parameter	Art des Asphaltmischgutes							
	AM5.1	AM5.3	AM6.1	AM6.3	AM7.1	AM7.3	AM8.1	AM8.3
C ₁	4,62	25,8	22,4	2,52	16,9	57,0	13,2	30,8
C ₂	-2,911	-1,703	-2,148	-2,526	-1,864	-1,549	-1,979	-1,755
R ²	0,8657	0,9402	0,9473	0,9630	0,9524	0,8686	0,9059	0,7908

Tab. 85: Materialspezifische Parameter der Ermüdungsfunktion der Varianten mit AG3

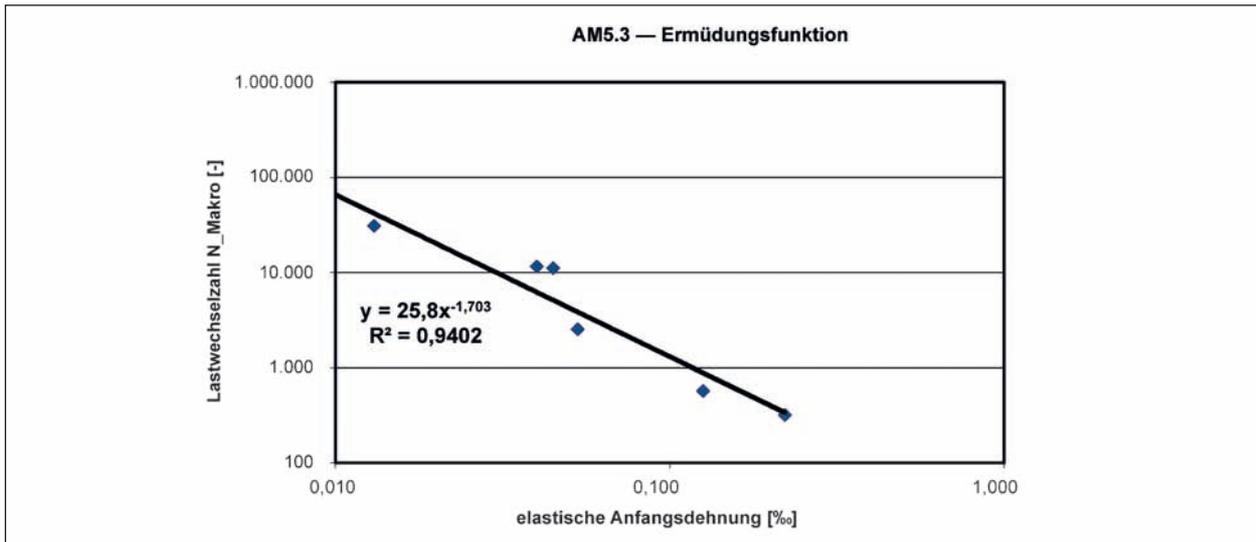


Bild 120: Ermüdungsfunktion der Variante AM5.3 mit AG3

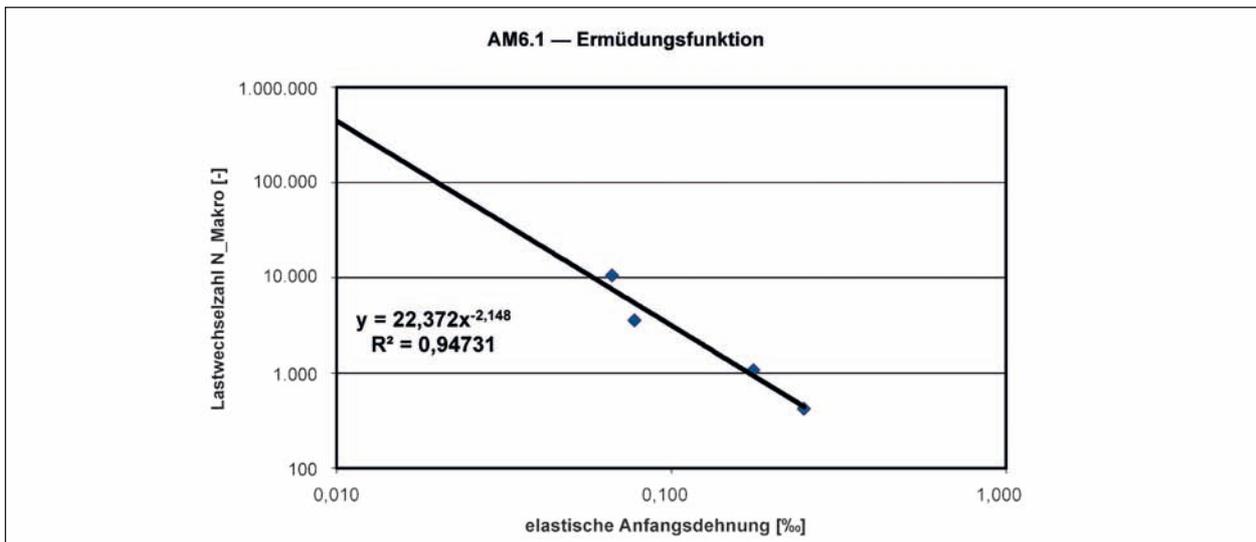


Bild 121: Ermüdungsfunktion der Variante AM6.1 mit AG3

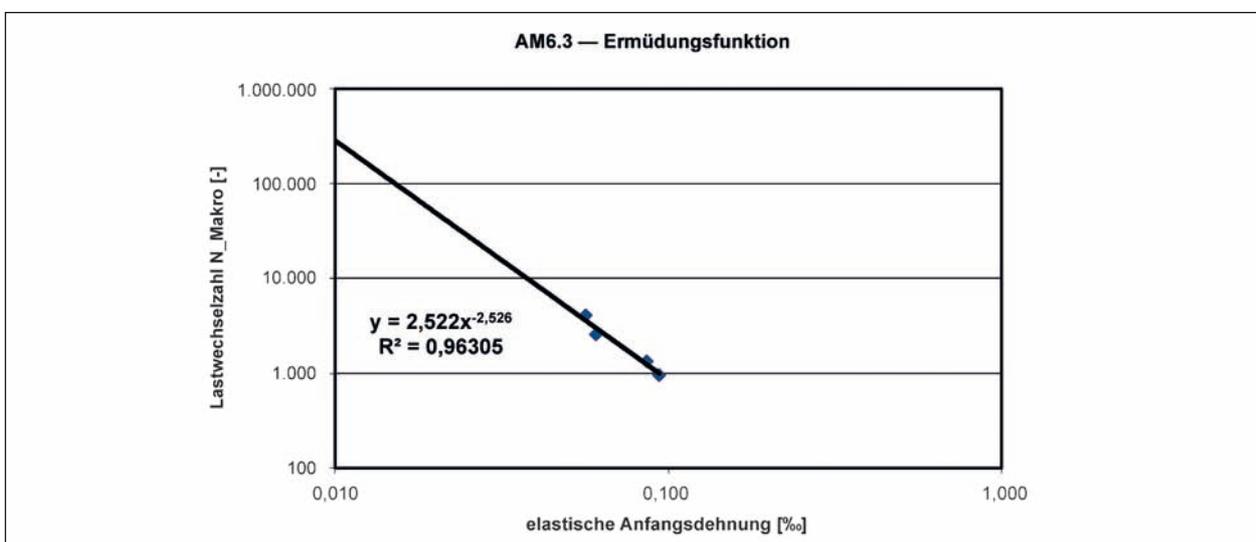


Bild 122: Ermüdungsfunktion der Variante AM6.3 mit AG3

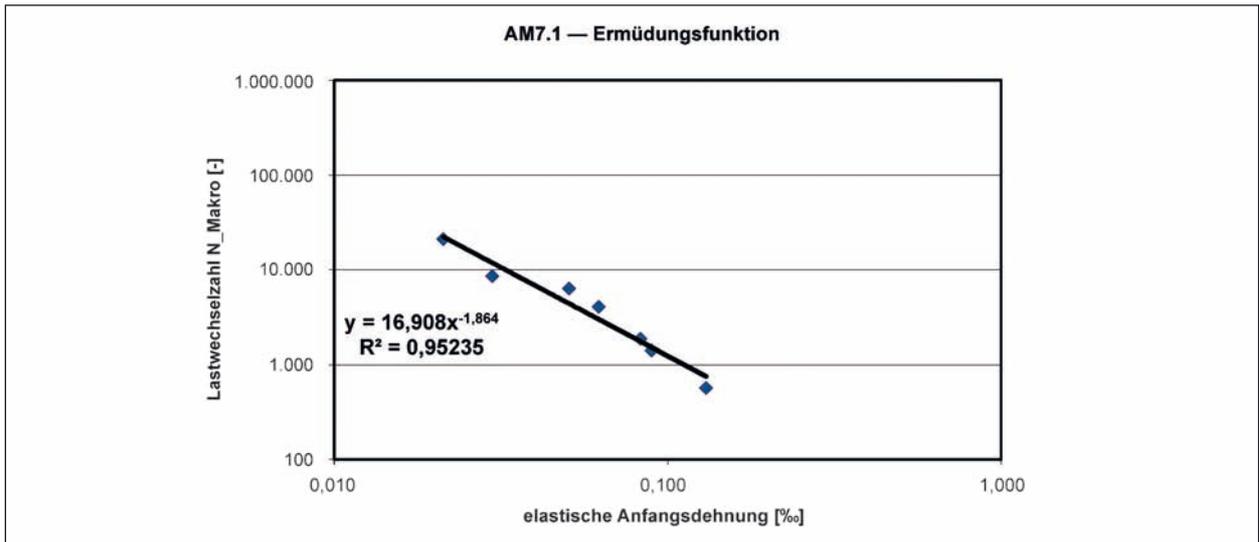


Bild 123: Ermüdungsfunktion der Variante AM7.1 mit AG3

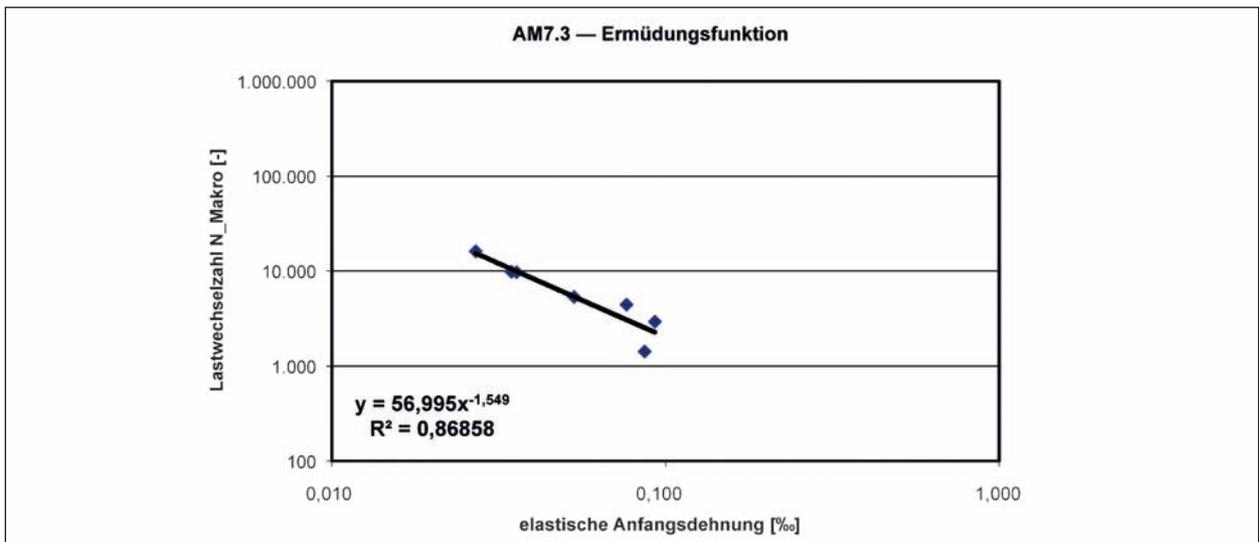


Bild 124: Ermüdungsfunktion der Variante AM7.3 mit AG3

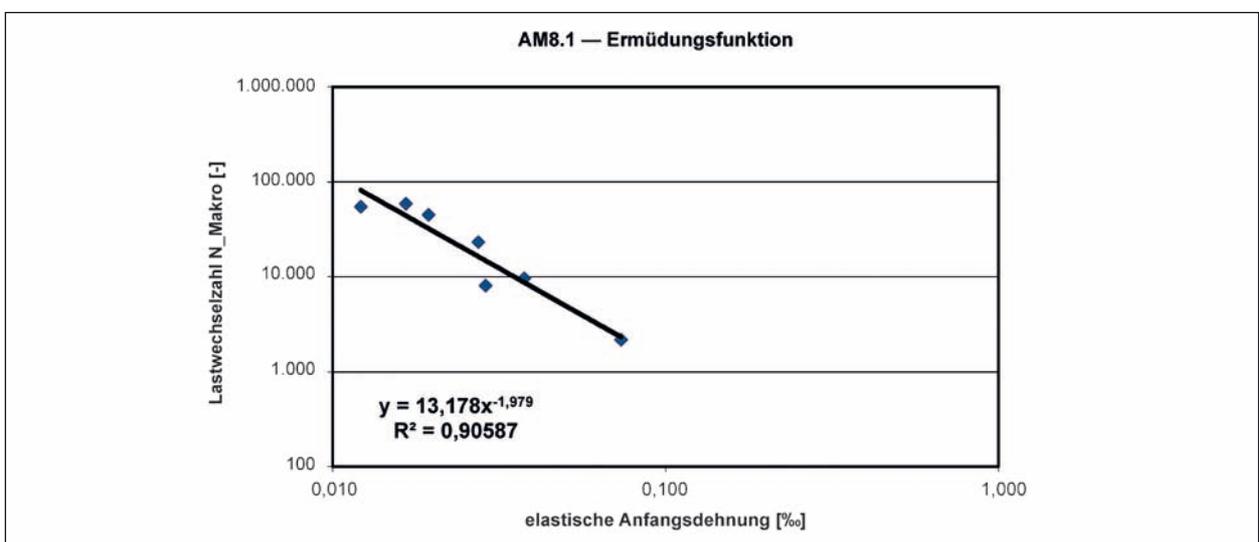


Bild 125: Ermüdungsfunktion der Variante AM8.1 mit AG4

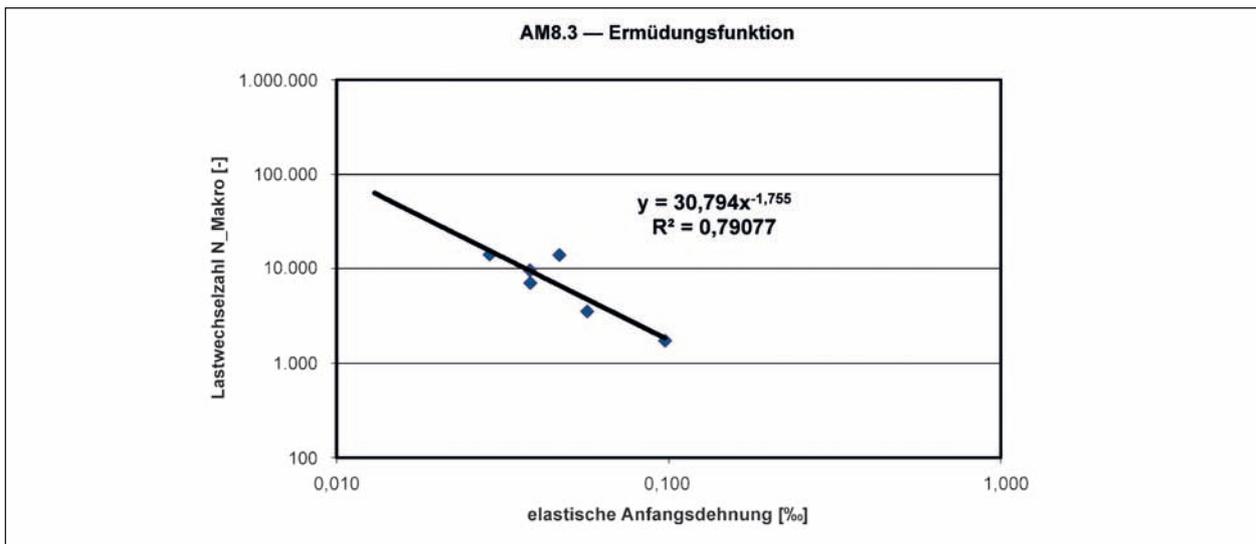


Bild 126: Ermüdungsfunktion der Variante AM8.3 mit AG4

Mit Ausnahme der Variante AM8.3 wird bei allen Prüfserien ein hinreichend hohes Bestimmtheitsmaß erreicht ($R > 0,80$). Die Unterschreitung dieser Anforderung für Asphalttragschichten ist bei der Variante AM8.3 allerdings auch nur sehr gering.

6.4.3 Ermüdungsfunktion der Varianten mit AG1

Die Ermüdungsfunktionen der Kaltasphaltvarianten mit dem Asphaltgranulat AG1 sind in Bild 127 bis Bild 132 dargestellt. Die aus der Regression errechneten Parameter der Ermüdungsfunktion sind in Tabelle 86 aufgeführt.

