



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich 13
Bauingenieurwesen
und Geodäsie

Institut für Verkehr

Fachgebiet
Straßenwesen
mit Versuchsanstalt

Auswirkungen von wiederverwendeten Fräsasphalten mit polymermodifiziertem Bitumen und stabilisierenden Zusätzen auf Asphalteigenschaften

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der
Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Hans-Friedrich Ruwenstroth

aus Bad Wildungen

D17

Darmstadt 2003

Referent: Prof. Dr.-Ing. Walter Durth
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Ralf Roos
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald

Tag der Einreichung: 22. Oktober 2002
Tag der mündlichen Prüfung: 20. Januar 2003

D17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt des Instituts für Verkehr der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Durth danke ich sehr herzlich für die hilfreichen Ratschläge und Anregungen sowie für die Übernahme des Referats.

Mein besonderer Dank gilt zudem Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Ralf Roos und Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald für die Übernahme der Korreferate.

Allen wissenschaftlichen Kollegen und den Mitarbeitern des Fachgebiets Straßenwesen mit Versuchsanstalt sowie den wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich für ihre Unterstützung.

Darmstadt, im Januar 2003

Hans-Friedrich Ruwenstroth

Kurzfassung

Im Labor wurde untersucht, wie sich die stabilisierenden Zusätze Cellulosefasern und Kieselsäure sowie elastomermodifiziertes Bitumen in Asphaltgranulat aus Deckschichten auf das Verdichtungs-, Verformungs- und Rissverhalten von Asphaltbetonen 0/11S und Asphaltbindern 0/16 mit jeweils 20% Asphaltgranulat und Asphalttragschichten 0/32C mit 25 und 40% Asphaltgranulat auswirken. Das Mischgut wurde bei getrennter Erwärmung von Mineralstoffen (150 bis 230°C) und Asphaltgranulat (130°C) hergestellt. Das Verdichtungsverhalten wurde mit dem Marshall-Gerät durch Ermittlung des Verdichtungswiderstands D und im Gyrator-Verdichter mittels der Verdichtungsarbeit beurteilt. Das Verformungsverhalten der Asphaltvarianten wurde mit Druckschwellversuchen und das Rissverhalten mit Spaltzugschwellversuchen untersucht. Die Bitumeneigenschaften der Asphaltvarianten wurden mit konventionellen Bitumenprüfungen und mit dem dynamischen Scherrheometer untersucht.

Die Zusätze bzw. das polymermodifizierte Bitumen (PmB) hatten keinen erkennbaren Einfluss auf die Verdichtungswiderstände, obwohl Einflüsse auf die Verdichtungsarbeiten festgestellt wurden. Durch die Wiederverwendung entstanden Doppelumhüllungen, die zu höheren Verdichtungswiderständen im Vergleich zu denen der konventionellen Referenzasphalte führten. Das Verformungsverhalten der Asphalte mit Asphaltgranulat wurde in den Axialdehnungsraten bei Druckschwellversuchen besser beurteilt als das der Referenzmischungen ohne Asphaltgranulat, wobei auf geringe positive Einflüsse der stabilisierenden Zusätze und des PmB, aber auf negative Auswirkungen durch Doppelumhüllungen geschlossen werden konnte.

Die Widerstände gegen Rissbildung der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat waren nach den Querdehnungsraten in Spaltzugschwellversuchen kleiner bis größer gegenüber denen der konventionellen Referenzasphalte.

Abstract

Effects of “Re-used, Granulated, Reclaimed Asphalt Pavements with Polymer-Modified Bitumen (PmB) and Stabilizing Additives” on Asphalt Characteristics

The effects of the stabilising additives (cellulose fibres and synthetic, amorphous precipitated silica) and the elastomer-modified bitumen in granulated, reclaimed, asphalt pavements consisting of surface courses on compacting, deformation and cracking behaviour of different hot-mix asphalt types were examined in the laboratory.

For the laboratory experiments, asphalt concrete 0/11S and binder course asphalt 0/16 were used with 20 % of granulated, reclaimed asphalt pavements. The asphalt bases 0/32C was examined with 25 and 40% of granulated, reclaimed asphalt pavements respectively.

The mixture was prepared by heating of the stone aggregates and granulated, reclaimed asphalt pavements at different temperatures separately. The stone aggregates were heated within the temperature range of 150 to 230°C and the granulated, reclaimed asphalt pavements were heated at 130°C respectively.

The compacting behaviour of the above mentioned mixture was examined with the Marshall Compactor for determination of the Compacting Resistance D and Compacting Works was calculated with the help of the Gyrator Testing Machine.

The resistance to permanent deformation of the asphalt variants was examined using the axial rates of strain with compression tests. The cracking behaviour was examined using transverse rates of strain with indirect tension tests.

The bitumen characteristics of asphalt types were examined with conventional bitumen examinations and with the Dynamic Shear Rheometer.

The stabilising additives or the PmB does not have recognisable influence on compacting resistances, although influences on the compacting works were found.

The ‘double engulfing’ of the stone aggregate in the granulated, reclaimed pavements with bitumen results into higher compacting resistances of asphalt in comparison to those of conventional reference asphalt.

The resistance to permanent deformation of the asphalt with “re-used, granulated, reclaimed asphalt pavements” was better assessed in the axial rates of strain in compression tests than that of the “reference mixtures without re-used, granulated, reclaimed asphalt pavements”.

The stabilising additives and PmB have slightly positive effect on the resistance to the permanent deformation of the asphalt with “re-used, granulated, reclaimed asphalt pavements”

but negative effect is observed in 'double engulfing' of the "re-used, granulated, reclaimed asphalt pavements".

Cracking resistance of the Asphalt types with "re-used, granulated, reclaimed asphalt pavements" was found smaller in comparison to that of conventional reference asphalt types with the indirect tension tests.

Auswirkungen von wiederverwendeten Fräsasphalten mit polymer-modifiziertem Bitumen (PmB) und stabilisierenden Zusätzen auf Asphalteeigenschaften

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Problemstellung	1
3. Zielsetzung	6
3.1 Theorie und Praxis der Zielfindung.....	6
3.2 Abgrenzung der Untersuchungen.....	8
4. Stand der Wissenschaft.....	8
4.1 Chronologischer Ablauf bisheriger Forschungen	8
4.2 Zusammenfassende Übersicht.....	23
4.3 Erkenntnisse für die eigene Arbeit.....	26
5. Methodik und Durchführung der Versuche	28
5.1 Versuchsmaterialien	30
5.1.1 Fräsasphalte	30
5.1.1.1 Asphaltgranulat mit Cellulosefasern (Asphaltgranulat AG1).....	30
5.1.1.2 Asphaltgranulat mit Kieselsäure (Asphaltgranulat AG2).....	31
5.1.1.3 Asphaltgranulat mit PmB A (Asphaltgranulat AG3)	31
5.1.1.4 Cellulosefasern, Kieselsäure und PmB	31
5.1.1.5 Eignungsprüfungen der Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3.....	33
5.1.2 Neue Mineralstoffe	35
5.1.3 Bitumen	35
5.2 Rezepturen und Eignungsprüfungen der Referenzasphalte	36
5.3 Rezepturen der Asphalte mit Asphaltgranulat	37
5.4 Erwärmungsverfahren	39
5.4.1 Varianten	39
5.4.2 Beanspruchung von Bitumen und Zusätzen	40
5.4.3 Auswahlkriterien	41
5.4.4 Simulation der Erwärmungs- und Mischverfahren im Labor	42
5.4.5 Ergebnisse der konventionellen und rheologischen Bindemittelprüfungen.....	43
5.4.6 Wahl des Erwärmungsverfahrens	44

5.4.7	Mischgutherstellung in gesonderten Behältnissen	46
5.5	Prüfverfahren	49
5.5.1	Verdichtung	49
5.5.1.1	Schlag-Verdichtung mit dem Marshall-Gerät	50
5.5.1.2	Druckschubverdichtung mit dem Gyrator-Verdichter	51
5.5.2	Gebrauchsverhalten	55
5.5.2.1	Verformung	56
5.5.2.2	Rissbildung	57
5.5.3	Bindemitteluntersuchungen mit einem dynamischen Scherrheometer	61
6.	Übersicht Messergebnisse	65
6.1	Marshall-Versuche	66
6.2	Gyrator-Versuche	71
6.3	Druckschwellversuche	72
6.4	Spaltzugschwellversuche	74
7.	Interpretation der Versuchsergebnisse	76
7.1	Verdichtungsverhalten	76
7.1.1	Verdichtungswiderstand D	76
7.1.1.1	Verdichtungswiderstände D der Asphaltbetonvarianten 0/11S	76
7.1.1.2	Verdichtungswiderstände D der Asphaltbindervarianten 0/16	80
7.1.1.3	Vergleichende Analyse der Verdichtungswiderstände D von Asphaltbeton 0/11S und Asphaltbinder 0/16	82
7.1.1.4	Verdichtungswiderstände D der Asphalttragschichtvarianten 0/32C	83
7.1.1.5	Zusammenhänge zwischen den Bindemittelanteilen aus Asphaltgranulat und neuem Bitumen und dem Verdichtungswiderstand D	84
7.1.2	Verdichtungsarbeit	85
7.2	Verformungsverhalten	91
7.3	Rissverhalten	99
7.3.1	Spaltzugschwellversuche bei 20°C	99
7.3.2	Spaltzugschwellversuche bei -5°C	108
8.	Zusammenfassende Ergebnisse und Schlussfolgerungen	111
9.	Empfehlungen für die Praxis	112
10.	Vorschläge zur weiteren Forschung	113
11.	Zusammenfassung	115

12. Verzeichnisse	117
12.1 Abbildungen.....	117
12.2 Abkürzungen	121
12.3 Literatur	123
13. Anlagen.....	131
Curriculum Vitae	

1. Einleitung

Eine technisch und wirtschaftlich günstige Asphaltwiederverwendung ist die Zugabe von Ausbauasphalt bei der Asphaltproduktion in Mischanlagen. Denn die Summe der Eigenschaften der Asphalte mit Ausbauasphaltanteilen entsprechen nach den bisherigen Erkenntnissen überwiegend denen von konventionellen Asphalten aus neuen Materialien. Die Mineralstoffe, das Bindemittel und auch Zusätze im Ausbauasphalt müssten demzufolge im neuen Asphalt wieder nahezu ihre ursprünglichen Aufgaben erfüllen.

Polymermodifiziertes Bitumen und Zusätze wie Fasern und Kieselsäure werden in konventionellen Asphalten überwiegend für verbessertes Verformungs- und Rissverhalten und auch für eine leichtere Verdichtbarkeit von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten eingesetzt. Ob und wie stabilisierende Zusätze und polymermodifiziertes Bitumen aus dem Asphaltgranulat wichtige Eigenschaften des neuen Asphalts beeinflussen, ist bisher nicht bekannt.

In dieser Arbeit wurde daher im Labor untersucht, ob und wie entscheidende, die Qualität des neuen Asphalts bestimmende Materialeigenschaften, wie die Verdichtbarkeit und die Widerstände gegen bleibende Verformungen und Rissbildungen, durch im Ausbauasphalt vorhandene Anteile an stabilisierenden Zusätzen oder polymermodifiziertem Bitumen beeinflusst werden.

2. Problemstellung

Abfälle sind nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG (1994) in erster Linie zu vermeiden und in zweiter Linie stofflich oder energetisch zu verwerten. Eine der Art und Beschaffenheit des Abfalls entsprechende hochwertige Verwertung ist anzustreben. Eine Verwertung soll schadlos erfolgen, technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar sein.

Die Verwertung von Fräsasphalt bei der Produktion von Heißmischgut ist im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes schadlos sowie technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar. Zudem stellt diese Verwertung eine entsprechend hochwertige Wiederverwertung dar, denn beides ist gegeben, die Substitution von Rohstoffen durch die gebrauchten Mineralstoffe und das gebrauchte Bitumen des Fräsasphalts und die Nutzung deren stofflicher Eigenschaften für den ursprünglichen Zweck im neuen Asphalt.

Die Wiederverwertungsrate von Ausbauasphalt wird allgemein seit 1995 von dem Deutschen Asphaltverband e.V. DAV (2000) und von KRASS et al. (1999 Teil 1 und 2) mit 100% angegeben. Der Anteil der hochwertigen Verwertung in gebundenen Schichten wurde für 1995 und 1999 auf ca. 80% ermittelt. Die Mengen an Ausbauasphalt waren in Deutschland im gleichen Zeitraum ebenfalls mit ca. 15 Mio. Tonnen relativ konstant. Nach KRASS et al. (2002 Teil 1 und 2) wurden im Jahr 1999 ca. 56% des angefallenen Ausbauasphalts in

Asphalttragschichten, ca. 4% in Asphaltbinderschichten und ca. 2,5% in Asphaltdeckschichten wiederverwendet.

Die Gründe dafür, dass ab 1995 kein Anstieg der gebundenen Wiederverwertungsmengen verzeichnet werden konnte, sind hauptsächlich in unterschiedlichen Länderregelungen zu sehen, die sich wiederum nicht nur an bisher maximal möglichen Zugabemengen orientieren. Weitere Ursachen liegen in politischen Entscheidungen bezüglich des Straßenneubaus und der baulichen Straßenerhaltung sowie in unterschiedlichen technischen Ausstattungen der Mischanlagen. Um zukünftig die Wiederverwendungsrate steigern zu können, sind bundesweit einheitliche Vorschriften und Regelungen zur Wiederverwendung von Ausbauasphalt nötig, die sich bei der Mengenbegrenzung der Asphaltgranulatzugabe am aktuellen Stand der Forschung orientieren. Der überwiegende Anteil an Ausbauasphalt wird bisher in Asphalttragschichten wiederverwendet. Der Rückgang der Neubautätigkeit verringert erheblich diesen Anteil an Wiederverwendungsmengen im Heißmischgut. Deshalb muss, worauf u.a. auch DRÜSCHNER (2001) und REINBOTH (2001 Teil 1, 2002 Teil 2) hinwiesen, die Wiederverwendung in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten besonders in den prozentualen Zugabemengen erhöht werden, um die erreichte Wiederverwendungsrate auf dem hohen Niveau von 80% halten und steigern zu können.

Für die Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten sind aufgrund der hohen Belastungen differenziertere Informationen über die bautechnischen Auswirkungen des Asphaltgranulats auf den neuen Asphalt notwendig als bei Asphalttragschichten. In Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten werden aus mehreren Gründen stabilisierende Zusätze und polymermodifizierte Bitumen verwendet. Stabilisierende Zusätze haben z.B. in Splittmastixasphalt die Aufgabe, als Bindemittelträger zu wirken. Sie sollen die hohen Bindemittelmengen während der Arbeitsgänge Mischen, Transport, Einbau und Verdichten stabilisieren und ein Abfließen des Bindemittels von den Mineralstoffen verhindern.

Ein stabilisierender Zusatz aus synthetischer Kieselsäure kann, wie die Untersuchungen von PAULMANN et al. (1983) und GAUER (1984) zeigten, die Verdichtbarkeit erleichtern und den Verformungswiderstand erhöhen sowie das Ermüdungsverhalten und Rissverhalten bei Kälte verbessern.

Polymermodifizierte Bitumen (PmB) werden bisher überwiegend in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten verwendet. Das PmB und damit die Polymerart werden nach den Anforderungen an die Asphaltdeckschicht gewählt. Nach Untersuchungen von KOLB (1984) können durch die speziellen Eigenschaften der PmB die Asphalteeigenschaften sowohl im oberen als auch im unteren Gebrauchstemperaturbereich günstig beeinflusst werden.

Hier wird nun die Frage gestellt, ob und wie die spezifischen Materialeigenschaften der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB nach der Wiederverwendung die Eigenschaften des neuen

Asphalts im einzelnen beeinflussen. Um diese Frage beantworten zu können, müssen die Beiträge der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB zu den Asphalteeigenschaften von anderen Einflüssen isoliert untersucht und quantifiziert werden. Dies ist schwierig, da die mögliche wirksame Menge an stabilisierenden Zusätzen bzw. PmB im neuen Asphalt nur auf die geringe Menge im wiederverwendeten Ausbauasphaltanteil beschränkt ist. Zudem ist mit Veränderungen der Eigenschaften der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB durch Belastungen aus Witterung und Verkehr während der Liegezeit, durch thermische und mechanische Beanspruchungen bei den Arbeitsgängen Fräsen beim Ausbau, Erwärmungen und Mischen im neuen Asphalt zu rechnen. Diese Veränderungen der Asphalteeigenschaften können von den für die Zusätze bzw. das PmB charakteristischen Wirkungen im Erstgebrauch abweichen. Das Herausfiltern ihrer Beiträge zu den Asphalteeigenschaften vor allem in Deck- und Binderschichten ist die Hauptaufgabe der Untersuchung.

Die Auswirkungen von Zusätzen auf das Verdichtungs- und Gebrauchsverhalten wären relativ leicht durch den Vergleich der Eigenschaften von Asphalten zu quantifizieren, die mit und ohne Zusätze ebenfalls im Labor hergestellt würden. Die Mineralstoffart, die Korngrößenverteilung, die Bindemittelsorte und der Bindemittelgehalt könnten jeweils konstant gehalten werden. Die Menge und Art der stabilisierenden Zusätze und das Erwärmungsverfahren müssten dagegen variiert werden.

Für die Laboruntersuchungen wurden aber Fräsasphalte verwendet, um den Bezug zur Praxis zu gewährleisten. Es existieren leider keine Asphalte gleichen Alters und Ursprungs für Vergleichszwecke, die nicht die stabilisierenden Zusätze beinhalten, sonst aber eine identische Zusammensetzung und gleiche Belastungen und Liegezeit aufweisen würden. Die Eigenschaften der Asphalte mit wiederverwendeten Fräsasphalten aus der Praxis des Straßenbaus können deshalb nur mit den Eigenschaften von Asphalten, die mit einer annähernd gleichen Korngrößenverteilung und den gleichen Bindemittelgehalten im Labor hergestellt wurden, verglichen werden. Für das frisch zuzugebende Bindemittel im neuen Asphalt mit Fräsasphalt und das Bindemittel im Vergleichsmischgut kann zwar das gleiche Bitumen verwendet werden. Aber dadurch ist das resultierende Bindemittelgemisch aus frischem Bitumen und dem älteren des Fräsasphalts nicht identisch mit dem frischen Bitumen in der Vergleichsmischung.

Die möglichst vollständigen Kenntnisse der Verdichtungs- und Gebrauchseigenschaften eines Asphalts sind vorab notwendig für einen optimalen Asphalteinsetz. Denn es sollten nur Asphalte mit konstanter hoher Qualität, d. h. optimal einstellbaren Eigenschaften eingesetzt werden. Voraussetzung für eine hohe Wiederverwendungsrate von Ausbauasphalt ist deshalb die Kenntnis der Parameter des Materials und der Asphaltproduktion für die resultierenden Eigenschaften des neuen Asphalts. Bei der Asphaltproduktion mit Wiederverwendung von Ausbauasphalt können die Eigenschaften des neuen Asphalts beeinflusst werden durch die:

- Materialeigenschaften
Asphaltgranulat (Mineralstoffe, Bitumen bzw. PmB, stabilisierende Zusätze, Stück- und Korngrößenverteilung), neue Mineralstoffe, neues Bindemittel, neue Zusätze.
- Rezepturfaktoren
Materialanteile (Asphaltgranulat, neues Bindemittel und neue Mineralstoffe, neue Zusätze), Zugabefractionen der Mineralstoffe und des Asphaltgranulats.
- Produktionsparameter
Verfahren für das Erwärmen bzw. Mischen, dazu Mischzeit und Temperaturen.

Eine gezielte Ansprache der Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB auf die Asphalteeigenschaften erscheint bei diesen vielfältigen Abhängigkeiten nur möglich, wenn in Untersuchungsreihen viele definierte Einflussfaktoren weitestgehend konstant gehalten werden können.

Die Einstellungen an einer Mischanlage steuern über das Erwärmungsverfahren sowie die Mischzeit die Temperaturen der neuen Mineralstoffe und des Asphaltgranulats und üben damit entscheidenden Einfluss auf die Asphalteeigenschaften aus. Hierbei muss einerseits die Wärmeenergie dafür ausreichend sein, dass das Bindemittel des Asphaltgranulats fließfähig wird und so als Bindemittel auch für die neuen Mineralstoffe wirksam werden kann. Andererseits muss eine Schädigung des Bindemittels durch zu hohe Temperaturen aber möglichst vermieden werden. Die Mischzeit muss so ausreichend sein, dass eine homogene Mischung aus Asphaltgranulat, neuen Mineralstoffen und Bindemittel entsteht. Die resultierende Mischguttemperatur muss so hoch und homogen sein, dass beim Mischguteinbau der geforderte Verdichtungsgrad über die gesamte Einbaubreite und Einbaustrecke erreicht werden kann.

Man unterscheidet folgende Erwärmungsmöglichkeiten:

- Erwärmung des Asphaltgranulats nur durch zuzugebende heiße Mineralstoffe,
- gemeinsame Erwärmung des Granulates mit den Mineralstoffen,
- getrennte Erwärmung von Asphaltgranulat und den neuen Mineralstoffen.

Das Bindemittel des Asphaltgranulats und auch das neu zugegebene Bindemittel werden bei diesen Verfahren mit jeweils unterschiedlich hohen Temperaturen in unterschiedlicher Dauer beansprucht. Daraus resultieren unterschiedliche thermische Belastungen für das Asphaltgranulat und das neue Bitumen, die jeweils Eigenschaftsveränderungen nach sich ziehen und demzufolge die resultierenden Bindemiteleigenschaften im neuen Asphalt auch in unterschiedlichem Maß beeinflussen.

Für das Verfahren der Erwärmung des Asphaltgranulats durch heiße Mineralstoffe werden zwar im Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat, FGSV (2000), Temperaturen für die neuen

Mineralstoffe vorgegeben, die jeweils an die gewünschte resultierende Mischguttemperatur in Abhängigkeit von der Zugabemenge und dem Wassergehalt des Asphaltgranulats angepasst sind. Aber die Auswirkungen auf die Bindemittleigenschaften der einzelnen Bindemittel bzw. auf das resultierende Bindemittel sind bei allen drei Verfahren nur schwer zu erfassen und auch nur tendenziell steuerbar, was die Möglichkeit der quantitativen Ansprache der Beiträge der stabilisierenden Zusätze zu den Asphalteigenschaften beeinträchtigt.

Je größer die Anteile des Ausbausphalts an dem neuen Asphaltmischgut sind, desto mehr werden die Eigenschaften des Asphaltgranulats die Asphalteigenschaften beeinflussen. Umso wichtiger ist es, die Auswirkungen der stofflichen Bestandteile, der Zugabemenge und der Fraktionen des Ausbausphalts zu kennen, zumal ein Asphaltmischgut mit wiederverwendetem Asphaltanteil denselben Anforderungen nach den ZTV Asphalt-StB 01 oder den ZTVT-StB 95 entsprechen muss wie ein Asphalt aus neuen Materialien. Ob die Eigenschaften eines Mischguts mit Asphaltgranulatanteilen im Rahmen der von den genannten Regelwerken vorgegebenen Bereiche zu liegen kommen, ist nicht so sicher einzurichten wie bei der Herstellung von konventionellem Mischgut.

Es müssen hierbei einige in gewissen Grenzen zusätzlich variable, aber manchmal nur minimal messbare Größen bzw. Eigenschaften berücksichtigt werden:

- Die Korngrößenverteilung in der Asphaltgranulat-Zugabe unterliegt Schwankungen, da die Mineralstoffe des Ausbausphalts nicht wie bei der konventionellen Mischgutherstellung heiß abgesiebt werden können.

Es entstehen somit von Charge zu Charge leicht unterschiedliche Korngrößenverteilungen im resultierenden Mischgut.

Damit schwankt das wichtige Brechsand-Natursand-Verhältnis ebenfalls.

- Dadurch tritt auch eine Schwankung des Bindemittelgehalts im resultierenden Mischgut auf, denn in der verwendeten Asphaltgranulatmenge bzw. -fraktion kann der Anteil an Bitumen etwas größer oder kleiner sein, als er durchschnittlich in der ausgebauten Schicht vorliegt.
- Auch der Hohlraum der Asphaltmasse ist folglich Schwankungen unterworfen, da er abhängig ist von der Korngrößenverteilung, dem Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsergebnis.
- Das Verdichtungsergebnis auf der Baustelle ist wiederum abhängig von der Wahl der Verdichtungsmethode, die bezüglich der Verdichtungseigenschaften des Mischguts auszuwählen ist. Die Verdichtungseigenschaften sind aufgrund der schwankenden Zusammensetzung des Mischguts und gegebenenfalls wegen teilweise auftretender Doppelumhüllungen ebenfalls Schwankungen unterworfen.
- Die Lufttemperatur und die Witterung (Niederschläge, Wind) beim Einbau schwanken ebenfalls.

Es ist somit festzustellen, dass die Eigenschaften eines Asphalts mit wiederverwendeten Anteilen von vielen, aber im Einzelnen gering wirksamen Einflussfaktoren abhängen. Eine Aussage darüber zu treffen, ob die Anforderungen nach den ZTV Asphalt-StB 01 oder den ZTVT-StB 95 kontinuierlich und sicher erfüllt werden, ist für Asphaltmischgut mit Asphaltgranulatanteilen daher vergleichsweise schwierig.

Auch aus den Eigenschaften der durch Extraktion des neuen Asphaltmischguts gewonnenen Bindemittelmischung lassen sich bisher keine sicheren Rückschlüsse auf die Asphalteeigenschaften vornehmen. Denn die stabilisierenden Zusätze, Cellulosefasern und Kieselsäure, sind im herausgelösten Bindemittel meist nicht mehr messbar enthalten, sondern befinden sich zwischen den rückgewonnenen Mineralstoffen. Die so genannte Doppelumhüllung, die doppelte Umhüllung der Mineralstoffe des Ausbauasphalts durch nicht vollständig aufgeschmolzenes Bindemittel des Ausbauasphalts und zusätzlich durch neu zugegebenes Bindemittel, könnte vielleicht einen weiteren, besser quantifizierbaren Einfluss auf die Eigenschaften des neuen Asphalts darstellen.

Die komplizierte Problemstellung lässt also eine schwierige Zielfindung erwarten.