Die notwendige statistische Absicherung der Ermüdungsfunktionen durch Nachweis eines ausreichend hohen Bestimmtheitsmaßes wird bei allen Varianten mit Asphaltgranulat AG1 erreicht. Allerdings zeigt die Variante AM3.3 ein ungewöhnlich niedriges Bestimmtheitsmaß, ersichtlich am geringen Exponenten C_2 . Hier waren be-

reits im mittleren Dehnungsbereich keine brauchbaren Prüfergebnisse zu erzielen wodurch letztendlich die Belastbarkeit der errechneten Steigung fraglich ist.

6.4.4 Bewertung der Ermüdungsfunktionen

Bei einem Vergleich der Ermüdungsfunktionen der hier geprüften Varianten mit typischen Heißasphalttragschichten zeigt sich grundsätzlich ein signifikant schlechteres Ermüdungsverhalten der Kaltasphaltgemische. Erfahrungswerte für Ermüdungsfunktionen bisher untersuchter Heißasphalttragschichten am Lehrstuhl für Verkehrswegebau liegen bei einem Exponenten C_2 zwischen -2,5 und -4,5.

Beim Vergleich der Kaltasphaltvarianten untereinander weisen die Gemische mit dem stärker verhärteten Asphaltgranulat (AG3 und AG4) tendenziell die etwas besseren Werte gegenüber den Varianten mit AG1 auf.

Materialspezifische Parameter	Art des Asphaltmischgutes					
	AM1.1	AM1.3	AM2.1	AM2.3	AM3.1	AM3.3
C_1	64,5	111	104,4	55,1	30,8	407
C_2	-1,689	-1,261	-1,723	-1,869	-2,250	-0,500
R^2	0,8509	0,9334	0,8827	0,9501	0,9217	0,9217

Tab. 86: Durch die Regression ermittelten materialspezifischen Parametern der Ermüdungsfunktion der Asphaltmischgüter mit dem weichen Asphaltgranulat

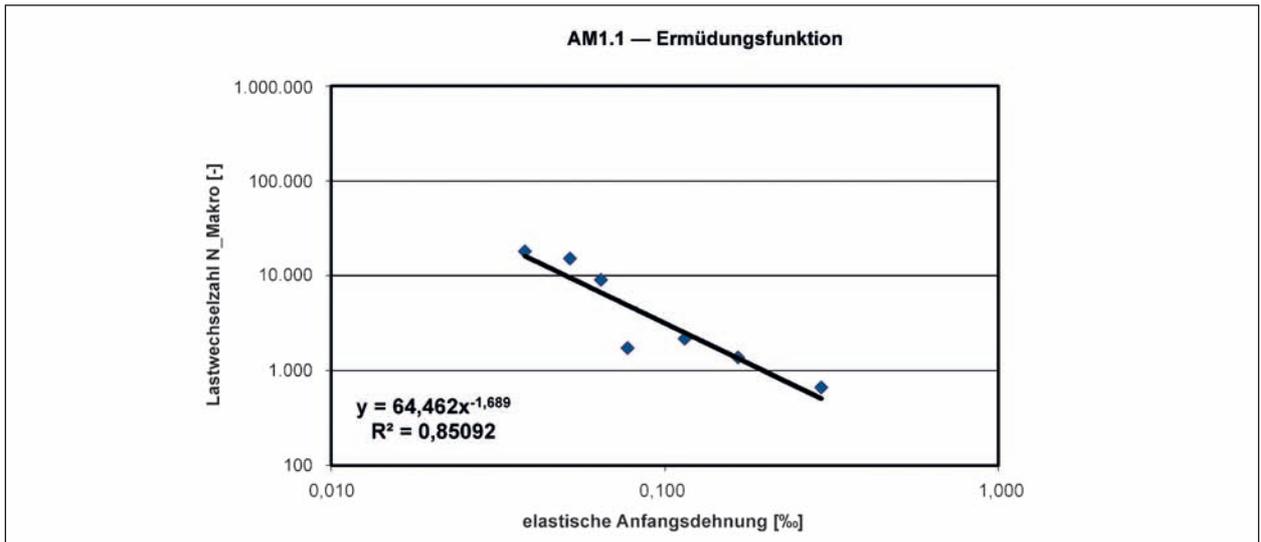


Bild 127: Ermüdungsfunktion der Variante AM1.1 mit AG1

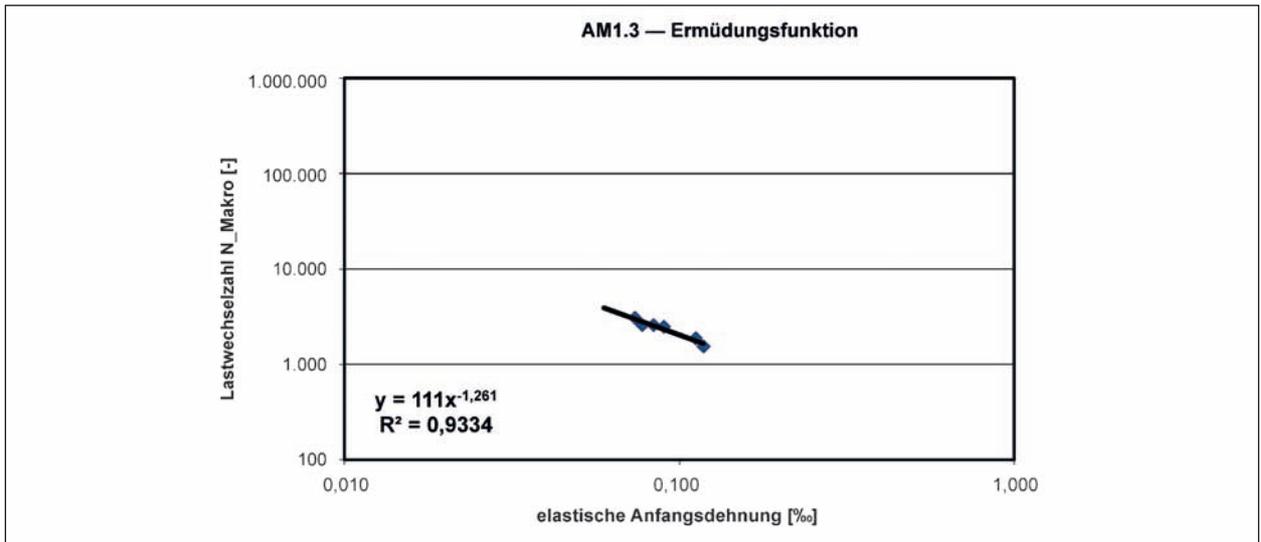


Bild 128: Ermüdungsfunktion der Variante AM1.3 mit AG1

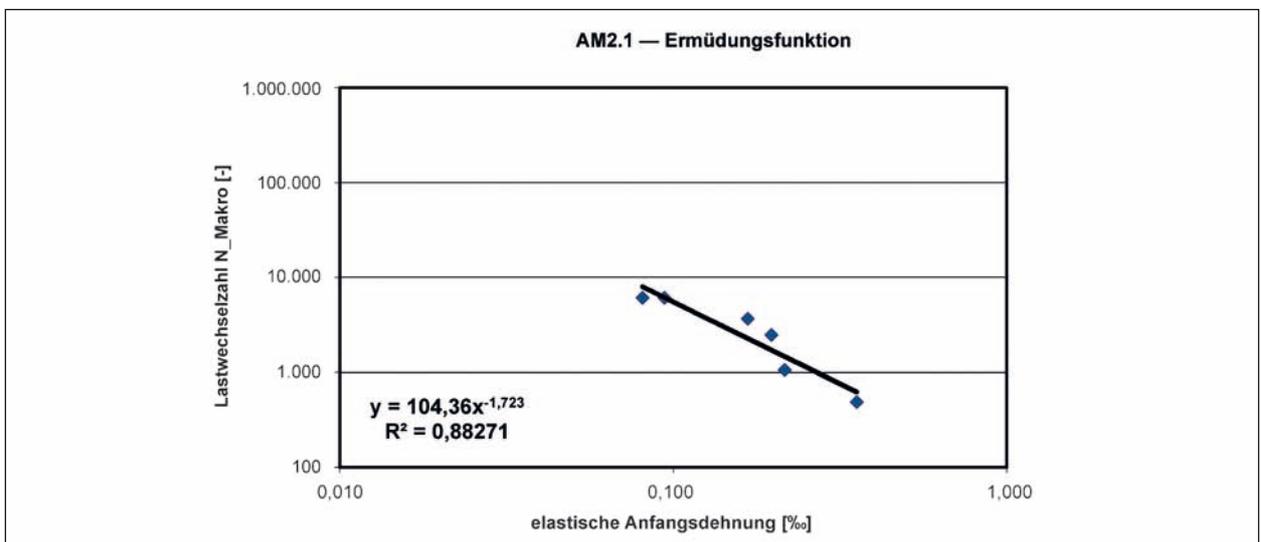


Bild 129: Ermüdungsfunktion der Variante AM2.1 mit AG1

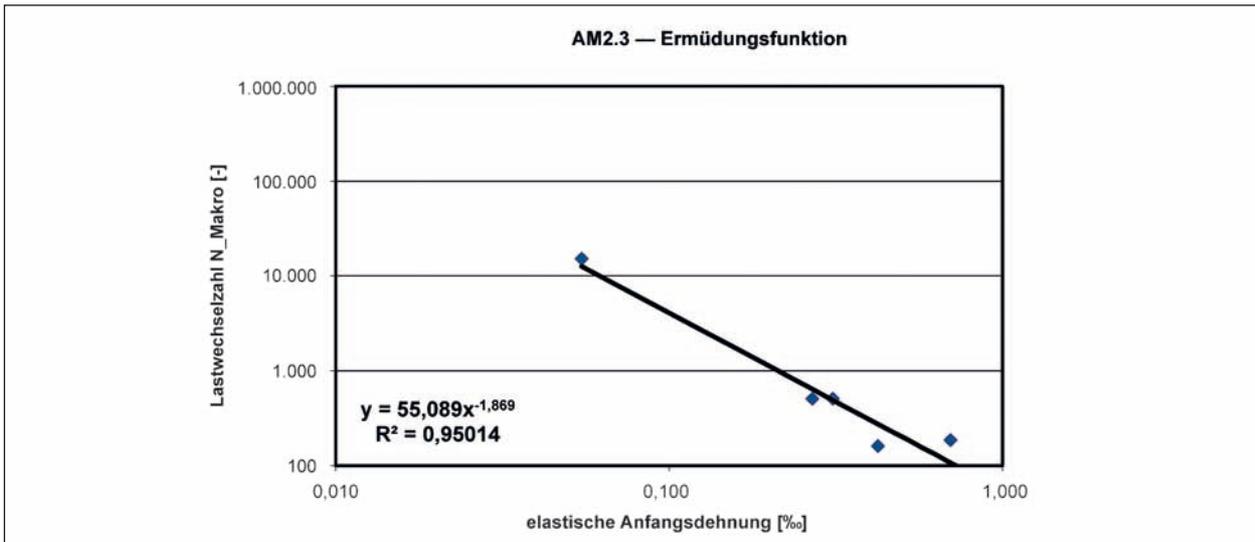


Bild 130: Ermüdungsfunktion der Variante AM2.3 mit AG1

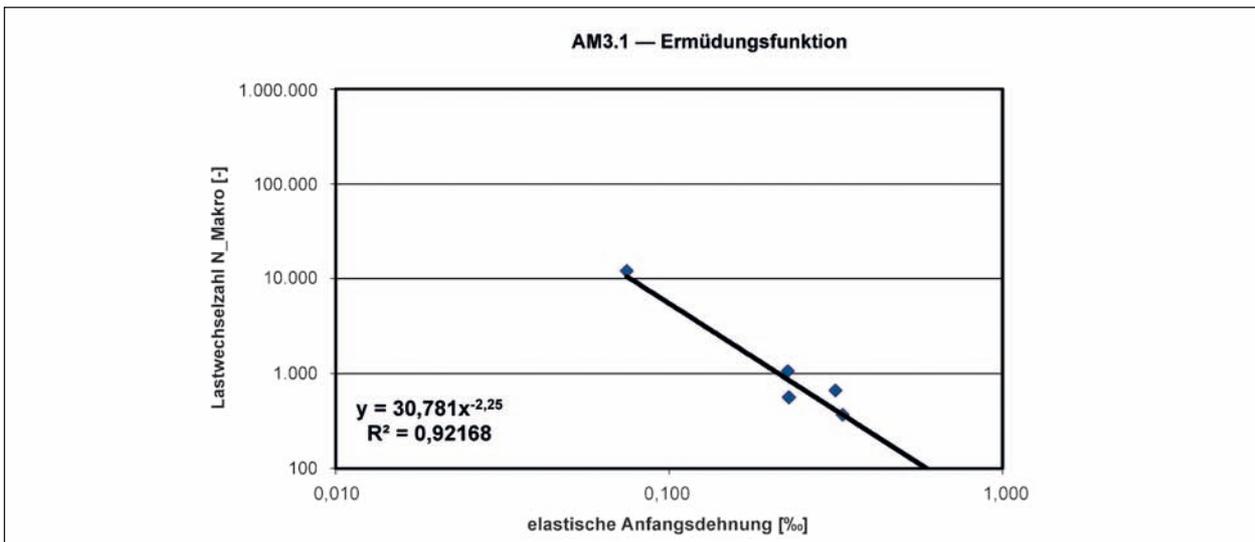


Bild 131: Ermüdungsfunktion der Variante AM3.1 mit AG1

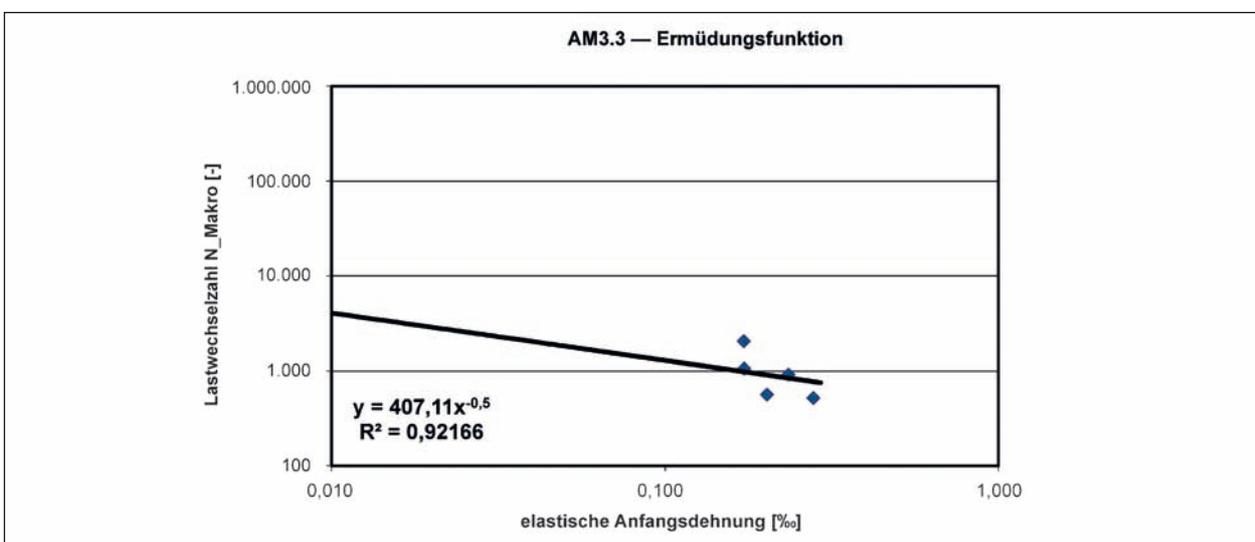


Bild 132: Ermüdungsfunktion der Variante AM3.3 mit AG1

7 Rechnerische Dimensionierung des Oberbaus

7.1 Eingangswerte für die Dimensionierung

7.1.1 Dimensionierungsrelevante Parameter der Verkehrsbelastung

Um typische Anwendungsfälle im Straßenbau abzudecken, wurden vier ausgewählte Belastungsklassen (von Bk100 bis Bk3,2) ausgewählt. Dazu wurden vier Beanspruchungsszenarien vorgegeben (siehe Tabelle 87), aus denen die dimensionierungsrelevante Beanspruchung B nach den RStO 12 errechnet wurde.

7.1.2 Dimensionierungsrelevante Parameter des frostsicheren Oberbaus und des Temperaturverlaufes

Die dimensionierungsrelevanten Parameter des Untergrunds/Unterbaus sowie des frostsicheren Oberbaus sind in Tabelle 88 aufgeführt.

Für die relativen Häufigkeiten des Auftretens der Oberflächentemperaturen wurde die der Zone 4 der Temperaturzonenkarte (RDO Asphalt 09) entsprechende Verteilung angenommen.