3. Zielsetzung

3.1 Theorie und Praxis der Zielfindung

Zunächst zur üblichen Vorgehensweise. Straßenbefestigungen sollen nach den RStO 01 (2001) den Beanspruchungen aus Verkehr und Witterung während des in der Regel dreißigjährigen Nutzungszeitraumes standhalten. Die dazu notwendige Qualität bzw. die Eignung einer Asphaltmischung ist anhand einer Eignungsprüfung nach dem Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt FGSV (1998) vor der großtechnischen Herstellung und dem Einbau nachzuweisen. Die Untersuchungen umfassen im Wesentlichen die Prüfung der Bindemittel- und der Mineralstoffeigenschaften, der Zusammensetzung des Mischgutes und die Prüfung von Marshall-Probekörpern bezüglich Hohlraumgehalt der verdichteten Asphaltmischung.

Für Asphaltmischgut, das für Bauklassen SV und I oder für Verkehrsflächen mit besonderen Beanspruchungen verwendet werden soll, sowie für spezielle Asphaltarten werden zusätzlich die Prüfung der Verdichtbarkeit, des Verformungswiderstands und des Verhaltens bei tiefen Temperaturen vorgeschlagen.

Auch für Asphalt mit Anteilen von Ausbauasphalt sind weitere Prüfungen zur Beurteilung der Eignung empfohlen. Zum einen, weil dessen Eignung nicht ausreichend anhand von Hohlraumgehalt und den resultierenden Bindemittelleigenschaften überprüft werden kann, zum andern, weil die Auswirkungen der Herstellungsparameter sowie der Materialeigenschaften des Asphalt-

granulats, des neuen Bindemittels und der neuen Mineralstoffe als auch deren Wechselwirkungen untereinander ohne zusätzliche Prüfungen nicht festgestellt werden können. Aus diesen Gründen werden bei normalen Eignungsprüfungen auch die Auswirkungen von Zusätzen oder PmB in Asphaltgranulaten auf die resultierenden Asphalteeigenschaften nicht ermittelt und bleiben ebenfalls ohne weitere Prüfungen bei der Beurteilung der Eignung unberücksichtigt. Erfahrungen wurden in der Praxis zwar gesammelt, aber noch nicht wissenschaftlich behandelt. Die Ziele der vorliegenden Untersuchungen sind daher, die Auswirkungen von Zusätzen bzw. des PmB im Asphaltgranulat auf das Verdichtungs-, Verformungs- und Rissverhalten des resultierenden Asphalts mit den zwangsläufig unterschiedlichsten Herstellungsparametern zu beurteilen.

Theoretisch könnten die Auswirkungen von speziellen Zusätzen und PmB in Asphaltgranulaten auf die Asphalteeigenschaften an Asphalten mit Asphaltgranulaten, vergleichsweise mit und ohne Zusätzen, bzw. PmB, bei sonst identischer Rezeptur, langfristig auf entsprechenden Versuchsstrecken untersucht werden. In der Praxis sind weder solche Asphalte vom Bau bis heute in Untersuchungen verfolgt worden noch als Ausbauasphalte vorhanden.

Die Asphaltgranulate müssen also im Labor aus im Labor hergestellten Asphalten, die über lange Zeit praxisgerechten Verkehrs- und Klimabelastungen ausgesetzt wurden, mittels eines Laborbackenbrechers hergestellt werden.

Um die Auswirkungen mit dem angestrebten Praxisbezug im Labor feststellen zu können, sind an Asphalten mit Fräsasphalten im Vergleich zu konventionellen Asphalten jeweils das Verdichtungs- und Gebrauchsverhalten sowie die Bindemittleigenschaften zu untersuchen. Die Rezepturen der Asphalte müssen für die vergleichenden Untersuchungen weitestgehend übereinstimmen. Voraussetzung für die Zielfindung ist es daher, die Vorteile der Asphaltherstellung im Labor gegenüber einer großtechnischen Herstellung in einer Mischanlage zu nutzen. Denn der hauptsächliche Vorteil der Laborherstellung für die Untersuchungen liegt in einer kontinuierlich erreichbaren weitestgehend gleichen Zusammensetzung des Asphaltmischguts mit Anteilen von Ausbauasphalt. Daraus folgt, als eine weitere Voraussetzung für die Zielfindung, die praxisgerechte Simulation der großtechnischen Herstellung von Asphaltmischgut mit Anteilen von Ausbauasphalt mit Laborgeräten, speziell die Übertragung der Erwärmungsverfahren für das Asphaltgranulat ins Labor. Dabei sind weitere gesetzte Ziele der Untersuchungen, die Auswirkungen von Variationen der Herstellungsparameter, hier der Temperaturen der Mineralstoffe und des Asphaltgranulates sowie der Zugabemenge von Asphaltgranulat, auf die Asphalteeigenschaften festzustellen.

Mit einem Satz gesagt: statt des Modells „Großversuche im Maßstab 1:1“ einschlägiger Projekte real in Raum, Zeit und Belastung (Verkehr und Witterung) wird ein kleines „Labormodell“ mit

praxisnahen Versuchsparametern gewählt, daran werden Erkenntnisse gewonnen, die wiederum der Praxis im Großen als Empfehlung dienen.

3.2 Abgrenzung der Untersuchungen

Die oben dargestellten Ziele weisen ein großes Beziehungsgeflecht veränderlicher Parameter auf. Es kann in dieser Arbeit kaum durch die Fülle von Teiluntersuchungen erschöpfend analysiert und bis ins Letzte ausgeleuchtet werden. Daher steht zunächst die Aufgabe an, die maßgeblichen Schwerpunkte für die Untersuchung zu finden, deren Zusammenhang aufzudecken um plausible Aussagen zur Lösung der geschilderten Probleme zu finden und für die enger gesteckten Ziele zu formulieren.

4. Stand der Wissenschaft

4.1 Chronologischer Ablauf bisheriger Forschungen

Die Anfänge der Wiederverwertung von ausgebautem Gussasphalt reichen in Deutschland bis in die dreißiger Jahre zurück. Anfang der 70er Jahre fanden bei der Instandsetzung von Fahrbahndeckschichten aus den 50er und 60er Jahren nach DURTH (1979) und REINBOTH (2001 Teil 1 und 2002 Teil 2) ursprünglich in den USA entwickelte Rückform-Verfahren (Reshape und Repave) Anwendung. In der zweiten Hälfte der 70er Jahre begann die Wiederverwendung von Asphalt in Mischanlagen. So wurde im Jahr 1978 nach DURTH et al. (1979) in Hessen die erste Baumaßnahme durchgeführt, bei der ein komplett zerkleinerter Asphaltaufbau nach Aufbereitung in einer Mischanlage zur Herstellung der Trag- und Binderschicht auf der BAB A 48 wiederverwendet wurde.

Im Folgenden werden ab Anfang der 80er Jahre chronologisch Forschungsarbeiten zu den Eigenschaften von Asphalten mit Ausbauasphalt, zur Wiedererwärmung von Asphalt sowie über polymermodifizierte Bitumen, polymermodifizierte Asphalte und zu Asphalten mit stabilisierenden Zusätzen mit jeweils einer Zusammenfassung ihrer Ergebnisse aufgeführt. In den bisherigen Untersuchungen von Asphalten mit Anteilen von Ausbauasphalt wurden die möglichen Auswirkungen von PmB oder stabilisierenden Zusätzen im Ausbauasphalt auf die Asphalteeigenschaften nicht explizit berücksichtigt.

Es folgt (unter 4.2) eine Zusammenfassung der Forschungen und ihrer Ergebnisse zur Weiterentwicklung, d. h. positiven oder negativen Veränderung der Wiederverwendungstechnik.

In den USA wurden schon Anfang der achtziger Jahre Forschungen bezüglich der Eigenschaften von Asphalten mit Ausbauasphalt betrieben. Die Forschungsarbeiten befassten sich u.a. mit dynamischen Prüfungen zur Ermüdung, mit den Verformungseigenschaften sowie mit den Kosten und dem Energieaufwand bei der Wiederverwendung von Asphalt. Nach WHITCOMB et al. (1981) war der Ermüdungswiderstand des Asphalts mit Ausbauasphalt größer als bei dem zur Kontrolle verwendeten konventionellen Mischgut. POTTS et al. (1981) ermittelten Kosteneinsparungen von rund 25% und Energieeinsparungen von rund 45 % bei der Wiederverwendung von Altasphalt im Heißmischverfahren auf einer 13 km langen Versuchsstrecke in Florida. FROMM et al. (1981) stellten keine Probleme bei der Wiederverwendung von Asphalt mit Schwefelzusatz fest.

BARTHEL et al. (1981) berichteten, dass ein Asphaltbeton 0/11 mit 0,5 Gew.-% synthetischer Kieselsäure (SIPERNAT 22) im Vergleich zu einem Asphaltbeton ohne Kieselsäure im Kriechversuch bei 40°C eine Verbesserung des Verformungswiderstandes zwischen 40% und 62% zeigte und im Spurbildungstest bei 50°C eine Spurrinnenreduzierung von 27,3 % erreichte.

GRAGGER berichtete 1982 über den Stand der Wiederverwendung in Frankreich. Für Laboruntersuchungen von Mischgut mit Altasphalt wurde ein Verfahren zur Herstellung von neuem Mischgut mit Altasphalt im Labor vorgeschlagen. Für die Erhitzung und die Trocknung des Ausbauasphalts sowie der zusätzlichen Mineralstoffe wurden eine Lagerung im Wärmebehälter bei einer Temperatur von 150°C und eine Verweilzeit von fünf Stunden angegeben. Das Mischgut sollte in folgender Reihenfolge gemischt werden: zuerst der Ausbauasphalt, nach 15 Sekunden Mischzeit die zusätzlichen Mineralstoffe und nach weiteren 15 Sekunden „trockenen“ Mischens die Zugabe des frischen Bitumens. Die Gesamtmischzeit kann nach der Art des verwendeten Labormischers festgelegt werden.

Zur Untersuchung des Mischguts mit Altasphalt im Labor wurden Verdichtungsversuche mit dem Gyrator-Verdichter und Marshall-Prüfungen mit unterschiedlichen Rezepturen sowie Spurrinnenprüfungen und Untersuchungen des resultierenden Bindemittels vorgeschlagen.

Nach GRAGGER konnten bei Vergleichen der mechanischen Eigenschaften des im Labor hergestellten Mischguts mit denen eines in einem Trommelmischer hergestellten und in der Stadt Blois eingebauten Mischguts die gleichen Eigenschaften festgestellt werden. Das im Labor aus dem Mischgut extrahierte Bindemittel wies jedoch bessere Kennwerte auf als das Bindemittel, das aus einem in einer Mischanlage hergestellten Mischgut extrahiert wurde.

Die unterschiedlichen Erwärmungsverfahren, die im Labor vorgenommene getrennte Erwärmung des Asphaltgranulats und der zusätzlichen Mineralstoffe gegenüber der Erwärmung des

Asphaltgranulats durch die heißen Mineralstoffe in der Mischanlage lassen auf den Einfluss des Erwärmungsverfahrens auf das resultierende Bindemittel schließen.

Untersuchungen zur Qualität von Asphaltmischgut mit Ausbauasphalt lagen in Frankreich nur wenige vor. Folgende bis dahin gezogene Schlussfolgerungen stellte GRAGGER (1982) zusammen:

- die Homogenität von Mischgut mit Fräsasphalt aus einer homogenen Halde war der Homogenität von auf konventionelle Weise mit der gleichen Mischanlage hergestelltem Mischgut gleichwertig.
- die Verarbeitung und Verdichtung von Asphaltmischgut mit Fräsasphalt unterschied sich nur wenig von konventionellem Mischgut.
- die Druck- und die Spaltzugfestigkeit der Asphalte mit Fräsasphalt wurde deutlich von der Penetration des Bindemittels im Fräsasphalt beeinflusst.
- Spurbildungsversuche ergaben ein ungünstigeres Verhalten von Mischgut mit Fräsasphalt, obwohl die Penetrationswerte der rückgewonnenen Bindemittel der Asphalte ein besseres Verhalten erwarten ließen.

Deshalb wurde die vollständige Vermischung des neuen und des Asphaltgranulatbindemittels im Asphaltmischgut angezweifelt. Es wurde angenommen, dass das eventuell am Phänomen der Doppelumhüllung liege.

Für Rezepturen mit Regenerierungsmitteln für das Bindemittel des Fräsasphalts, die sich durch einen geringen Asphaltenengehalt auszeichneten, konnten günstigere Versuchsergebnisse beim Spurbildungsversuch ermittelt werden, was auf eine bessere Vermischung der beiden Bindemittel zurückgeführt wurde.

- Die Ergebnisse von direkten Zugversuchen, die aufgrund der hohen Verdichtungsgrade der hergestellten Probekörper schwer zu deuten waren, blieben hinter den Erwartungen zurück. Als vermutliche Ursache wurde wiederum die Doppelumhüllung vermutet.

Weitere, Anfang der achtziger Jahre in Frankreich durchgeführte Untersuchungen zum Verhalten von Asphaltsschichten mit Fräsasphalt an fünf Probestrecken ergaben u.a. nach GRAGGER (1982), dass die Befürchtungen, es würde bei Mischgut mit Asphaltgranulat zu ausgeprägteren Spurrinnen kommen, sich nach einer Liegezeit von einem Jahr nicht bestätigt hatten.