Parameter	Kennwert			
	Beanspruchung 1	Beanspruchung 2	Beanspruchung 3	Beanspruchung 4
Straßenklasse	Bundesautobahn		Bundesstraße	
$DTV^{(SV)}_1$	57.950	17.600	3.500	1.400
SV-Anteil	9 %	8 %	5 %	
Achszahlfaktor, f_A	4,5		4,0	
Lastkollektivquotient, q_{Bm}	0,33		0,25	
Zahl der Fahrstreifen im Querschnitt	4		2	
Fahrstreifenfaktor zur Ermittlung des $DTV^{(SV)}_1$	0,45		0,50	
Fahrstreifenbreite	3,75 m und mehr		3,25 m und unter 3,75 m	
Fahrstreifenfaktor, f_2	1,00		1,10	
Höchstlängsneigung	unter 2 %			
Steigungsfaktor, f_3	1,00			
Mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs, p	0,03		0,02	
Verkehrsverteilung	BAB Mischverkehr			
Dimensionierungsrelevante Beanspruchung, B	$79,750 \cdot 10^6$	$21,528 \cdot 10^6$	$2,170 \cdot 10^6$	$0,868 \cdot 10^6$
Belastungsklasse	Bk100	Bk32	Bk3,2	Bk1,0

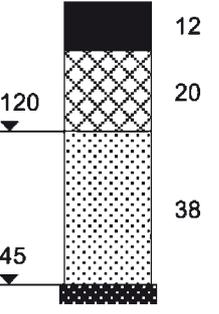
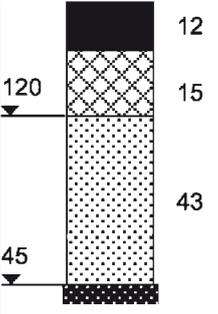
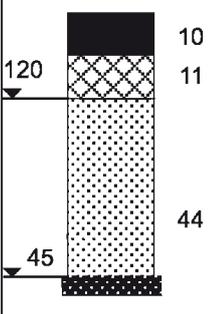
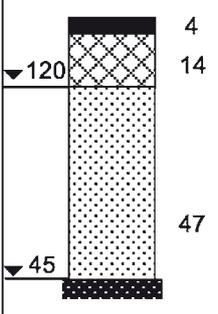
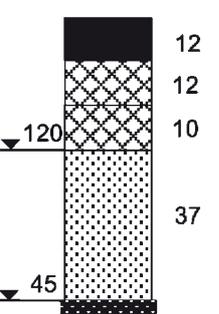
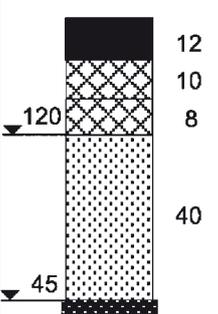
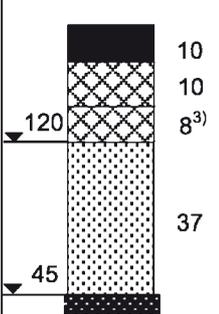
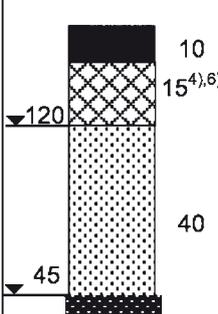
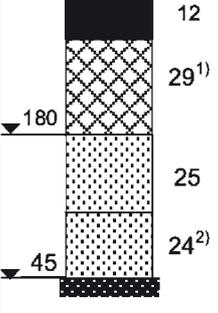
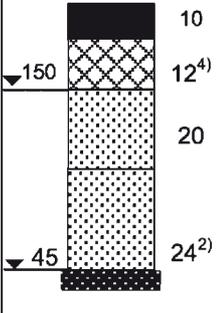
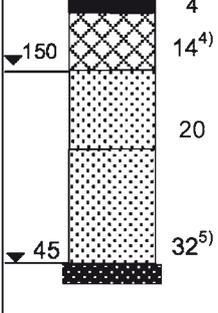
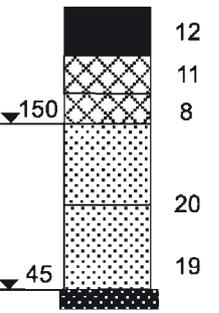
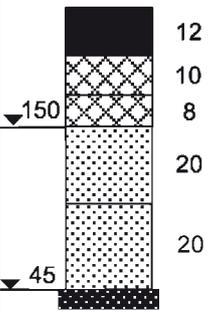
Tab. 87: Parameter der Verkehrsbelastung

Parameter	Kennwert			
	Beanspruchung 1	Beanspruchung 2	Beanspruchung 3	Beanspruchung 4
Frostempfindlichkeitsklasse des Untergrunds/Unterbaus	F2			
Ausgangswert für die Bestimmung der Mindestdicke	55 cm		50 cm	
Frosteinwirkungszone	Zone II (+ 5 cm)			
Kleinräumiger Klimaunterschiede	Keine besonderen Klimaeinflüsse (± 0 cm)			
Wasserverhältnisse im Untergrund	Grund- oder Schichtenwasser dauernd oder zeitweise höher als 1,5 m unter Planum (+ 5 cm)			
Lage der Gradienten	Einschnitt, Anschnitt (+ 5 cm)			
Entwässerung der Fahrbahn/ Ausführung der Randbereiche	Entwässerung der Fahrbahn über Mulden, Gräben bzw. Böschungen (± 0 cm)			
Mehr- oder Minderdicke	+15 cm			
Dicke des frostsicheren Oberbaus	70 cm		65 cm	

Tab. 88: Dimensionierungsrelevante Parameter des Untergrunds/Unterbaus sowie des frostsicheren Oberbaus

7.2 Resultierende Oberbauvarianten

Für die Oberbau-Dimensionierung wurden die Referenz-Asphaltemischgüter und drei repräsentative von im Untersuchungsprogramm vorgesehene Asphaltemischgüter verwendet. Die Ergebnisse für die vier ausgewählten Belastungsklassen sind in Tabelle 89 dargestellt. Dabei zeigt die Zeile 1 die Referenzvariante und die Zeilen 2 bis 4 die Varianten mit einer Kaltasphalttragschicht. Mit keiner Bauweise unter Einbeziehung einer Kaltasphalttragschicht konnte ein brauchbarer Oberbau für die Belastungsklasse Bk100 errechnet werden. Durch Kombination der mit Bitumen gebundenen Tragschichten, wobei die Heißasphalttragschicht in der unteren Schicht und die Kaltasphalttragschicht darüber angeordnet wird, lassen sich wirtschaftlich und bautechnisch sinnvolle Lösungen darstellen. Für weniger stark belastete Straßen Bk3,2 und Bk1,0 ergeben sich auch ohne Kombination mit einer Heißasphalttragschicht wirtschaftliche Oberbaukonzepte mit einer Kaltasphalttragschicht (Zeile 3 der Tabelle 89).

Zeile	Belastungsklasse	Bk100	Bk32	Bk3,2	Bk1,0
Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht					
1	Asphaltdecke Asphalttragschicht (Referenz-Asphaltmischgut AM6.0) Frostschutzschicht				
Kaltragschicht und Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht					
2	Asphaltdecke Kaltasphalttragschicht Asphalttragschicht Frostschutzschicht				
Kaltasphalttragschicht auf Schotter- und Frostschutzschicht					
3	Asphaltdecke Kaltasphalttragschicht Schottertragschicht Frostschutzschicht	Kein sinnvoller Aufbau möglich!			
Kaltasphalttragschicht und Asphalttragschicht auf Schottertragschicht und Schicht aus frostunempfindlichem Material					
4	Asphaltdecke Kaltasphalttragschicht Asphalttragschicht Schottertragschicht Schicht aus frostunempfindlichem Material			Aufgrund der bautechnischen Mindesticken nicht wirtschaftlich!	Aufgrund der bautechnischen Mindesticken nicht wirtschaftlich!

¹⁾ nur mit AM5.1; ²⁾ Dicke des frostsicheren Oberbaus auf 80 cm erhöht; ³⁾ Ermüdungsstatus: 10 bis 17 %
⁴⁾ nur mit AM2.1 und AM3.1; ⁵⁾ Dicke des frostsicheren Oberbaus aufgrund kritischem Spannungszustands um 5 cm erhöht
⁶⁾ Oberbau nur mit Kaltasphalttragschicht auf Frostschutzschicht

Tabelle 89: Übersicht der Bauweisen mit Asphaltdecke und Kaltasphalttragschicht im Vergleich zur Referenzbauweise

8 Zusammenfassung

Eine mit Bitumenemulsion gebundenen Asphalttragschicht im Rahmen der Dimensionierung eines Oberbaues von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise wird zurzeit nur sehr unzureichend im Regelwerk der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen berücksichtigt. Im Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau, M KRC aus dem Jahr 2005 werden in Anhang 2 Anwendungsbeispiele für einen Oberbau in Asphaltbauweise gegeben.

Die Festlegung der hier aufgeführten Dicken der einzelnen Schichten erfolgte weitgehend empirisch und mit hohem Sicherheitsfaktor anhand der standardisierten Bauweisen der RStO 01.

Mit Einführung der RDO Asphalt 09 wurden Grundlagen zur objektbezogenen rechnerischen Dimensionierung eines Oberbaus in Asphaltbauweise gelegt. Zur rechnerischen Dimensionierung eines Oberbaus unter Berücksichtigung einer mit Bitumenemulsion gebundenen Asphalttragschicht können bei entsprechender Kenntnis der dimensionierungsrelevanten Materialkennwerte einer solchen Schicht nun grundsätzlich objektbezogen Schichtdickenvorgaben errechnet werden. Hierzu fehlen allerdings noch hinreichende Erfahrungen über die dimensionierungsrelevanten Materialeigenschaften solcher Asphalttragschicht und deren Einflussfaktoren.

Mit den hier dokumentierten umfassenden Untersuchungen liegen nun Erkenntnisse über Höhe und

Variation der dimensionierungsrelevanten Materialkennwerte in Abhängigkeit von der Mischgutzusammensetzung der mit Bitumenemulsion gebundenen Asphalttragschichten vor. Dabei wurde im Wesentlichen der Anteil und die Art des Asphaltgranulates variiert, um ggf. eine Aktivierung des im Asphaltgranulat befindlichen Altbindemittels nachweisen zu können. Die physikalischen Eigenschaften wie z. B. die Raumdichte und der Hohlraumgehalt, sowie die Spaltzugfestigkeit sind wesentliche Parameter für eine Bewertung der einzelnen Mischgutkonzepte. Aufgrund dieser Werte wurde eine Auswahl über die optimalen Bitumenemulsionszugabe getroffen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Gemischzusammensetzung konnte gezeigt werden, dass die Kaltasphaltgemische mit einem geringeren Anteil von Asphaltgranulat eine höhere Zugabemenge an Bitumenemulsionen benötigen. Dies deutet auf eine „Aktivierbarkeit“ des Altbindemittels im Asphaltgranulat hin. Außerdem wurden mit dieser Untersuchungsreihe statische Spaltzugfestigkeiten von 1,1 bis über 1,5 MPa nach 28 Tagen Probenlagerung ermittelt, die nach bisherigen Erfahrungen nur mit hydraulisch-dominanten Gemischen erreicht wurden. Die Bruchdehnungen von über 2,5 % dokumentieren aber einen eindeutigen emulsionsdominanten Mischgutcharakter. Auch die statischen E-Moduln sind mit bis zu 5.000 MPa als hoch für ein emulsionsdominantes Kaltmischgut einzustufen.

Die Ergebnisse der dynamischen Spaltzug-Schwellversuche zeigen, dass die Steifigkeiten der

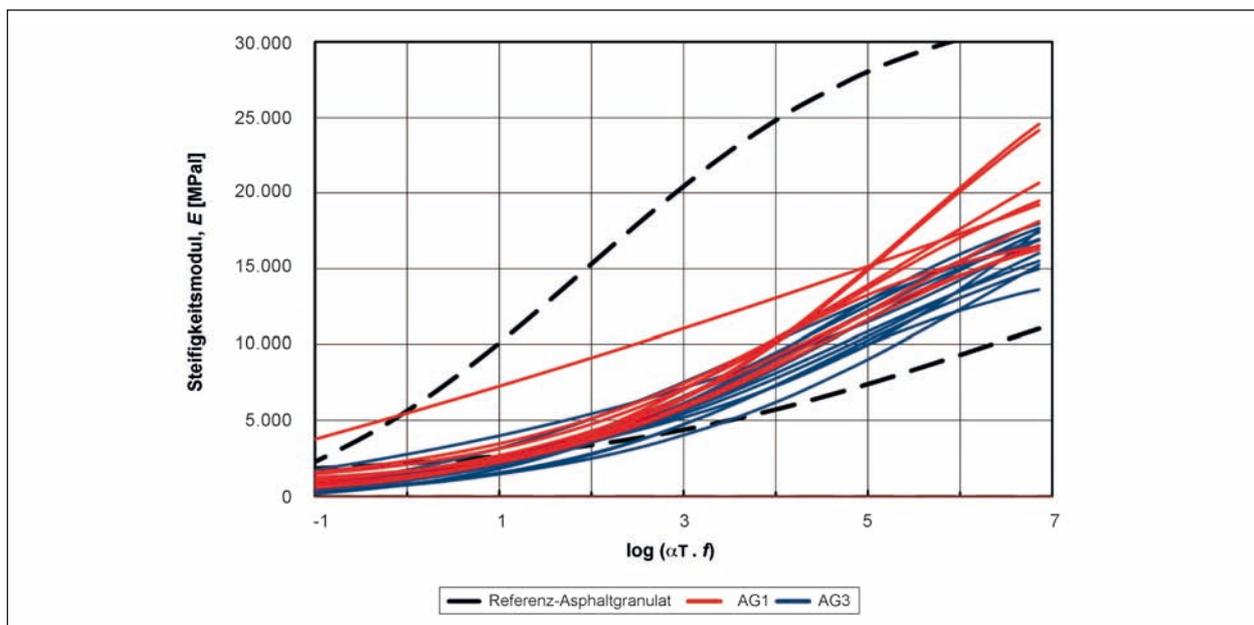


Bild 133: Zusammenfassende Darstellung aller Masterkurven

mit Bitumenemulsion gebundenen Asphalttragschichten nicht das Niveau einer Heißasphalttragschicht erreichen. Dies verdeutlicht das Bild 133, das die errechneten Verläufe der Hauptkurven aller gepruften Varianten enthält. Fast über den gesamten Temperatur- und Frequenzbereich sind deutlich niedrigere Steifigkeiten ermittelt worden.

Tendenziell erreichen die Gemischvarianten mit dem weicheren Asphaltgranulat zumindest bei niedrigeren Prüftemperaturen und/oder niedrigeren Prüffrequenzen hohere Steifigkeiten im Vergleich zu den Gemischen mit dem härteren Bindemittel im Asphaltgranulat.

Die aus den Laborversuchen abgeleiteten Ermdungskurven zeigen im Vergleich zum Referenzasphalt eine ähnliche Situation. Das Bild 134 enthält alle Ermdungskurven fur eine grafische Gegenüberstellung. Auch hier ist ein signifikant schlechteres Verhalten im Vergleich zum Niveau einer Heißasphalttragschicht erkennbar. Ebenso zeigt die Mehrzahl der Gemischvarianten mit dem weicheren Bindemittel im Asphaltgranulat im Vergleich zu den Varianten mit dem härteren Asphaltgranulat ein etwas besseres Ermüdungsverhalten.

Die in Kapitel 7 dokumentierten Dimensionierungsberechnungen mit dem Programm PaDesTo haben gezeigt, dass die Einbindung einer Kaltasphalttragschicht in den hohen Belastungsklassen Bk100 und Bk32 nur sehr bedingt möglich ist. Hier lassen sich lediglich unter Berücksichtigung einer konventionellen Asphalttragschicht als unterste Asphalttschicht

brauchbare Lösungen errechnen. Bei Belastungsklassen Bk3,2 und niedriger konnte wirtschaftlich und bautechnisch sehr sinnvolle Lösungen dargestellt werden. Hier bietet sich offensichtlich ein sehr interessantes Anwendungsgebiet fur Kaltasphalttragschichten an. Allerdings haben hier nur wenige der untersuchten Gemischvarianten zu einer wirtschaftlichen Oberbaudicke geführt. Die Varianten mit dem weicheren Asphaltgranulat (AG1), und hier besonders die Varianten AM2.1 und AM3.1, lieferten die wirtschaftlichsten Oberbaukonzepte. Dies lässt sich mit dem Verlauf der Ermdungskurve erklären. Im Bereich der hohen elastischen Anfangsdehnungen haben diese Varianten die hochsten aufnehmbaren Lastwechselzahlen.

9 Ausblick

Die Laboruntersuchungen und die mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen durchgeführten Dimensionierungsberechnungen haben ergeben, dass sich die im Merkblatt fur Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau, M KRC aus dem Jahr 2005 empfohlenen Oberbaukonzepte deutlich optimieren lassen. Die gezielte Veränderung der Mischgutzusammensetzung einer mit Bitumenemulsion gebundenen Asphalttragschicht führt zu wirtschaftlich tragbareren Konzepten, ohne dass ein frühzeitiges Versagen des Oberbaus zu erwarten ist. Dies gilt allerdings nur fur niedrigere Belastungsklassen. Besonders hervorzugehen sind hier auch die Prfresultate unter statischen Lastbedingungen

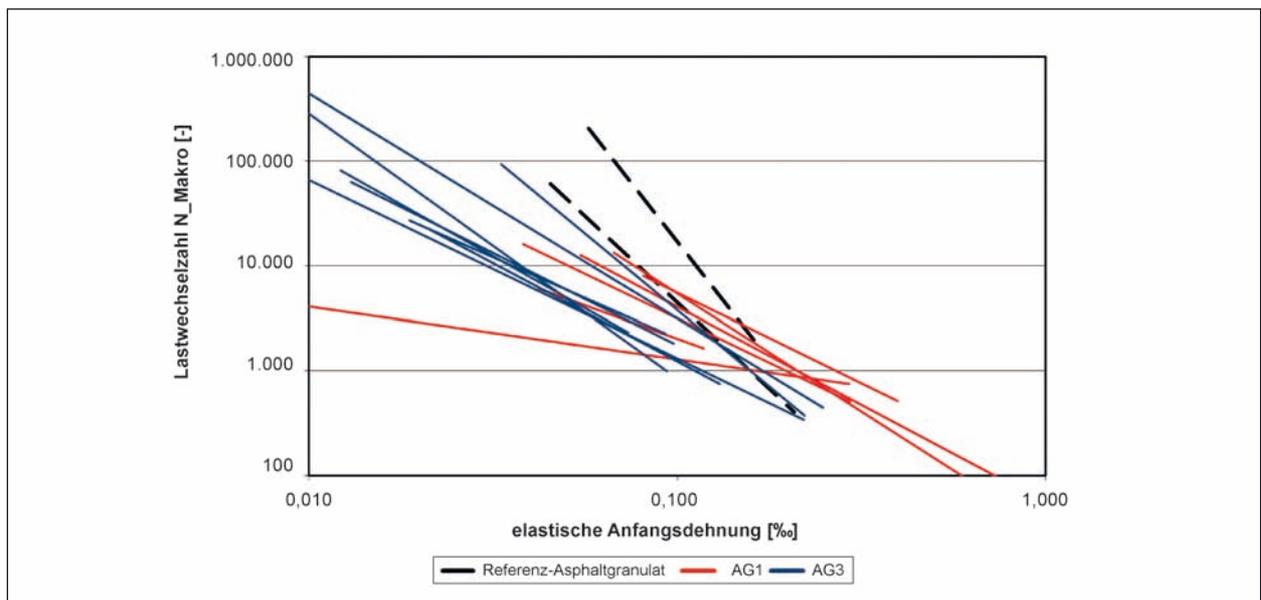


Bild 134: Zusammenfassende Darstellung aller Ermdungskurven

(Spaltzugfestigkeit, Bruchdehnung und statischer E-Modul). Bei diesen Kennwerten konnten sehr deutliche Verbesserungen im Vergleich zu bisherigen Erfahrungswerten nachgewiesen werden.

Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass die hohe Ermüdungsbeständigkeit typischer Heißasphalttragschichten nicht erreicht wird. Ebenso wurden im Vergleich zu Heißasphalten nur geringere Steifigkeiten erzielt, sodass ein durchgängig heiß gemischter Asphaltstraßenoberbau bei gleicher prognostizierter Nutzungsdauer dünner ausgeführt werden kann.

Eine für die Zukunft ggf. noch aussichtsreiche Erkenntnis des Forschungsprojektes ist die mechanische Wirksamkeit des Emulsionswassers in zeitlicher Betrachtung. Es konnte mit einem separaten Untersuchungsprogramm an Bitumenemulsions-Mörtel-Gemischen gezeigt werden, dass auch weit über 28 Tage hinaus noch eine deutliche positive Veränderung der mechanischen Eigenschaften mit Bitumenemulsion gebundener Asphalttragschichten eintritt. Hierbei ließ sich ein Zusammenhang mit dem im Mischgut teilweise nur sehr langsam entweichenden Wasser herstellen. Weitere Untersuchungen zum Nachweis der Einbindung des Wassers im Mischgut sind noch erforderlich.

Darüber hinaus wäre ein Abgleich dieser Laborerkenntnisse mit den tatsächlichen praktischen Bedingungen sehr hilfreich. Dabei sollten die dimensionierungsrelevanten Materialeigenschaften mit Bitumenemulsion gebundener Asphalttragschichten aus bestehenden Strecken, möglichst mit unterschiedlicher Nutzungsdauer untersucht werden. Hiermit ließe sich nachweisen, ob tatsächlich noch eine deutliche zeitliche Veränderung der Materialeigenschaften eintritt und ob sich dabei auch ein unterschiedlicher Wassergehalt im Mischgut nachweisen lässt. Letzteres wird allerdings sehr schwierig, da es sich hier nur um sehr geringfügige gravimetrische Veränderungen handelt.