In den Niederlanden wurden 1980 zwei Großversuche mit Kiestragschichten durchgeführt, die mit 25 Gew.-% Ausbauasphalt hergestellt wurden. Bis 1982 ergaben sich nach GERARDU und VIZI (1982) folgende Ergebnisse bezüglich der Eigenschaften des Mischgutes:

- Es waren keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Zusammensetzungen von Referenzmischgut und Mischgut mit Ausbauasphalt feststellbar, eine Trennung des Asphaltgranulats in die Fraktionen 0/16 und 16/45 wurde als nicht nötig beurteilt.
- Raumdichten, Ausfüllungsgrad und Verdichtungsgrad ließen zwischen dem Referenzmischgut und dem Mischgut mit Ausbauasphalt keine Unterschiede erkennen.
- Die Bindemitteluntersuchungen ergaben, dass das resultierende Bitumen nach der Wiederverwendung einer größeren Erhärtung unterlag als das aus der Referenzmischung extrahierte Bitumen.
- Das Mischgut mit Ausbauasphalt erreichte eine geringere relative Spurtiefe bei Versuchen mit dem Wheel-Tracking-Apparat und höhere Steifigkeiten bei Kriechversuchen.

KOLB (1984) untersuchte mit Polymerzusätzen hergestellte und lieferfertige polymermodifizierte Bitumen im Vergleich mit konventionellen Straßenbaubitumen sowie den Einfluss dieser Bindemittel auf die Eigenschaften eines Asphaltbetons.

Bei hohen Temperaturen führten die Polymermodifizierungen zu Konsistenz erhöhungen gegenüber Bitumen B80. Die Temperaturempfindlichkeit der PmB war überwiegend geringer als die von Straßenbaubitumen, d.h. die Zunahme der Konsistenz war mit abnehmender Temperatur geringer. Konventionelle Konsistenzdaten, wie der Erweichungspunkt Ring und Kugel, die Penetration und die Duktilität ließen nicht auf adäquate rheologische Kennwerte aus Versuchen mit einem Balance-Rheometer schließen. Die Duktilität und der Brechpunkt waren wenig geeignet, das Kälteverhalten von PmB zu beurteilen. Es stellten sich Abhängigkeiten der PmB-Kennwerte von der Provenienz und Sorte der Ausgangsbitumen, der Art, der Menge und des Zugabeverfahrens der Polymerzusätze sowie deren Verteilung im Bitumen ein. Die PmB-Eigenschaften änderten sich nicht wesentlich nach einer thermischen Beanspruchung im rotierenden Kolben bei einer Temperatur von 165°C nach DIN 52016. Im Gegensatz zu konventionellen Konsistenzdaten, bei denen nur geringe Abhängigkeiten zu den Ergebnissen aus Asphaltprüfungen auftraten, wiesen viskoelastische Kennwerte der lieferfertigen PmB, wie Speicher- und Verlustmodul, gute Abhängigkeiten auf. Die untersuchten PmB, die erhöhte elastische Eigenschaften gegenüber Straßenbaubitumen besaßen, führten auch zu deutlichen Verbesserungen der Verformungsbeständigkeit der damit hergestellten Asphalte.

An Asphalten mit PmB gegenüber Asphalt mit B80 wurden mittels dynamischer Biegezugversuche bei 25°C eine höhere Lastwechselanzahl bis zum Beginn der Bruchphase festgestellt. Nach KOLB kann anhand der Ergebnisse bei einer Prüftemperatur von 25°C auch auf Eigenschaften bei -20°C geschlossen werden.

Nach BLUMER (1985) ergaben in der Schweiz durchgeführte Untersuchungen an Mischgut mit 20 bis 40 Gew.-% Ausbauasphalt, dass die Streuungen der Korngrößenverteilungen und des Bindemittelgehaltes in der Größenordnung von konventionellem Mischgut liegen, welches mit derselben Anlage hergestellt wurde. Die Erhöhung des Anteils an Ausbauasphalt hatte tendenziell eine Vergrößerung der Streuung zur Folge, die sich aber im untersuchten Mengenbereich, bis 40 Gew.-% Zugabe, nicht auf die Mischgutqualität auswirkte. Auch an Marshall-Probe-körpern aus Mischgut mit Asphaltgranulat wurden gegenüber solchen aus konventionellem Mischgut keine wesentlichen Änderungen von Hohlraumgehalt und Festigkeit festgestellt.

Bei der Verwendung des gleichen Bitumens für das konventionelle Mischgut und als zusätzliches Bitumen in Mischungen mit 20 Gew.-% Asphaltgranulat wurde festgestellt, dass das resultierende Bindemittel aus Mischgut mit Ausbauasphalt geringere Penetrationswerte als das Bindemittel aus dem konventionellen Asphalt aufwies. Es wurde daher empfohlen, für Mischgut mit Ausbauasphalt eine weichere Bitumensorte zu wählen, als man sie für konventionelles Mischgut verwenden würde.

Die Untersuchungen an Bohrkernen aus Schichten mit und ohne Ausbauasphalt ergaben nach BLUMER (1985), dass bezüglich der Verdichtbarkeit (Raumgewicht, Hohlraumgehalt) und den mechanischen Eigenschaften (Kriechprüfungen) keine signifikanten Unterschiede festzustellen waren.

Nach dem von ERHARDT (1985) zusammengefassten Beitrag von FEIX anlässlich des Asphalt-Seminars 1985 waren bis zu diesem Zeitpunkt die Zusammenhänge zwischen dem Anteil an Ausbauasphalt und der Verdichtbarkeit, des Stabilitäts- sowie des Langzeitverhaltens noch nicht befriedigend geklärt. Ebenso wurde die Ansicht vertreten, dass das Zusammenwirken der Eigenschaften des Bindemittels aus dem Ausbauasphalt und des zusätzlichen Bindemittels bezüglich der Mischguteigenschaften, insbesondere die Verformungsstabilität und das Relaxationsverhalten, noch weitgehend ungeklärt sind. Es wurde berichtet, dass die Ergebnisse aus dynamischen Druckschwellversuchen und Marshallversuchen auf ein deutlich von der Viskosität des Asphaltgranulatbindemittels abhängiges Verdichtungs- und Stabilitäts- bzw. Langzeitverhalten hindeuten.

Mittels Biegeschwellversuchen an Tragschichten mit 50 Gew.-% Asphaltgranulat aus einer Durchlaufmischanlage und einer Chargenmischanlage und einem konventionellen Tragschichtmischgut wurde von PAULMANN und GRÄTZ (1987) festgestellt, dass die beiden Tragschichten mit Asphaltgranulat längere Zeiten bis zum Beginn der Bruchphase aufwiesen als das konventionelle Tragschichtmischgut. Aus diesen Ergebnissen wurde gefolgert, dass eine Zugabe von

bis zu 50 Gew.-% Asphaltgranulat zum Tragschichtmischgut keinen negativen Einfluss auf die Gebrauchsdauer ausübt.

HADIPOUR und ANDERSON (1988) stellten u.a. fest, dass Ausbauasphaltanteile bis 30% in Asphaltbetonen die bleibenden Verformungen relativ zu konventionellen Mischungen vermindern konnten und zudem weniger empfindlich gegen Rissbildungen bei Kälte waren.

Höhere Steifigkeiten und Zugfestigkeiten von Tragschichten mit 50 Gew.-% Asphaltgranulat gegenüber konventionellem Mischgut wurden auch von LEYKAUF (1988) festgestellt.

HARTMANN (1989) berichtete über die Erfahrungen mit einer Asphaltbetondeckschicht, die mit 75 Gew.-% Ausbauasphalt hergestellt wurde. Nach viereinhalb Jahren Liegezeit wurden nur geringe Verformungen festgestellt.

Über Untersuchungen zu Mischprozessen von Asphalt bei einer Mitverwendung von Asphaltgranulat berichtete HUSCHEK (1992). Die Versuche wurden mit einem Doppelwellen-Zwangsmischer im Labor durchgeführt. Dabei wurden Wärmeenergiebilanzen nach der Mischdauer aufgestellt. Es wurde u.a. festgestellt, dass die Höhe des Erweichungspunktes Ring und Kugel im resultierenden Bindemittel hauptsächlich von der Temperatur der zusätzlichen Mineralstoffe abhängt.

FREUND (1990) und CHARIF (1992) führten Untersuchungen an Bohrkernen und an Prüfkörpern aus Ausbaustücken durch. Bei den Schichten handelte es sich um Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten. Die Schichten bestanden aus Asphaltbeton 0/11 mit 20 Gew.-% Fräsasphalt und Asphaltbinder 0/16 mit 25 Gew.-% Fräsasphalt und aus konventionellen Asphaltdeck- und Binderschichten ohne Fräsasphalt. Die Schichten wurden jeweils unter Variation des Erwärmungsverfahrens der Asphaltgranulate, d. h. kalte oder erwärmte Zugabe, hergestellt. Das Kälteverhalten wurde mit Zug- und Abkühlversuchen ermittelt. Zudem wurden Biegeversuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Die prüftechnische Ansprache des Verhaltens bei hohen Temperaturen wurden mit dynamischen Druckschwellversuchen vorgenommen.

Ein unterschiedliches Verhalten bei tiefen Temperaturen konnte bei den Binderschichtvarianten nicht und bei den Deckschichtvarianten in der Mehrzahl aller Merkmale nicht festgestellt werden. Sofern ein Unterschied festgestellt wurde, fiel dieser nach CHARIF bei vier Merkmalen (Zugfestigkeit bei 0°C und -20°C, Bruchdehnung bei +20°C und -15°C) zugunsten und bei einem

Merkmal (Bruchdehnung bei -5°C) zuungunsten der Deckschichtvariante mit vorerwärmtem Ausbauasphalt aus.

Aus den Ergebnissen wurde gefolgert, dass das mechanische Verhalten bei tiefen Temperaturen durch die Zugabe von Asphaltgranulat in kaltem oder vorerwärmtem Zustand nicht beeinflusst wurde. Auch die Ergebnisse der Biegeversuche bei $+20^{\circ}\text{C}$ zeigten keine kennzeichnenden Unterschiede an Asphaltdeck- und an Asphaltbinderschichten infolge Kalt- oder Warmzugaben.

Hohe Temperaturen ergaben in der Regel keine Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten bezüglich des mechanischen Verhaltens. Ein geringer Unterschied bei der Lastwechselanzahl im Wendepunkt wurde nur bei der Deckschichtvariante mit vorerwärmtem Asphaltgranulat ermittelt.

CHARIF (1992) fand bezüglich der durchgeführten Untersuchungen heraus, dass die Warm- bzw. Kaltzugabe von 25 Gew.-% in Asphaltbinder- und 20 Gew.-% in Asphaltdeckschichten zu keinen praxisrelevanten Auswirkungen auf das mechanische Verhalten führten.

Mit mineralogischen Untersuchungen der Asphaltvarianten wurden jeweils die Homogenität der Mischgutkomponenten nachgewiesen. Anhand von Dünnschliffen wurde auch im Mörtelbereich eine Homogenisierung nachgewiesen, woraus indirekt abgeleitet wurde, dass keine Doppelumhüllung der Asphaltgranulate vorlag.

Die bei den Biegeschwellversuchen entstandenen Bruchzonen standen nicht im Zusammenhang mit der Verteilung des Asphaltgranulats in den Prüfkörpern.

BELLIN und TAPPERT (1992) berichten über praktische Erfahrungen bei der Verwendung von 10 Gew.-% und 20 Gew.-% Fräsasphalt in Asphaltdeckschichten. Während fünfjähriger Liegezeit konnten wesentliche Veränderungen weder mit systematischer visueller Zustandsbeurteilung der Oberfläche noch anhand von Bohrkernuntersuchungen (Bindemittelgehalt, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Hohlraumgehalt, Korngrößenverteilung) festgestellt werden.

HINTERWÄLLER (1994) beurteilte die stabilisierenden Zusätze Cellulosefasern, Mineralfasern, Calciumhydroxid und Kieselgur als Pulver und eine Füllermischung aus Gesteinsmehl und synthetischer Kieselsäure für die Verwendung in Splittmastixasphalten. Stabilisierende Zusätze im Bitumen bewirkten gegenüber reinem Bitumen eine Abnahme der Penetration und Duktilität sowie eine Erhöhung der Erweichungs- und Brechpunkte. Die Unterschiede waren bei den Cellulosefasern am größten. Die Viskositäten der Bitumen mit stabilisierenden Zusätzen zeigten im Bereich für Temperaturen unterhalb des Erweichungspunktes deutliche Erhöhungen im Vergleich zu denen ohne Zusätze.

Es konnten keine Änderungen der Eigenschaften der Zusätze nach Alterung durch thermische Beanspruchung der Bitumen mit Zusätzen nachgewiesen werden. Den Zusätzen konnten keine Eigenschaften zugeschrieben werden, die das Alterungsverhalten von Bitumen beeinflussen. Das Verdichtungsverhalten der Asphalte mit unterschiedlichen Zusätzen zeigte keine bedeutenden Unterschiede auf.

Die Spaltzugfestigkeiten der Asphalte mit den untersuchten Zusätzen waren, mit Ausnahme der Asphalte mit Cellulosefasern, höher als bei dem Asphalt ohne Zusätze. Die Zugfestigkeit ist danach unabhängig von dem Zusatzgehalt an Cellulosefasergranulat, erhöht sich aber bei höherem Kieselgur- und Polymeranteil deutlich.

Dynamische Druckschwellversuche ergaben für Asphalte mit dem Zusatz Kieselgur den höchsten Widerstand gegen bleibende Verformung, gefolgt von Mischgütern mit Polymergranulat. Nur geringe Verbesserungen der Wärmestandfestigkeiten stellten sich an Asphalten mit Cellulosefasern ein.

In Georgia (USA) untersuchten KANDHAL et al. (1995) Asphalte aus Teststrecken mit Abschnitten, in denen jeweils konventionelle Asphalte und Asphalte mit 10 bis 25% Ausbauasphalt unter gleichen Bedingungen bzw. zu gleichen Zeiten eingebaut wurden. Nach eineinhalb bis zweieinviertel Jahren unter Verkehr wurden keine wesentlichen Spurrinnenbildungen, Substanzverluste, Verwitterungen und Ermüdungsrisse auf den Teststrecken festgestellt. Zwischen den folgenden Eigenschaften der konventionellen Asphalte und der Asphalte mit Asphaltgranulat bzw. deren Bindemitteln wurden keine signifikanten Unterschiede ermittelt:

- a) die Hohlraumgehalte an Bohrkernen, die elastischen Anteile der komplexen Schubmodule bei 25°C der rückgewonnenen Bitumen im dynamischen Scherrheometer.
- b) die Penetration bei 25°C, die Viskosität bei 60°C, der Spurrinnenbildungsfaktor $G^*/\sin \delta$ bei 64°C und der Ermüdungsrissfaktor $G^* \sin \delta$ bei 22°C der Bitumen nach Alterung (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT).
- c) Hohlraumgehalt an Probekörpern, Gyrotory Stability Index (GSI) als Maß für die Spurbildungsanfälligkeit nach STUART et al. (2000), dynamisches Kriechmodul bei 60°C.

Zwischen der Spaltzugfestigkeit bei 25°C, dem Gyrotory Elasto-Plastic Index (GEPI) als Maß für die innere Reibung nach STUART et al. (2000) und dem Rollenlagerdruck im Gyrotory-Verdichter der Asphalte mit und ohne Ausbauasphalt traten signifikante Unterschiede auf. Die Spaltzugfestigkeit und die innere Reibung der Asphalte mit Ausbauasphalt waren geringer als bei den konventionellen Asphalten.

Ferner wurden die Penetrationen, Viskositäten und Hohlraumgehalte von weiteren 15 Projekten mit konventionellen Asphalten und 18 Projekten mit Asphalten mit Ausbauasphalt (10 bis 40%)

aus Georgia nach Liegezeiten von einem Viertel bis dreieinhalb Jahren bestimmt. Signifikante Unterschiede wurden nicht festgestellt.

Mit visuellen Zustandserfassungen wurden insgesamt keine Unterschiede zwischen Strecken aus konventionellem Asphalt und Strecken aus Asphalt mit Ausbauasphalt festgestellt. Es wurde aus den Ergebnissen der gesamten Untersuchungen gefolgert, dass die Leistungsfähigkeit der Strecken aus Asphalt mit Ausbauasphaltanteilen der von Strecken mit konventionellem Asphalt entsprach.

ARAND (1996a) untersuchte, ob nach einer Doppelumhüllung zwischen Bitumen des Asphaltgranulats und dem neuen, weicheren Bitumen ein temperatur- und zeitabhängiger Viskositätsausgleich stattfindet. Danach konnte aus den Ergebnissen der Laborversuche für die Praxis gefolgert werden, dass ohne eine Vermischung des härteren Bitumens aus dem Asphaltgranulat mit dem neu zugegebenen weicheren Bitumen kein Viskositätsausgleich stattfindet.

Um die Einflüsse gealterter und teilweise rückerweichter Bindemittel auf die Asphalteigenschaften beurteilen zu können, wurden die Verdichtbarkeiten und die Verformungswiderstände sowie das Kälte- und das Ermüdungsverhalten untersucht.

Die ermittelten Verdichtungswiderstände D und die erforderlichen Verdichtungsarbeiten S waren nicht abhängig davon, auf welche Viskositätsstufe das Bitumen künstlich verhärtet oder verhärtet und rückerweicht worden war. ARAND zog aus den Ergebnissen für die Praxis den Schluss, dass die Härte des im Asphaltgranulat vorhandenen und des zum Rückerweichen verwendeten Bitumens keine wesentlichen Einflüsse auf das Verdichtungsverhalten hat, vorausgesetzt, dass die Verdichtungstemperatur ausreichend hoch ist.

Die Auswertung von Kriechtests an Asphaltbetonen 0/8 ergab, dass ein unterschiedliches Maß an künstlicher Alterung der verwendeten Bitumen, bis zu einem Erweichungspunkt Ring und Kugel von 90°C mit jeweiliger Rückerweichung auf gleiche Erweichungspunkte Ring und Kugel, sich nicht auf die Verformungswiderstände der Asphalte auswirkt. Asphaltbetone mit Bitumen, die künstlich gealtert und wieder erweicht wurden, wiesen ebenso gleiches Kälteverhalten und Ermüdungsverhalten auf wie Asphaltbetone mit normal hartem, nicht gealtertem Bitumen.

Mit Ergebnissen von Spaltzugversuchen wurde das Haftverhalten der Asphaltbetone beurteilt. ARAND stellte fest, dass das Rückerweichen eines gealterten Bitumens sich nicht auf das Haftverhalten auswirkt.

Auch ein systematischer Zusammenhang zwischen maximaler Stückgröße des Asphaltgranulats und der Gleichmäßigkeit des resultierenden Asphaltmischguts war nach ARAND (1996b) nicht nachzuweisen. An Asphalten mit neuem Bitumen und neuen Mineralstoffen und einem Anteil

von 50% Asphaltgranulat mit natürlich gealtertem Bitumen wurden die Verdichtbarkeit, der Verformungswiderstand, das Kälte- und Haftverhalten ermittelt.

Es wurde festgestellt, dass die Verdichtbarkeit (Verdichtungswiderstand D) der Asphalte weder durch die Härte des Bitumens im Asphaltgranulat noch durch die Weichheit des neuen Bindemittels wesentlich beeinflusst wird. Der Verformungswiderstand der Asphalte nahm mit geringeren Erweichungspunkten Ring und Kugel des resultierenden Bindemittels ab.

Einaxiale Zugversuche ließen erkennen, dass die Asphalte mit härteren Bitumen bei Prüftemperaturen von +5 und +20°C die größeren und bei -10 und -25°C die kleineren Zugfestigkeiten besaßen. Tendenziell konnte festgestellt werden, dass Asphalte mit stärker gealterten Asphaltgranulatbitumen geringere Zugfestigkeiten besitzen als Asphalte mit weniger stark gealterten Bitumen bei gleichen Erweichungspunkten Ring und Kugel der resultierenden „vermeintlich rückerweichten“ Bindemittel.

Abkühlversuche ergaben, dass die Bruchdehnungen mit geringer werdender Viskosität des rückerweichten Bitumens im resultierenden Asphaltmischgut bei allen Prüftemperaturen deutlich zunahm. Es ließ sich analog zu den Ergebnissen der Zugversuche auch hierbei der Trend erkennen, dass Asphalte mit ursprünglich stärker natürlich gealterten Bitumen im Asphaltgranulat größere Bruchdehnungen aufweisen, bei gleichen Erweichungspunkten Ring und Kugel der resultierenden Bindemittel. Die kryogenen Zugspannungen wurden in den Asphalten mit ursprünglich stärker natürlich gealterten Bitumen bei jeweils einem Erweichungspunkt Ring und Kugel von 50°C im resultierenden Asphalt und damit unter Verwendung eines weicheren Zusatzbindemittels stets niedriger ermittelt als die kryogenen Zugspannungen der Asphalte mit ursprünglich weniger stark gealterten Bitumen.

Das Haftverhalten der o.g. Asphalte sollte über den Spaltzugfestigkeitsabfall bei einer Prüftemperatur von +10°C nach einer Wasserlagerung (+50°C) von 24 Stunden angesprochen werden. Geringe Hohlraumgehalte von bis zu 4 Vol.-% der Marshall-Probekörper führten zu sehr geringen Spaltzugfestigkeitsabfällen, demnach konnte das Haftverhalten nicht beurteilt werden.

KIUNTKE (1996) untersuchte Straßenoberflächen und Bohrkerne sowie Mischgut aus Bohrkernen von Strecken, die mit Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten unter Wiederverwendung von Ausbauasphalt gebaut wurden. Die Untersuchungen ergaben im Vergleich zu Strecken ohne Ausbauasphalt insgesamt, dass Asphalte bzw. Asphaltstraßen mit Ausbauasphalt denen ohne Ausbauasphalt gleichwertig sein können.

RENKEN (1996) untersuchte den Einfluss der Wiedererwärmung von Asphalten im Labor auf die Eigenschaften des Bindemittels. Die Verhärtung aufgrund der Herstellung des Asphalts und der Rückgewinnung des Bitumens ist danach abhängig von der Bindemittelsorte. Thermische

Beanspruchung führt bei harten Bindemitteln zu höheren Anstiegen der Erweichungspunkte Ring und Kugel als bei weichen Bindemitteln. Asphalte mit niedrigerem Bindemittelgehalt, folglich dünneren Bindemittelfilmen, sind alterungsempfindlicher als Asphalte mit dicken Bindemittelfilmen. Die Mischgutsorte hatte keinen Einfluss auf die Verhärtung des Bindemittels aufgrund der Herstellung des Asphalts und der Rückgewinnung des Bindemittels.

Die Untersuchungen der Verhärtung aufgrund der Wiedererwärmung und der Wärmelagerung in einem konventionellen Wärmeschrank ergaben u. a., dass die Alterung des Bitumens infolge einer Wiedererwärmung bei einer Temperatur von 105°C, z.B. zur Probeteilung, für die Dauer von vier Stunden gering ist. Bei einer Lagerzeit von vier Stunden und einer Lagertemperatur von 145°C, z.B. für die Herstellung von Marshall-Probekörpern, wurden Anstiege der Erweichungspunkte Ring und Kugel von durchschnittlich 4,6°C festgestellt.

Die Untersuchungen von BETZ et al. (1997) an Asphalt 0/22 mit 50 M.-% Asphaltgranulat und mit zusätzlichem Bitumen unterschiedlicher Viskosität ergaben gegenüber Asphalt ohne Asphaltgranulat, dass mit konventionellen Bindemittelkennwerten auf resultierende Kolloidsysteme geschlossen werden konnte. Die Verarbeitbarkeit der Asphalte mit Asphaltgranulat wurde auf Probeflächen festgestellt. Die Verwendung von ausgewählten PmB als zusätzliches Bindemittel verbesserte die Verformungsfestigkeit der Asphalte mit Asphaltgranulat.

HAAG et. al. (1997) untersuchten die Gebrauchseigenschaften von Untersuchungsstrecken mit Asphalttragschichten 0/22 mit 30 Gew.-%, 50 Gew.-% und ohne Ausbauasphalt (Stadtstraße Köln-Deutz) sowie mit Asphalttragschichten 0/32 und Asphaltbinderschichten 0/22 mit 66 Gew.-% Ausbauasphalt (BAB A 48). Das Mischgut entsprach den Anforderungen der geltenden technischen Regelwerke sowie den Sollwerten der Eignungsprüfungen. Bei der Herstellung und dem Einbau traten keine Schwierigkeiten auf. Geforderte Mindest- bzw. Höchsttemperaturen und Verdichtungsgrade wurden eingehalten. Die Wasserlagerung hatte keine Auswirkungen auf das Haftfestigkeitsverhalten an Marshall-Probekörpern. Mittels Messungen und Beobachtungen auf den Strecken wurde auf die gleiche Standfestigkeit der Asphalte mit Asphaltgranulat gegenüber den Asphalten ohne Asphaltgranulat geschlossen.

Studien in Österreich ergaben nach der Association mondiale de la Route (AIPCR) bzw. der World Road Association (PIARC) (1999), dass unterschiedliche Asphaltmischungen mit PmB, PmB und Fasern, mit Gummimehl oder aromatischen Ölen aufbereitet werden konnten, ohne dass Emissionen in umweltschädlichen Konzentrationen entstanden.