10 Literatur

- AkzoNobel: Bitumen Emulsion – Technical Bulletin. Stenungsund: Akzo Nobel Surface Chemistry
- AL Sp-Asphalt 09: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung (FGSV 430), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2009
- BLAB, R., et al. (2010): Asphalt Handbuch. 4. Auflage. Wien: Gesellschaft für Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt (GESTRATA)
- DIN EN 1097-4: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller
- DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
- DIN EN 1097-7: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller – Pyknometer-Verfahren
- DIN EN 12607-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren
- DIN EN 12697-1: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt
- DIN EN 12697-2: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 2: Korngrößenverteilung
- DIN EN 12697-3: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer
- DIN EN 12697-8: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern
- DIN EN 12697-23: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern
- DIN EN 12848: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Mischstabilität von Bitumenemulsionen mit Zement

- DIN EN 13074-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Rückgewinnung des Bindemittels aus Bitumenemulsion oder verschnittenen oder gefluxten Bitumen – Teil 1: Rückgewinnung durch Verdunstung
- DIN EN 13074-2: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Rückgewinnung des Bindemittels aus Bitumenemulsion oder verschnittenen oder gefluxten Bitumen – Teil 2: Stabilisierung nach Rückgewinnung durch Verdunstung
- DIN EN 13075-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechverhaltens – Teil 1: Bestimmung des Brechwertes kationischer Bitumenemulsionen, Verfahren mit Feinmineralstoff
- DIN EN 13108-8: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 8: Ausbauasphalt
- DIN EN 13179-1: Prüfverfahren für mineralische Füller in bitumenhaltigen Mischungen – Teil 1: Delta-Ring- und Kugel-Verfahren
- DIN EN 1425: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Feststellung der äußeren Beschaffenheit
- DIN EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration
- DIN EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren
- DIN EN 1428: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Wassergehaltes von Bitumenemulsionen – Azeotropisches Destillationsverfahren
- DIN EN 1429: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Siebrückstandes von Bitumenemulsionen und Bestimmung der Lagerbeständigkeit durch Sieben
- DIN EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR)
- DIN EN 14771: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR)
- DIN EN 197-1: Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren
- DIN EN 933-4: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl
- DIN EN 933-10: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen – Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung)
- European Asphalt Pavement Association (2008): Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling – EAPA Position Paper. Brussels
- KrWG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz), 2012
- M KRC: Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau (FGSV 636), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2005
- M VB-K: Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen (FGSV 755), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2007
- M WA: Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (FGSV 754). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)
- National Asphalt Pavement Association (2007): Designing HMA Mixtures with High RAP Content – A Practical Guide. Lanham, Quality Improvement Series 124
- RDO Asphalt: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (FGSV 498). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2009
- READ, J., WHITEOAK, D. (2003): The Shell Bitumen Handbook. 5th ed. London: Thomas Telford Publishing
- RStO 01: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (FGSV 499),

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2001
- RStO 12: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (FGSV 499), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2012
- SALOMON, D. R. (2006): Asphalt Emulsion Technology. Washington, DC: Transportation Research Board (TRB), Transportation Research Circular E-C102
- SJÖBLOM, J., ed. (2006): Emulsions and Emulsion Stability. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group
- TÄUBE, A. (2011): Wiederverwendung von Asphalt. Straße und Autobahn. Vol. 10/2011
- TL AG-StB: Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (FGSV 749), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2009
- TL Asphalt-StB: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (FGSV 797), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2007
- TL BE-StB: Technische Lieferbedingungen für Bitumenemulsionen (FGSV 793), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2007
- TL Gestein-StB: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (FGSV 613). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2004/2007
- TP Asphalt-StB Teil 1: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 1: Bindemittelgehalt (FGSV 756/1), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2010
- TP Asphalt-StB Teil 2: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 2: Korngrößenverteilung (FGSV 756/2), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2010
- TP Asphalt-StB Teil 3: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels – Rotationsverdampfer (FGSV 756/3), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2007
- TP Asphalt-StB Teil 8: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 3: Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad (FGSV 756/8), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2007
- TP Asphalt-StB Teil 23: Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 23: Spaltzugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern (FGSV 756/23), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2007
- TP Gestein-StB Teil 4.1.2: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 4.1.2: Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung (FGSV 610/4.1.2), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2008
- TP Gestein-StB Teil 4.1.3: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 4.1.3: Bestimmung der Korngrößenverteilung von feinen Gesteinskörnungen (Luftstrahlsiebung) (FGSV 610/4.1.3), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2008
- TP Gestein-StB Teil 4.1.4: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 4.1.4: Bestimmung der Korngrößenverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung) (FGSV 610/4.1.4), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2008
- Wirtgen (2010): Wirtgen Cold Recycling Technology. Windhagen

Anhang 1

Die Bilder A1.1 bis A1.4 zeigen die volumetrischen und mechanischen Eigenschaften der mit dem statischen Spaltzugversuch untersuchten Kaltasphaltgemische AM5.1 bis AM8.1 nach 7 Tagen.

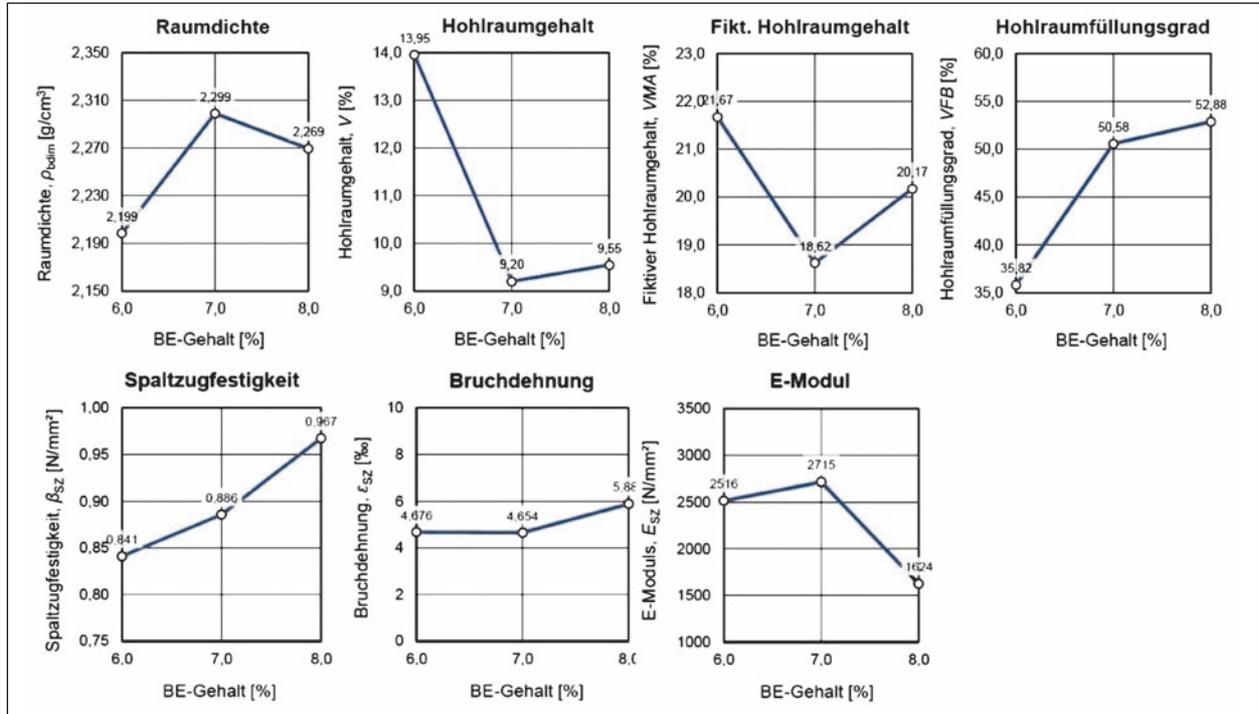


Bild A1.1: Volumetrische und mechanische Eigenschaften, ermittelt durch den Spaltzugversuch am Asphaltmischgut AM5.1 nach 7 Tagen

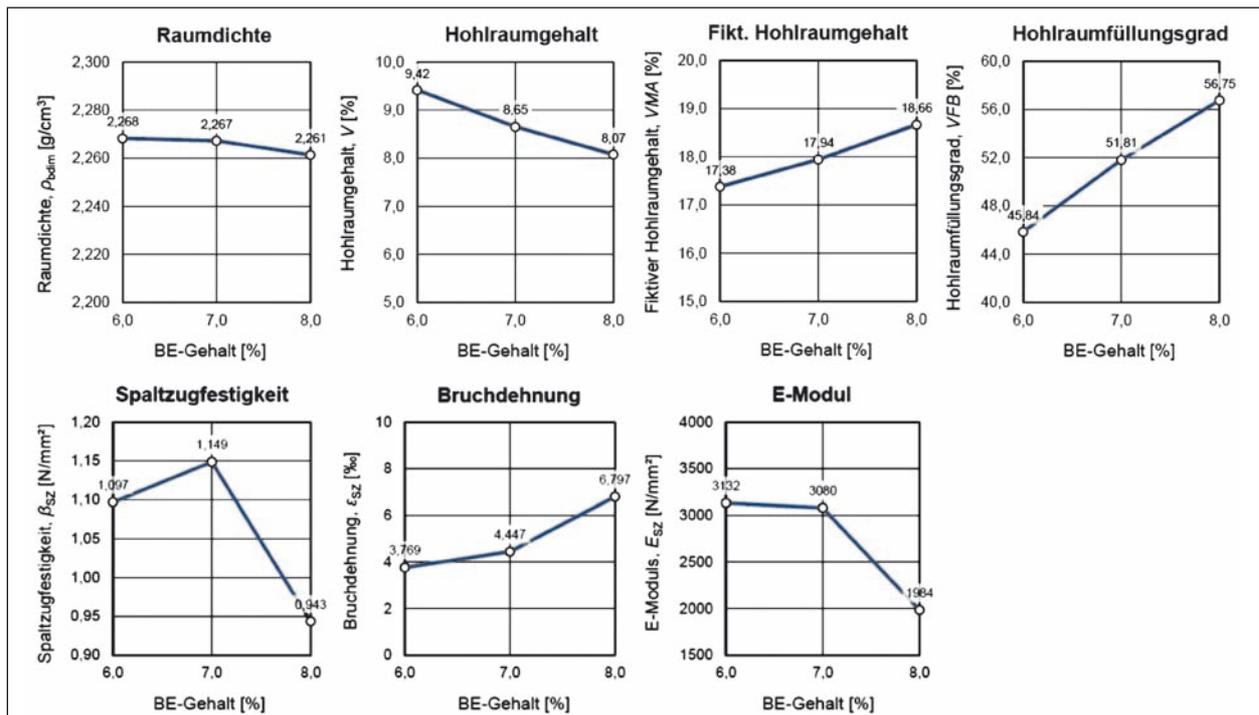


Bild A1.2: Volumetrische und mechanische Eigenschaften, ermittelt durch den Spaltzugversuch am Asphaltmischgut AM6.1 nach 7 Tagen

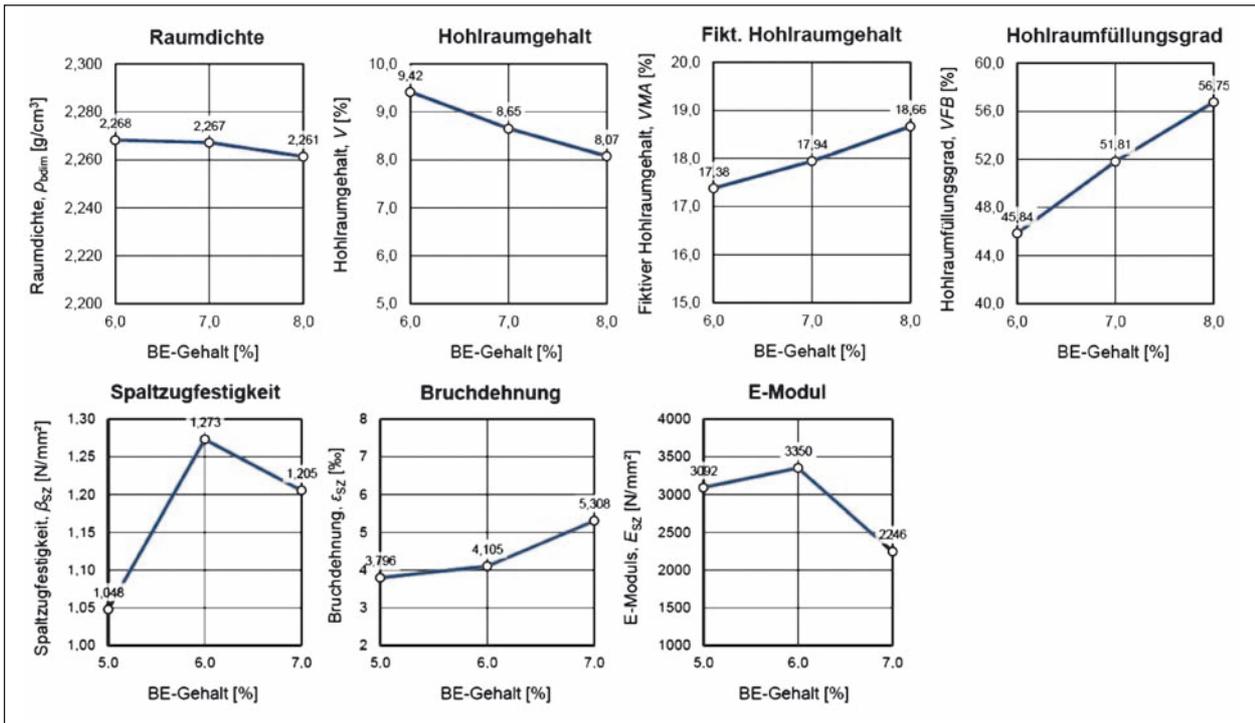


Bild A1.3: Volumetrische und mechanische Eigenschaften, ermittelt durch den Spaltzugversuch am Asphaltmischgut AM7.1 nach 7 Tagen