Das U.S. Department of Transportation (2000) veröffentlichte die festgestellten Trends in den bisherigen Ergebnissen der vergleichenden Studie über die Erhaltung von Fahrbahnbefestigungen (Study of Rehabilitation of Asphalt Concrete Pavements). Diese Studie ist Teil der Forschungen zur Prüfung und Beurteilung des Langzeitgebrauchsverhaltens von Fahrbahnbefestigungen (Long Term Pavement Performance LTPP), die unter dem Strategic Highway Research Program (SHRP) zusammengefasst wurden. Es wurden 17 Versuchsstrecken mit jeweils neun Versuchsabschnitten untersucht. Auf acht Abschnitten wurde dünne (51 mm) und dicke (127 mm) Asphaltverstärkung aus Asphalt mit und ohne Ausbauasphalt auf gefräster und nicht gefräster Unterlage kombiniert. Auf jeweils einem Kontrollabschnitt wurde keine Asphalterhaltungsmaßnahme durchgeführt. Die Versuchsstrecken waren 0,1 bis 6,1 Jahre alt, überwiegend jünger als 4 Jahre. Bisher wurden die folgenden Trends festgestellt: Die Asphalte mit Ausbauasphalt waren steifer, aber nicht rissanfälliger als Asphalte ohne Ausbauasphalt. Längsrisse wurden auf Abschnitten mit Asphaltgranulat häufiger in der Rollspur beobachtet. Auf Abschnitten mit ungebrauchten Stoffen traten die Längsrisse häufiger außerhalb der Rollspuren auf. Insgesamt konnten zwischen dem Rissverhalten und dem Verformungsverhalten von Asphalten mit und ohne Asphaltgranulat keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

DRÖGE (2001) untersuchte Asphaltbetone 0/11S und Splittmastixasphalte 0/11S, die im großtechnischen Maßstab unter Zugabeanteilen von 20, 30 und 40 M.-% Ausbauasphalt mit unterschiedlichen Nachmischzeiten hergestellt und teilweise auf Teststrecken eingebaut wurden. In den Asphaltbetonen wurden Zugabemengen von 40 M.-% Fräsasphalt und in den Splittmastixasphalten Zugabemengen von 30 M.-% verwendet. Schäden traten nach Liegezeiten von bis zu 4 Jahren bisher nicht auf. Die maximale Zugabemenge für Fräsasphalt ist danach u.a. abhängig von der Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches im Fräsgut. In Splittmastixasphalt sollte daher nach DRÖGE nur Fräsgut aus Splittmastixasphalt verwendet werden. Ein bedeutsamer Einfluss der Zugabe von nach der Asphaltart geeignetem Fräsasphalt auf die Verformungseigenschaften wurde nicht festgestellt. Die Zugabe von weichem Bindemittel ließ den Widerstand gegen bleibende Verformungen im oberen Gebrauchstemperaturbereich sinken. Der Widerstand gegen Rissbildung bei Kälte stieg an. Unterschiedliche Härtegrade des Fräsasphaltbitumens zeigten keine relevanten Einflüsse auf das Haftverhalten und das Ermüdungsverhalten der hergestellten Deckschichten.

Mit zunehmendem Anteil von Ausbauasphalt bewirkte stark verhärtetes Bitumen im Fräsasphalt aber deutlichere Veränderungen der Verformungs- und Kälteeigenschaften. Dagegen wurden mit wenig verhärtetem Bitumen auch bei zunehmenden Anteilen an Fräsasphalt keine wesentlichen Änderungen des Haft- und des Verformungsverhaltens sowie des Kälte- und Ermüdungsverhaltens festgestellt.

Die Herstellung von Splittmastixasphalt mit Fräsasphaltanteilen erforderte lange Nachmischzeiten zur Verteilung und zur Aufschmelzung pelletierter stabilisierender Zusätze. Der Einbau der Asphaltbetone 0/11S und Splittmastixasphalte 0/11S mit Anteilen von geeigneten Fräsasphalten gelang ohne Probleme. Die untersuchten Asphalte mit Asphaltgranulatanteilen wurden als technisch gleichwertig gegenüber Asphalten aus ungebrauchten Materialien beurteilt.

LEHNÈ (2001) berichtete von einer Erprobungsstrecke, in der vier Gemische von Asphaltbinder 0/22 mit 20, 30 und 40 M.-% Ausbauasphalt eingebaut wurden. Die Asphaltbinder wurden mit einem Bitumen der Sorte B65 und Anteilen von Trinidad NAF 501 hergestellt. Für den Asphaltbinder 0/22 mit 20 M.-% wurde ein PmB 45 A ohne NAF 501 verwendet. Die Sieblinien wurden nach dem Fullerprinzip in Anlehnung an die ZTV Asphalt-StB 94 mit Änderungen und Ergänzungen, Ausgabe 1998, konzipiert. Bisher wurde festgestellt, dass der Asphaltbinder mit PmB einen größeren Verdichtungswiderstand D als die übrigen Mischgutvarianten aufwies. In Spurbildungsprüfungen mit Stahlrad im Wasserbad bei 50°C wurden mit den Mischgutvarianten überwiegend Spurtiefen von $\leq 4,5$ mm gemessen. Unstetige Sieblinien hatten keine negativen Auswirkungen auf die Spurbildung.

Im Strategic Highway Research Program SHRP der USA wurden die Belange der Wiederverwendung nicht behandelt, obgleich die Wiederverwendung von Ausbauasphalt schon eine breite Anwendung fand. Infolgedessen lieferte das System Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), das im SHRP entwickelt wurde, keine Richtlinien für Asphalte mit Anteilen von Ausbauasphalt. Da aber das System Superpave schrittweise als einheitliche Methode zur Asphaltbemessung bzw. Rezepturerstellung und zur Prüfung von Asphalt eingeführt werden sollte, wurden Richtlinien und Verfahren zur Verwendung von Ausbauasphalt im Rahmen des Systems Superpave entwickelt.

McDANIEL und ANDERSON (2001) berichteten über die Ergebnisse aus dem diesbezüglichen Forschungsprojekt 9-12 des National Cooperative Highway Research Program NCHRP. Es wurde u.a. untersucht, ob sich das Bitumen des Ausbauasphalts bei der Wiederverwendung mit dem neuen Bitumen vermischt und somit wirksam wird oder das Asphaltgranulat sich wie schwarzer Mineralstoff (Black Rock) verhält. Es wurden Asphalte aus zwei unterschiedlichen neuen Bitumen in Kombination mit drei Ausbauasphalten in Anteilen von 10 und 40% hergestellt. Dafür wurden jeweils das Bitumen und der Mineralstoff des Asphaltgranulates durch Extraktion getrennt. Aus diesen Materialien wurde zum einen jeweils Asphalt aus den Mineralstoffen des Asphaltgranulates, neuen Mineralstoffen und neuen Bitumen hergestellt (Black Rock Case). Zum anderen wurde jeweils Asphalt aus den Mineralstoffen des Asphaltgranulates,

neuen Mineralstoffen und einer Bindemittelmischung aus neuen und Asphaltgranulat-Bitumen produziert (Total Blending Case). Diesen Mischungen wurden Asphalte aus neuen Mineralstoffen, Asphaltgranulat und neuen Bitumen gegenübergestellt. Der Widerstand gegen bleibende Verformungen wurde mit dem Superpave Shear Test SST bei hohen Temperaturen geprüft. Das Ermüdungsverhalten wurde mit dem Indirect Tensile Creep Test und die Festigkeit mit Strength Test bei tiefen Temperaturen geprüft. Bei geringem Anteil (10%) an Asphaltgranulat wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsergebnissen der untersuchten Mischungen festgestellt. Ein höherer Anteil (40%) ergab signifikante Unterschiede. Durchschnittlich wurden an den Black-Rock-Mischungen geringere Steifigkeit und höhere Verformungen gegenüber den anderen zwei Mischvarianten festgestellt. Die Total-Blendig-Case-Mischungen und die Mischungen mit konventioneller Wiederverwendung zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen ihren Prüfergebnissen. Es wurde daraus geschlossen, dass größtenteils eine Vermischung des neuen und des Bitumens aus dem Asphaltgranulat bei konventioneller Wiederverwendung stattgefunden hatte. Das Bitumen des Asphaltgranulates war somit als Bitumen in der resultierenden Mischung wirksam.

Aufgrund von Ergebnissen aus Untersuchungen zu den Auswirkungen des Asphaltgranulat-bitumens auf das Bindemittelgemisch wurde u.a. gefolgert, dass Ausbausphalanteile kleiner 20% zu Bindemittelleigenschaften im Asphalt führen, die statistisch gleich den Eigenschaften des neuen Bitumens sind. Bei Asphaltgranulatanteilen größer 15% bis 30%, je nach Asphaltgranulat-Bindemittelhärte, ist aber das Bitumen des Asphaltgranulates bei der Auswahl des neuen Bitumens zu berücksichtigen.

Für die Mischgutherstellung mit Asphaltgranulatanteil im Labor wird die Erwärmung des Asphaltgranulates in Probemengen von 1 bis 2 kg auf 110°C innerhalb von zwei Stunden empfohlen. Die neuen Mineralstoffe sollten auf eine Temperatur von 10°C über der angestrebten Mischguttemperatur erwärmt werden.

Die gesamten Ergebnisse des Forschungsprojektes 9-12 sind Grundlage der Empfehlungen zur Verwendung von Ausbausphalt mit der Superpave-Mix-Design-Methode, erschienen in Form eines Handbuchs, NCHRP REPORT 452 (2001).

ANTOINE und ALVAREZ (2001) berichteten über die Wiederverwendung von 45 bis 55% Ausbausphalt aus offenporigen Asphaltdeckschichten. Offenporige Asphaltdeckschichten wurden in Frankreich ab 1984 auf Autobahnen und Nationalstraßen vermehrt eingebaut. Die Wiederverwendung erfolgte mit Doppeltrommelsystemen. Auf der Nationalstraße 4 nahe Paris wurden Ende 1993 und auf der Autobahn A50 zwischen Marseille und Aubagne in den Jahren 1996 und 1998 offenporige Asphaltdeckschichten mit Ausbausphalt aus offenporigen Asphaltdeckschichten hergestellt. Nach bisherigen Untersuchungen traten keine Unterschiede in den Zu-

sammensetzungen sowie beim Mischen und beim Einbau zwischen offenporigen Asphalten mit Ausbauasphalt aus offenporigen Asphalten und konventionellen offenporigen Asphalten ohne Ausbauasphalt auf.

4.2 Zusammenfassende Übersicht

Zusammenfassend ergeben sich aus den Untersuchungen folgende positiven (+), negativen (-) oder keine (0) Veränderungen bei der Wiederverwendung von Fräsgut unterschiedlicher Anteile (%) im Vergleich zu konventionellem Mischgut. Aussagen über Fräsgut mit Faserstoffen, PmB oder Zusätzen waren in der Literatur nicht zu finden (vergl. Abb. 4-1, Teil 1 bis 4).

Quelle	Jahr	Alte Schicht (Recycling-material)	Neue Schicht (resultierender Asphalt)	Versuch, Untersuchung, Ergebnis, Vergleich	Veränderung
Withcomb et al. (USA)	1981			Dynamische Prüfungen	+
Potts et al. (USA)	1981			Kosten- u. Energieeinsparung	+
Fromm et al. (USA)	1981	Schwefelzusatz			0
Gragger (Frankreich)	1982			Herstellungsverfahren für Asphalt mit Ausbauasphalt im Labor	
				Vorgeschlagene Laboruntersuchungen: Gyrator, Marshall- u. Spurrinnenprüfung	
				Vergleich der Eigenschaften von im Labor und im Trommelmischer hergestelltem Mischgut	0
				Extrahiertes Bitumen aus Labormischung (getrennte Erwärmung) besser als Bitumen aus Mischanlagenmischung (Erwärmung durch die heißen Mineralstoffe)	
				Asphalt mit Fräsasphalt aus homogener Halde im Vergleich zu konventionellem Mischgut	
				- Homogenität	0
				- Verarbeitung u. Verdichtung	0
				- Druck- u. Spaltzugfestigkeit entspr. Penetration des Bindemittels im Fräsasphalt	
				- Spurbildungsversuche	-
				- Penetration	+
				- Annahme: Doppelumhüllung	-
				Regenerierungsmittel für Fräsasphalt-bitumen, Spurbildungsversuche	+
				Zugversuche, Annahme: Doppelumhüllung	-
Teststrecke nach einem Jahr: Spurrinnenbildung	0				

Abb. 4-1: Zusammenfassung von Untersuchungen zur Wiederverwendung von Asphalt und deren Ergebnisse, Teil 1

Quelle	Jahr	Alte Schicht (Recycling-material)	Neue Schicht (resultierender Asphalt)	Versuch, Untersuchung, Ergebnis, Vergleich	Veränderung
Gerardu, Vizi (Niederlande)	1982	25 %	Kies TS	Zusammensetzung	0
				Raumdichten, Ausfüllungsgrad, Verdichtungsgrad	0
				Verhärtung des Bindemittels durch die Wiederverwendung	-
				Spurtiefe mit Wheel-Tracking-Apparat	+
				Kriechversuche, Steifigkeit	+
Blumer (Schweiz)	1985	20 bis 40%	HMT	Streuung d. Korngrößenverteilung u. Bindemittelgehalt, kein Einfluss auf die Mischgutqualität	0
				Marshall-Prüfung	0
				Empfehlung: weiches Bitumen	
				Bohrkernuntersuchungen:	
				- Verdichtbarkeit	0
				- Kriechprüfungen	0
Erhardt et al.	1985			Ergebnisse aus Druckschwellversuchen und Marshall-Prüfungen zeigten Abhängigkeiten von der Viskosität des AG-Bindemittels	
Paulmann, Grätz	1987	50%	ATS	Biegeschwellversuche	+
Hadipour, Anderson (USA)	1988	bis 30%		Bleibende Verformungen	+
				Rissbildung bei Kälte	+
Leykauf	1988	50%	ATS	Steifigkeit und Zugfestigkeit	+
Hartmann	1989	75 %	AB	Geringe Verformungen nach viereinhalb Jahren Liegezeit	0
Huschek	1992			Mischprozess im Labor ERuK im neuen Mischgut hauptsächlich abhängig von der Temperatur der Mineralstoffe	
Freund, Charif	1992	20% 25%	AB 0/11 ABi 0/16	Untersuchungen von Bohrkernen u. Ausbaustücken (Kalt- u. Warmzugabe)	
				- Zug- und Abkühlversuche	0
				- Biege-Wechselversuche	0
				- Dynamische Druckschwellversuche	0
				- Homogenität (keine Doppelumhüllung)	0
Bellin, Tappert	1992	10% u. 20%	ADS, Liegezeit 5 Jahre	Visuelle Zustandsbeurteilung	0
				Bohrkernuntersuchungen	0
Kandhal et al. (USA)	1995	10 bis 40%		Visuelle Zustandserfassung	0
				Spurrinnenbildung	0
				Ermüdungsrisse	0
				Hohlraumgehalt	0
				Rheologische Kennwerte ($G^*/\sin \delta$ und $G^* \sin \delta$)	0
				Verdichtungsverhalten	+
				Spaltzugfestigkeiten	-

Abb. 4-1: Zusammenfassung von Untersuchungen zur Wiederverwendung von Asphalt und deren Ergebnisse, Teil 2

Quelle	Jahr	Alte Schicht (Recycling-material)	Neue Schicht (resultierender Asphalt)	Versuch, Untersuchung, Ergebnis, Vergleich	Veränderung	
Arand	1996			Kein Viskositätsausgleich nach Doppelumhüllung	0	
				Härte des Asphaltgranulat-Bitumens und Ruckerweichungsbitumen haben keinen Einfluss auf das Verdichtungsverhalten		
				Rückerweichung von künstlich gealtertem Bitumen		
				- Verformungswiderstände		0
				- Kälteverhalten		0
				- Ermüdungsverhalten		0
				- Haftverhalten		0
		Kein Zusammenhang zwischen max. Stückgröße des Asphaltgranulats und Gleichmäßigkeit des resultierenden Mischguts				
50%			Auswirkungen der Härtegrade des Asphaltgranulatbindemittels und des neuen Bitumens			
			- Verdichtbarkeit	0		
			- Einaxiale Zugversuche	-		
			- Abkühlversuche	-		
Kiuntke	1996	bis 63,3% bis 80%	ABi ATS	Zustandserfassung von Oberflächen	0	
				Bohrkerne		
Haak et al.	1997	66 % 30%, 50%	ABi 0/22, ATS 0/32 ATS 0/22	Standfestigkeit von Untersuchungsstrecken	0	
AIPCR/PIARC	1999	PmA, PmA mit Fasern, Asphalt mit Gummimehl		Emissionen in nicht umweltschädlichen Konzentrationen		
U.S. Department of Transportation	2000			Rissverhalten Verformungsverhalten	0	

Abb. 4-1: Zusammenfassung von Untersuchungen zur Wiederverwendung von Asphalt und deren Ergebnisse, Teil 3

Quelle	Jahr	Alte Schicht (Recycling-material)	Neue Schicht (resultierender Asphalt)	Versuch, Untersuchung, Ergebnis, Vergleich	Veränderung
Dröge	2001	bis 40% bis 30%	AB 0/11S SMA 0/11S	Haftverhalten durch Bestimmung des Spaltzugfestigkeitsabfalls	0
				Verformungsverhalten durch Bestimmung der Stempelleindringtiefe bei 50°C und Spurrinntiefe bei 50°C, Abhängigkeiten von Bindemittelhärte und Menge des Fräsasphaltanteils	0 bis -
				Rissverhalten bei Kälte durch Bestimmung der Zugfestigkeiten mittels einfacher Zugversuche bei +20 bis -25°C und Abkühlversuche	0 bis +
				Ermüdungsverhalten durch Bestimmung der Lastwechsel bis zum Bruch mittels Zugschwellversuchen bei 0°C	0
Lehné	2001	20% 30% 40%	ABi 0/22 B65 / PmB 45A	Spurrinntiefe, bei 50°C, Stahlrad, Wasserbad	0 bis -
				Verdichtung	0 bis -
				stetige/unstetige Sieblinie	0
Antoine, W., Alvarez, C. (Frankreich)	2001	45 bis 55% offenporiger Asphalt	Offenporiger Asphalt	Zusammensetzung, Mischen, Einbau	0

Abb. 4-1: Zusammenfassung von Untersuchungen zur Wiederverwendung von Asphalt und deren Ergebnisse, Teil 4

4.3 Erkenntnisse für die eigene Arbeit

Zusammenfassend zeigte die Auswertung der Literatur, dass kaum Einflüsse der Wiederverwendung von Asphaltgranulat auf die Asphalteeigenschaften behandelt worden sind.

In einigen Untersuchungen wurden aber die folgenden Materialeigenschaften von Asphaltmischungen mit Asphaltgranulat besser bzw. gleich bis besser als die von konventionellen Asphalten beurteilt:

- Verdichtungsverhalten (KANDHAL et al., 1995),
- Verformungsverhalten (GERARDU, VIZI, 1982), (HADIPOUR, ANDERSON, 1988), (LEYKAUF, 1988),
- Rissverhalten (HADIPOUR, ANDERSON, 1988), (LEYKAUF, 1988), (DRÖGE, 2001),
- Ermüdungsverhalten (PAULMANN, GRÄTZ, 1987).

Schlechter bzw. gleich bis schlechter wurden dagegen folgende Asphalteigenschaften von Asphaltmischungen mit Asphaltgranulat gegenüber denen von konventionellen Asphalten bewertet:

- Verdichtungsverhalten (LEHNÈ, 2001),
- Verformungsverhalten (GRAGGER, 1982), (LEHNÈ, 2001),
- Rissverhalten (GRAGGER, 1982), (KANDHAL et al., 1995), (ARAND, 1996b).

Es bestehen somit Einflüsse aus der Wiederverwendung auf die für die Qualität und damit für die Nutzungsdauer maßgebenden Asphalteigenschaften wie das Verdichtungs-, Riss- und Verformungsverhalten. Deshalb wurden die Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze und des PmB im Asphaltgranulat auf diese Asphalteigenschaften in der eigenen Arbeit untersucht. Die teilweise festgestellten gegensätzlichen Einflüsse und die größtenteils nicht vorhandenen oder aber nicht festgestellten Einflüsse auf die Asphalteigenschaften ließen den Schluss zu, dass es für die eigene Arbeit weiterführend ist, solche Prüfverfahren mit Praxisbezug zu wählen, die möglichst genaue Messwerte liefern und mit denen die o.g. Asphalteigenschaften differenzierter beurteilt werden können. Weiterhin war festzustellen, dass die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse nicht unbedingt auf andere Asphaltvarianten übertragen werden können. Zudem war für die eigene Arbeit zu berücksichtigen, dass, wie von GRAGGER (1982) beschrieben, offensichtlich Doppelumhüllungen die Asphalteigenschaften beeinflussten. Nach den Erkenntnissen von KANDHAL et al. (1995) erschien es zielführend, die Einflüsse auf das Verdichtungsverhalten mit dem Gyrator-Verdichter anhand „innerer“ Verdichtungsprozesse zu beurteilen.

Das Verformungsverhalten wurde in den bisherigen Untersuchungen im Labor mit Spurbildungs- oder Druckschwellversuchen bewertet. Einheitliche Auswirkungen der Wiederverwendung wurden aber nicht festgestellt. Die Druckschwellversuche bieten messtechnisch differenziertere Möglichkeiten, um ggf. vorhandene Einflüsse zu erfassen, deshalb wurden sie für die eigenen Untersuchungen verwendet.

Auch die Auswirkungen auf das Rissverhalten wurden in den bisherigen Untersuchungen unterschiedlich beurteilt. Für die eigenen Untersuchungen schien es somit erforderlich, die ggf. minimalen Einflüsse auf das Rissverhalten unter praxisrelevanten Belastungen messtechnisch zu erfassen, was mit dem Spaltzugschwellversuch möglich ist.

5. Methodik und Durchführung der Versuche

Übersicht

Das Versuchsprogramm wurde in den Jahren 1998 bis 2001 bearbeitet. Es umfasste drei Bereiche:

- Auswahl der Versuchsmaterialien und Durchführung von Eignungsprüfungen,
- Untersuchung der Auswirkungen auf das Verdichtungsverhalten,
- Untersuchung der Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten.

Im Rahmen einer „erweiterten Eignungsprüfung“ zur Auswahl des Erwärmungsverfahrens wurden Bindemittelkennwerte der resultierenden Bindemittelgemische von 12 Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat AG1 (vergl. Kap. 5.1.1.1) ermittelt (s. Abb. 5-1).

Es wurde jeweils eine Asphaltart der Schichten des Asphaltbaus ausgewählt. Bei den Zugabemengen der Asphaltgranulate wurde sich nach dem Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat MVAG, FGSV (2000) an für die Erwärmungsverfahren praktikablen Mengen orientiert.

Die Erwärmung des Asphaltgranulats AG1 wurde mit drei nach PÄTZOLD (1997) und dem Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat MVAG, FGSV (2000) an Mischanlagen praktizierten Verfahren im Labor simuliert (vergl. Kap. 5.4):

1. Erwärmung durch die heißen Mineralstoffe (Verfahren A),
2. Erwärmung gemeinsam mit den Mineralstoffen (Verfahren B),
3. separate Erwärmung von Mineralstoffen und Asphaltgranulat (Verfahren C).

Die Temperaturen der Mineralstoffe und der Asphaltgranulate wurden für die Simulationen der Erwärmungsverfahren so eingestellt, dass sie weitgehend denen in Mischanlagen entsprachen. Aus diesen Erwärmungsvarianten wurde für die weiteren Untersuchungen das Verfahren der Erwärmung ausgewählt, bei dem die geringsten relativen Veränderungen der Bindemittleigenschaften des resultierenden Bindemittels zu denen des neu zugegebenen Bindemittels bzw. des Asphaltgranulatbindemittels auftraten.

Die Eignungsprüfungen wurden nach dem Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt, FGSV (1998), an den Mischgutarten Asphaltbeton 0/11S, Asphaltbinder 0/16 und Asphalttragschicht 0/32C nach den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, ZTV Asphalt-StB 01, FGSV (2001), durchgeführt.

Die Mischgutvarianten mit Asphaltgranulat wurden bezüglich deren Korngrößenverteilungen und Bindemittelgehalten entsprechend den Eignungsprüfungen der Asphaltarten ohne Zugabe von Asphaltgranulat zusammengestellt.

Mischgutart und -sorte	Erwärmungsverfahren	Asphaltgranulat AG 1		Neue Mineralstoffe	
		Anteil Gew.-%	Temperatur °C	Anteil Gew.-%	Temperatur °C
Asphaltbeton AB 0/11S	A	20	20	80	250
	B	20	170	80	170
	C	20	130	80	150
Asphaltbinder Abi 0/16	A	20	20	80	250
	B	20	170	80	170
	C	20	130	80	150
Asphalttragschicht ATS 0/32C	A	25	20	75	250
	B	25	170	75	170
	C	25	130	75	150
	A	40	20	60	250
	B	40	170	60	170
	C	40	130	60	150

Abb. 5-1: Varianten der Erwärmung zur Auswahl des Erwärmungsverfahrens

Nach DIN 1996 Teil 6 (1988) wurden alle für die Untersuchungen des Verdichtungs- und Gebrauchsverhaltens hergestellten Asphaltmischungen kalt extrahiert und der Gehalt an löslichem Bindemittel nach der Extraktion mit dem Rückgewinnungsverfahren bestimmt. An den Bindemitteln wurden jeweils konventionelle Eigenschaften nach DIN 52000 ff. geprüft und rheologische Kennwerte aus Schubkriechversuchen und Schubwechselfersuchen mit einem dynamischen Scherrheometer ermittelt.

Das Verdichtungsverhalten (vergl. Kap. 5.5.1) der Asphalte mit Anteilen von Asphaltgranulat und der konventionellen Asphalte wurde ermittelt durch:

- Schlagverdichtung im Marshall-Gerät (vergl. Kap. 5.5.1.1),
- Druckschubverdichtung im Gyrator-Verdichter (vergl. Kap. 5.5.1.2).

Das Gebrauchsverhalten (vergl. Kap. 5.5.2) der Asphalte mit Anteilen von Asphaltgranulat und der konventionellen Referenzasphalte wurde ermittelt durch:

- Druckschwellversuche zur Ermittlung des Widerstandes gegen Spurrinnenbildung (vergl. Kap. 5.5.2.1),
- Spaltzugschwellversuche zur Ermittlung des Widerstandes gegen Rissbildung (vergl. Kap. 5.5.2.2).

Die Untersuchungsergebnisse der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulatanteilen wurden in Relation zu denen der Referenzasphalte und untereinander hinsichtlich der Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze und des PmB auf die Asphalteigenschaften analysiert.

5.1 Versuchsmaterialien

5.1.1 Fräsasphalte

Für die Untersuchungen wurden drei Fräsasphalte aus Deckschichten verwendet:

- Asphaltgranulat mit organischer Faser (Cellulosefaser): Asphaltgranulat 1 (AG1),
- Asphaltgranulat mit Kieselsäure: Asphaltgranulat 2 (AG2),
- Asphaltgranulat mit PmB der Tabelle A der Technischen Lieferbedingungen für polymermodifizierte Bitumen in Asphaltsschichten im Heißeinbau, Teil 1: Gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen (1991): Asphaltgranulat 3 (AG3).