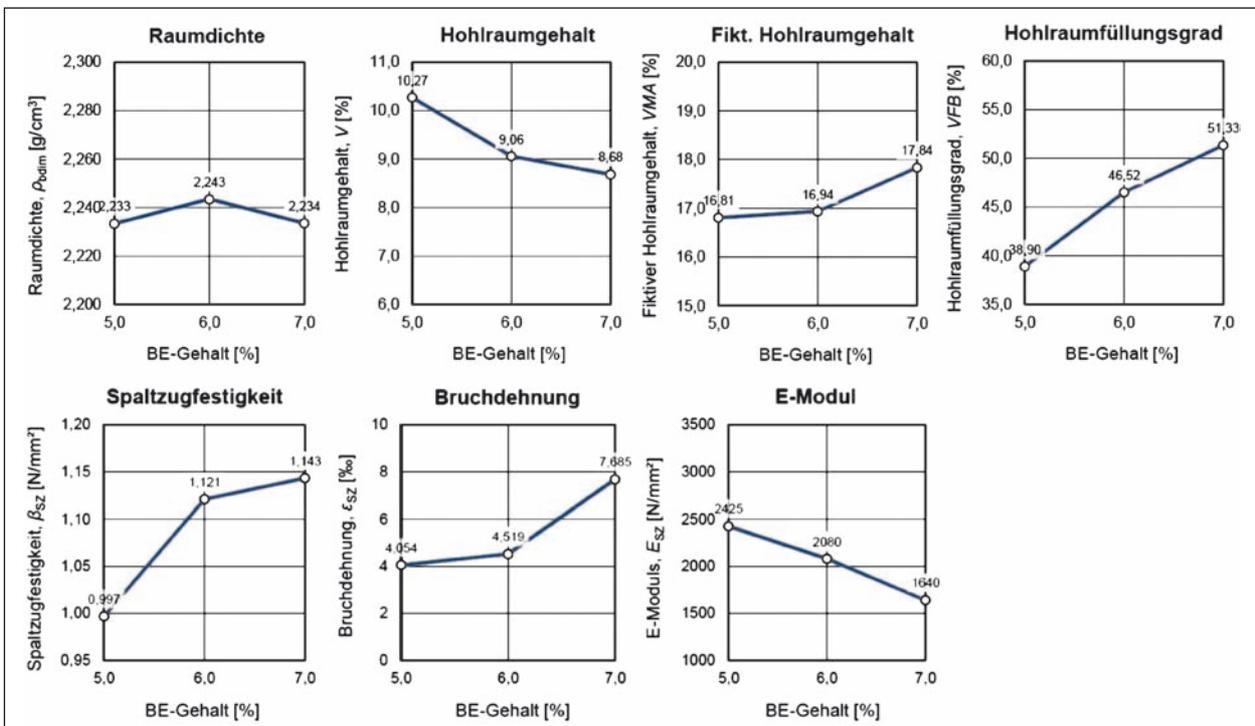


Bild A1.4: Volumetrische und mechanische Eigenschaften, ermittelt durch den Spaltzugversuch am Asphaltmischgut AM8.1 nach 7 Tagen

Anhang 2

1 Untersuchungen an den Bitumenemulsions-Mörtel-(BEM-)Gemischen

1.1 Konzept der BEM-Gemische

Die Bedeutung der Mörtelzusammensetzung und insbesondere auch der vermutet hohe Einfluss von Restwasseranteilen im Emulsionsgemisch – möglicherweise im Bindemittel der Emulsion eingeschlossen – führten zu dem Schluss, ergänzende Untersuchungen nur am Mörtel eines mit Bitumenemulsion gebundenen Tragschichtgemisches durchzuführen. Folgende Ziele sollten realisiert werden:

- Einfluss der Bitumenemulsionsart und -menge auf die Veränderung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften,
- Minimierung anderer Einflussgrößen auf physikalische und mechanische Eigenschaften,
- zeitliche Entwicklung der Eigenschaften nach 7, 28, und 84 Tagen,
- Festlegung der Laborbedingungen und Mörtel-Norm-Zusammensetzung für zukünftige, ergänzende wissenschaftliche Untersuchungen.

1.2 Verwendete Baustoffe und BEM-Zusammensetzung

Nach zahlreichen Voruntersuchungen mit Bestimmung der Verdichtbarkeit und der Steifigkeiten wurde ein Gesteinskörnungsgemisch, bestehend

aus Kalksteinfüller (7,5 M.-%) und Quarzsand 0/2 (92,5 M.-%) als mineralische Basis festgelegt. In den nachfolgend dokumentierten Ergebnissen ist zusätzlich ein Zementanteil von 1,5 M.-% zugegeben worden.

Eine detaillierte Beschreibung dieser drei Gesteinskomponenten ist in Kapitel 3 des Forschungsberichtes zu finden.

Die unter Berücksichtigung von drei Emulsionsgehalten festgelegten BEM-Gemische sind in der Tabelle A2.1 aufgeführt. Dabei hatte sich anhand von Voruntersuchungen gezeigt, dass der optimale Bereich des Bindemittelgehaltes zwischen 10 und 12 M.-% liegt. BEM-Gemische mit geringeren Bindemittelgehalten wurden zu spröde oder zerbrachen bereits beim Ausschalen und Gemische mit mehr als 12 M.-% Bitumenemulsion waren zu weich, sodass nur sehr niedrige E-Moduln gemessen wurden.

Die Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches ist in Bild A2.1 dargestellt.

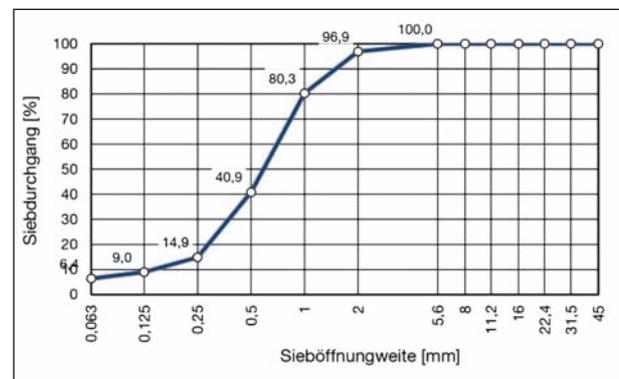


Bild A2.1: Korngrößenverteilung der BEM-Gemische

Baustoff	Anteil der Gesteinskörnung [M.-%]	Anteil des Asphaltmischgutes [M.-%]		
		Serie 1	Serie 2	Serie 3
Bitumenemulsion	–	10,0	11,0	12,0
Zement	–	1,5	1,5	1,5
Füller	7,5	6,6	6,6	6,5
Natur-Quarzsand	92,5	81,9	80,9	80,0
Gesamt	100	100	100	100

Tab. A2.1: Zusammensetzung der Serien der BEM-Mischgüter

1.3 Probenherstellung und Prüfung

Das trockene Gesteinskörnungsgemisch (einschl. Zement) wurde zuerst trocken ohne Bitumenemulsion ca. 1 min gemischt. Anschließend wurde die Bitumenemulsion in einem Guss zugegeben. Wie für die im Kapitel 5 beschriebenen Optimierungsuntersuchungen der Kaltasphalttragschichten wurden die BEM-Probekörper mittels statischem Doppelkolbenprinzip (Duriez-Verdichtung) verdichtet. Unterschiedlich waren der Probendurchmesser (hier 100 mm) und die nur einstufige Belastung bis zum Erreichen der Maximallast von 49 kN. Diese Last wurde für 3 min konstant gehalten

Nach der Verdichtung erfolgte die kombinierte Nass- und Trockenlagerung für 7, 28, und 84 Tage. Direkt vor der Spaltzugprüfung wurden die Probekörper mindestens 8 Stunden auf +5 °C temperiert.

Aus den Spaltzugversuchen, wurden die mechanischen Eigenschaften wie die Spaltzugfestigkeit, Bruchdehnung, und E-Modul berechnet

1.4 Ergebnisse der Prüfung

Bild A2.2 zeigt einen Probekörper nach der Spaltzugprüfung mit der charakteristischen Rissausbildung

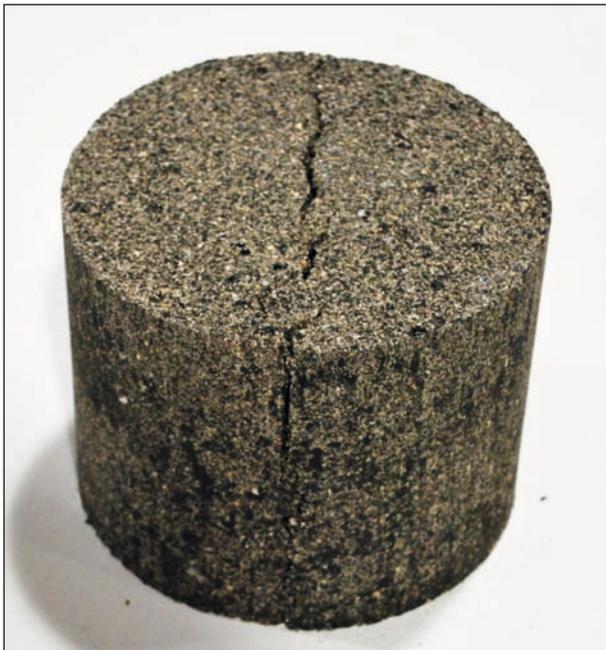


Bild A2.2: Rissbildung am BEM-Probekörper mit der Bitumenemulsion BE1 nach dem Spaltzugversuch

Die Form der Bruchlinie zeigt einen eindeutigen Zugbruch, d. h., dass der Probekörper glatt entlang einer diametral verlaufenden Geraden bricht. Ansatzweise waren teilweise kleine dreieckige Bruchbereiche unmittelbar unter den Druckstreifen zu erkennen. Bei geringeren Bindemittelgehalten war durchweg ein eindeutiger Zugbruch zu beobachten.

1.4.1 Physikalische und volumetrische Eigenschaften

Nach der Bestimmung der Probekörpermassen und -abmessungen, wurden die physikalischen und volumetrischen Eigenschaften jeweils nach 7, 28, und 84 Tagen der Lagerung berechnet. Die zeitliche Veränderung der Raumdichten und der mit Luft gefüllten Hohlräume sind in Bild A2.3 und Bild A2.4 dargestellt.

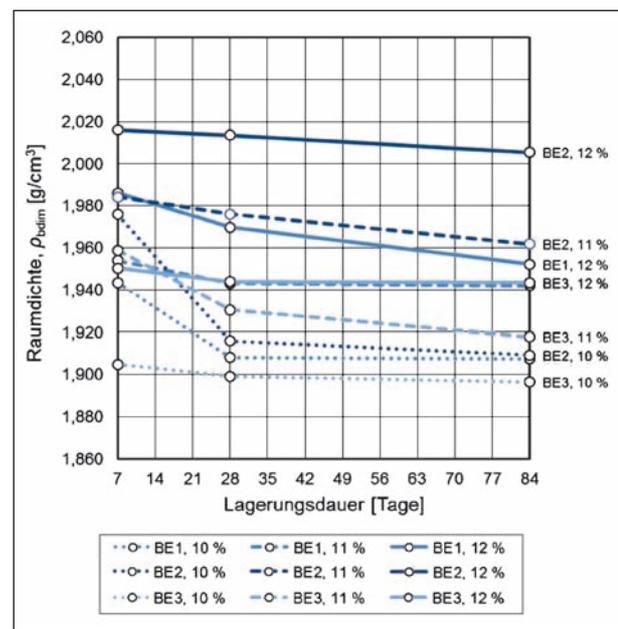


Bild A2.3: Zeitliche Entwicklung der Raumdichten der BEM-Probekörper

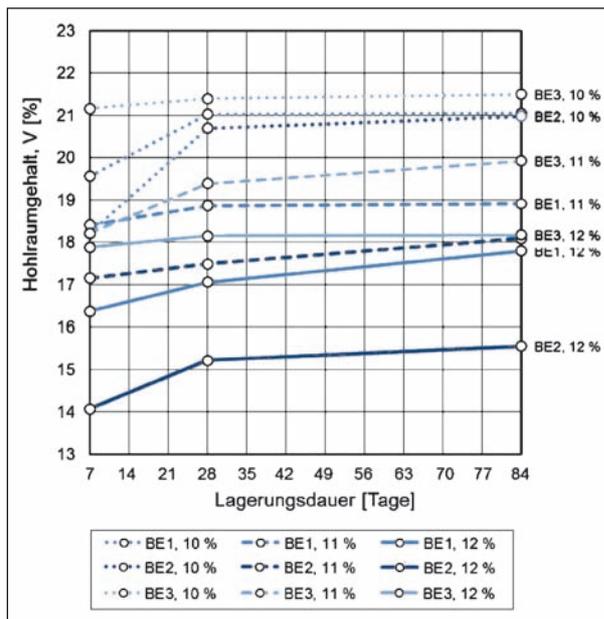


Bild A2.4: Zeitliche Entwicklung der luftgefüllten Hohlräume der BEM-Probekörper

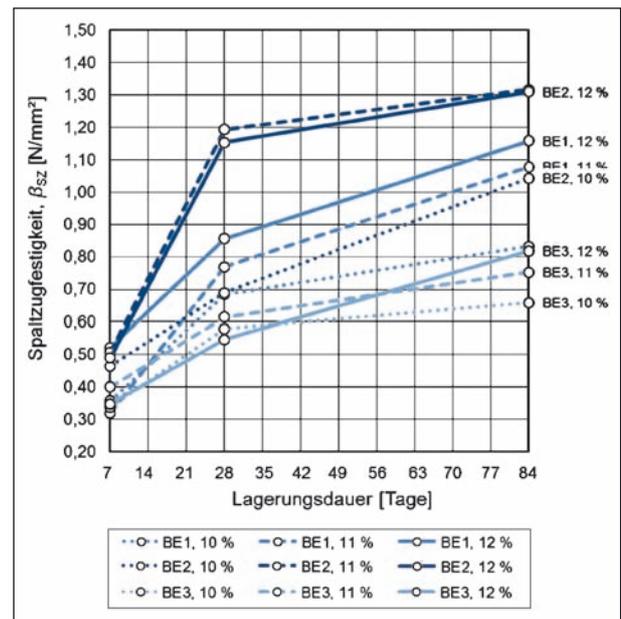


Bild A2.5: Zeitliche Entwicklung der Spaltzugfestigkeiten der BEM-Probekörper

Mechanische Eigenschaften

Die zeitlichen Abhängigkeiten der Spaltzugfestigkeiten, der Bruchdehnungen, sowie der E-Moduln der Probekörper aufgrund des Spaltzugversuchs werden in Bild A2.5 bis Bild A2.7 dargestellt. Unterschiedlich von den physikalischen und den volumetrischen Eigenschaften, konnte hier sogar nach 28 Tagen die deutliche Steigung der mechanischen Eigenschaften beobachtet werden

Die nach 7 Tagen Probenlagerung ermittelten Spaltzugfestigkeiten lagen in einer Spannweite von 0,32 bis 0,52 MPa. Zwischen 7 und 28 Tagen trat eine durchschnittliche Steigung von ungefähr 0,43 MPa auf. Das bedeutet, dass sich die Festigkeiten nach 28 Tagen teilweise verdoppelt haben. Die Steigung der Festigkeiten von 28 und 84 Tagen ist auch beträchtlich und beträgt etwa 0,21 MPa. Allerdings wird die Streuung der Ergebnisse mit zunehmender Lagerungsdauer größer, sodass die Spaltzugfestigkeiten nach 84 Tagen im Bereich von 0,66 bis 1,31 MPa schwanken.

Die BEM-Gemische mit 11 und 12 M.-% der BE2 hatten die höchsten Spaltzugfestigkeiten. Hierfür ist wahrscheinlich das härtere Bindemittel in der Emulsion verantwortlich. Im Gegensatz dazu hat die

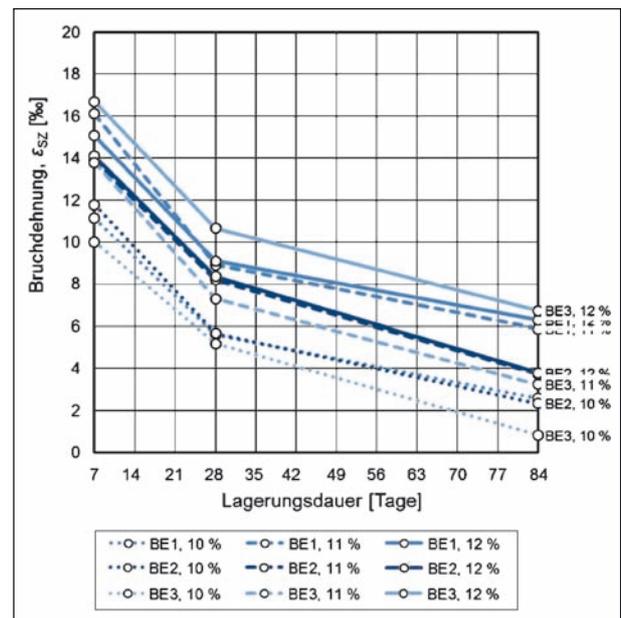


Bild A2.6: Zeitliche Entwicklung der Bruchdehnungen der BEM-Probekörper

Gruppe der Gemische mit der weichsten Bindemittelart (BE3) die niedrigsten Spaltzugfestigkeiten. Die Auswirkungen des Bindemittelgehaltes sind tendenziell, aber nicht so deutlich wie die der Bindemittelhärte erkennbar.

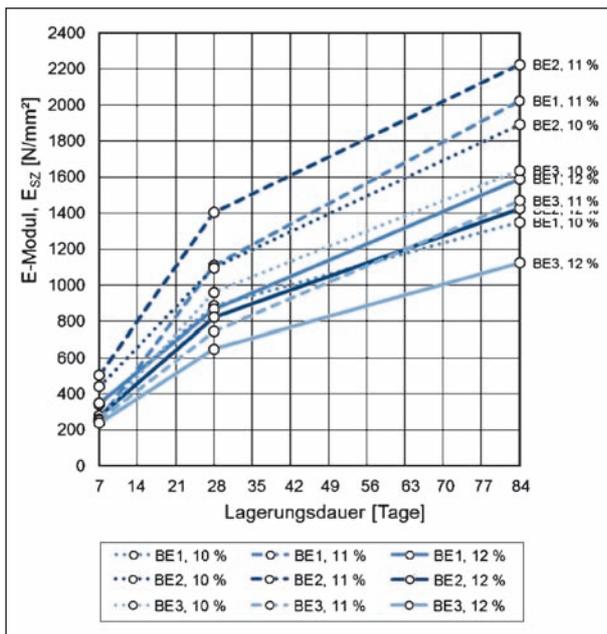


Bild A2.7: Zeitliche Entwicklung der Steifigkeiten BEM-Probekörper

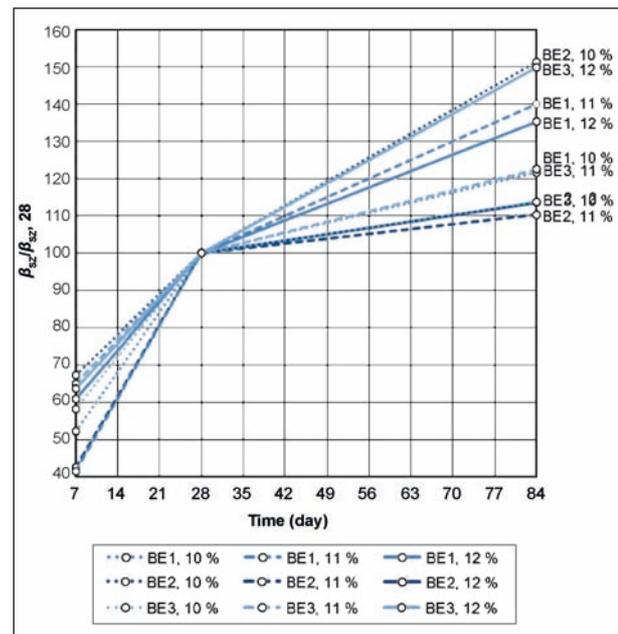


Bild A2.8: Relative zeitliche Veränderung der Spaltzugfestigkeiten (Bezugswert: 28-Tage-Werte)

Grundsätzlich ist die größte Steigung der Spaltzugfestigkeiten zwischen 7 und 28 Tagen zu beobachten. Abgeschwächt, aber immer noch deutlich erkennbar tritt zwischen 28 und 84 Tagen eine weitere Steigerung auf, die vermutlich nach 84 Tagen noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Ähnliche Entwicklungen zeigen sich bei den Bruchdehnungen und den E-Moduln, wobei die Bruchdehnungen erwartungsgemäß sinken. Das Bild A2.8 zeigt einen relativen Vergleich der Veränderungen der Spaltzugfestigkeiten zwischen 7 und 84 Tagen, wobei der 28-Tage-Wert die 100%-Basis dargestellt

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmeßmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)
 Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
 Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller,
 Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
 Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
 Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
 Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
 Ripke
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
 Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
 Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de](http://bast.opus.hbz-nrw.de) heruntergeladen werden.
 Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
 Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
 Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
 Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungserosionen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
 Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
 Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
 Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
 Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuung
 Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
 Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
 Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
 Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
 Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
 Jansen
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
 Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
 Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
 Kunz
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
 Radenberg, Miljković, Schäfer
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
 Zweite Schlachtpforte 7
 28195 Bremen
 Tel. (0421) 3 69 03-53
 Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.