Nahezu bundesweit wurden Straßenbauämter und Bauunternehmen um Informationen über Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen gebeten, bei denen die gesuchten Fräsasphalte anfallen würden. Die Beschaffung im Zuge von Baumaßnahmen gelang nur für zwei der gesuchten Asphaltgranulate, die mit organischen Fasern und mit Kieselsäure. Das Asphaltgranulat mit polymermodifiziertem Bitumen wurde extra für die Untersuchungen aus einer geeigneten Deckschicht gefräst.

Es wurden dazu Deckschichten ausgewählt, die, wie es normalerweise vor einem Ausbau der Fall ist, Beanspruchungen aus Verkehr und Witterung ausgesetzt waren. Liegezeiten von mindestens 5 Jahren wurden für den gewünschten Praxisbezug als ausreichend angesehen.

Es konnte anhand der eingestellten Frästiefe und der optischen Kontrolle vor Ort sichergestellt werden, dass die Fräsasphalte nur aus Deckschichten ausgewählter Straßenabschnitte stammten, die entsprechende Liegezeiten aufwiesen, frei von Flickstellen waren sowie die gesuchten Zusatzstoffe bzw. das PmB beinhalteten.

An den drei entnommenen Asphaltgranulaten wurden Eignungsprüfungen entsprechend dem Merkblatt für die Lieferung von Asphaltgranulat, FGSV (1990), durchgeführt. Zudem wurden an den rückgewonnenen Bindemitteln aus den Asphaltgranulaten einige Eigenschaften nach DIN 1995 ermittelt sowie Untersuchungen mit einem dynamischen Scherrheometer durchgeführt.

5.1.1.1 Asphaltgranulat mit Cellulosefasern (Asphaltgranulat AG1)

Auf der Bundesstraße B 469 (km 16+0 in Fahrtrichtung Süden) wurde die Deckschicht zur Herstellung eines Anschlusses gefräst. Das Fräsen der Deckschicht wurde Anfang Oktober 1999 im Auftrag des Straßenbauamtes Aschaffenburg vorgenommen. Die Deckschicht war im Frühjahr 1994 eingebaut worden, hatte also eine Liegezeit von rund fünfeinhalb Jahren.

Für das verwendete Mischgut liegt eine Eignungsprüfung vom 02.03.1994 vor. Danach handelt es sich um Splittmastixasphalt 0/11S mit einem Cellulosefaseranteil von 0,25 Gew.-% am Mischgut. Nach der Eignungsprüfung wurde das Mischgut aus Gabbro- und Basaltespalt,

Basaltdelbrechsand und Kalksteinmehl zusammengesetzt. Verwendet wurden 6,60 Gew.-% Bitumen B65.

5.1.1.2 Asphaltgranulat mit Kieselsäure (Asphaltgranulat AG2)

In Frankfurt am Main wurde auf der Mörfeldener Landstraße, westlich des Wendels-Platzes, ein Anschluss gefräst. Die Entnahme des Fräsguts wurde am 27.03.2000 vorgenommen. Der Einbau erfolgte nach Angaben des Straßenbauamtes der Stadt Frankfurt im Jahr 1983. Es ergibt sich eine Liegezeit von rund 17 Jahren. Eine Eignungsprüfung zum ausgebauten Asphalt liegt nicht mehr vor. Der Splitt und der Brechsand bestehen aus Gabbro. Nach der Korngrößenverteilung der Mineralstoffe des rückgewonnenen Asphaltgranulats handelt es sich um Fräsgut aus einer Asphaltbetondeckschicht 0/11 oder 0/11S. Eine chemische Analyse ergab einen Anteil von 0,38 Gew.-% Kieselsäure vom Mischgut. Eine Kontrolle der stofflichen Bestandteile des Asphaltgranulats nach der Extraktion ergab einen Faseranteil von ca. 0,06 Gew.-% vom Bindemittelgehalt. Aufgrund der geringen Menge an Fasern wurde nur noch der Kieselsäureanteil als wirksam erachtet.

5.1.1.3 Asphaltgranulat mit PmB A (Asphaltgranulat AG3)

Das Asphaltgranulat wurde aus der Deckschicht der Bundesstraße B27 am Ortseingang Randen (Baden-Württemberg) am 15.06.2000 für die Forschungsarbeit gefräst. Für das gefräste Deckschichtmaterial liegt eine Eignungsprüfung vor. Der Einbau der Deckschicht erfolgte Ende Oktober 1991. Damit ergibt sich eine Liegezeit von rund achteinhalb Jahren. Nach den Prüfunterlagen handelt es sich um einen Asphaltbeton 0/11S mit einem elastomermodifizierten Bindemittel der Sorte PmB 65A nach den Technischen Lieferbedingungen für polymermodifizierte Bitumen, Teil 1, Tabelle A (1991). Der Bindemittelgehalt wurde mit 6,1 Gew.-% angegeben. Nach der Eignungsprüfung wurde das Mischgut aus Kiesedelsplitt, Kiesedelbrechsand und Steinmehl zusammengesetzt.

5.1.1.4 Cellulosefasern, Kieselsäure und PmB

Cellulosefasern

Aus technischer Rohcellulose werden durch chemischen Aufschluss Lignin und der größte Teil der Hemi-Cellulosen entfernt. Die verbleibenden parallel zueinander angeordneten Makromoleküle bilden die grauen, fein fibrillierten und langfasrigen Cellulosefasern (vergl. Abb. 5-2). Die

durchschnittliche Faserlänge beträgt 1100 μm . Die durchschnittliche Faserdicke beträgt 45 μm . (RETTENMAIER 2001)

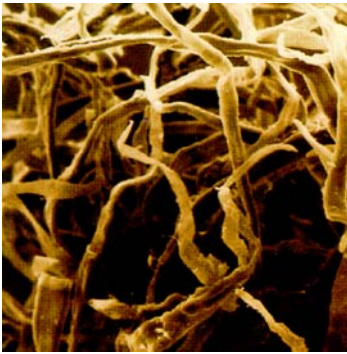


Abb. 5-2 Raster-Foto von Cellulosefasern, RETTENMAIER (2001)

Kieselsäure

Der Rohstoff für synthetische Kieselsäure ist Sand. Die Kieselsäure wird durch einen Fällprozess gewonnen. Alkalisilikatlösungen werden mit Säuren umgesetzt. Es entstehen Niederschläge von amorphen Kieselsäuren. Nach Filtern und Auswaschen werden die amorphen Kieselsäuren sprühgetrocknet, das heißt, die Trocknung erfolgt durch Einsprühen einer wässrigen Kieselsäuresuspension in einen Heißluftstrahl. Danach erfolgt gegebenenfalls noch ein Vermahlen. Es entstehen relativ locker zusammengeballte, kugelförmige Aggregate mit hohem Saugvermögen. Die Größe der Hauptanteile der Teilchen liegt im Bereich zwischen 50 und 200 μm (vergl. Abb. 5-3). (DEGUSSA 1985)

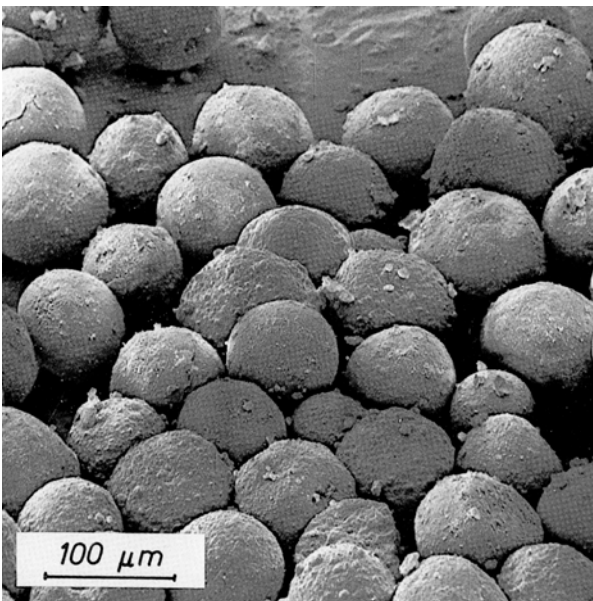


Abb. 5-3: REM-Aufnahme einer sprühgetrockneten Fällungskieselsäure, DEGUSSA (1985)

Polymermodifiziertes Bitumen (PmB)

Zur Herstellung von polymermodifiziertem Bitumen stehen eine Vielzahl von Kunststoffen zur Verfügung, die wichtigsten sind nach HARTNER (1993):

- Polyolefine: Polyethylen (PE), ataktisches Polypropylen (APP)
- Synthetikgummi: Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer (EPDM)
- Thermoelastischer Gummi: Styrol-Butadien-Styrol (SBS)

Für den verwendeten Fräsasphalt kam ein gebrauchsfertiges elastomermodifiziertes Bitumen zur Anwendung, welches den Anforderungen nach Tabelle A der TL-PmB Teil 1 (1991) entsprach. Elastomere bestehen aus langen Polymerketten, die weitmaschig vernetzt sind. Das Verhalten der Elastomere ist nach HARTNER in der Spanne von tiefen Temperaturen bis zur Zersetzungstemperatur gummielastisch, das bedeutet, dass der Schubmodul weitgehend temperaturunabhängig ist und sie über große reversible Deformierbarkeit verfügen.

5.1.1.5 Eignungsprüfungen der Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3

Die Eignung der drei Asphaltgranulate wurde in Anlehnung an das Merkblatt für die Lieferung von Asphaltgranulat, FGSV (1990), geprüft. Die Ausbauasphalte fallen aufgrund der Zusätze bzw. des PmB nach KRASS (2001) nicht in den Anwendungsbereich der Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen im Straßenbau, RuA-StB 01 (2001). Die Eignung der Mineralstoffe aus den Asphaltgranulaten AG1 und AG3 wurde durch die vorliegenden Eignungsprüfungen der ausgebauten Asphalte und der damit dokumentierten Güteüberwachung nach den Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau (1983), RG Min-StB 83, nachgewiesen. Für das AG2 lag ursprünglich eine Eignungsprüfung vor, die aber nicht mehr zu beschaffen war. Auch hier kann die Eignung der Mineralstoffe des AG2 als sicher vorausgesetzt werden.

Die Asphaltgranulate wurden jeweils auf die Stückgröße 0/11 mm abgeseibt. An diesen abgeseibten Asphaltgranulaten wurden ermittelt bzw. untersucht:

- Stückgrößenverteilung (vergl. Anlage 2.1 bis 2.3)
- Gleichmäßigkeit (nach Siebung auf 0/11 mm)
 - Korngrößenverteilung nach der Extraktion (vergl. Anlage 2.4 bis 2.6)
 - Bindemittelgehalt (vergl. Abb. 5-4)
 - Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52011 (vergl. Abb. 5-4)

Asphaltgranulat	Bindemittelgehalt Gew.-%	Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52011 °C
AG1	6,3	58,0
AG2	7,0	61,0
AG3	7,6	63,5

Abb. 5-4: Mittlere Bindemittelgehalte der Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3 nach der Siebung auf 0/11 mm und die Erweichungspunkte Ring und Kugel der rückgewonnenen Bindemittel

Zudem wurden die folgenden Eigenschaften der Asphaltgranulatbindemittel ermittelt:

- nach DIN 52000 ff (vergl. Abb. 5-5):
 - Nadelpenetration nach DIN 52010
 - Brechpunkt nach Fraaß nach DIN 52012
 - Duktilität nach DIN 52013
 - elastische Rückstellung nach DIN 52021 Teil 1 bei PmB-Anteil (AG3)
- rheologische Kennwerte aus Prüfungen mit dem dynamischen Scherrheometer (vergl. Anlagen 5):
 - Phasenverschiebungswinkel, komplexe Schubmodule mit Schubwechselversuchen bei Prüftemperaturen von +35 und +50°C
 - elastische und viskose Verformungsanteile mit Schubkriechversuchen bei Prüftemperaturen von +20, +35 und +50°C

Bitumeneigenschaften	AG1	AG2	AG3
Nadelpenetration (DIN 52010) [1/10 mm]	32	33	33
Erweichungspunkt Ring und Kugel (DIN 52011) [°C]	58,0	61,0	63,5
Duktilität (DIN 52012) [cm]	5,0	7,0	7,0
Brechpunkt nach Fraaß (DIN 52013) [°C]	-13,5	-15,0	-22,5
Elastische Rückstellung (DIN 52021 Teil 1) [%]	---	---	61,0

Abb. 5-5: Eigenschaften der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltgranulaten AG1, AG2 und AG3

5.1.2 Neue Mineralstoffe

Die Mineralstoffe der Mischgutvarianten setzten sich jeweils aus denen des Fräsasphalts und neuen Mineralstoffen zusammen. Für die Referenzmischungen wurden nur neue Mineralstoffe verwendet. Die neuen Mineralstoffe wurden direkt an den Steinbrüchen oder an den Lagerplätzen entnommen und jeweils im Labor nach Kornklassen abgeseibt. Bei den verwendeten Splitten der Kornklassen 5/8 mm, 8/11 mm, 11/16 mm, 16/22 mm, 22/32 mm handelte es sich um Diabas. Die Körnungen erfüllten die Anforderungen der TL Min-StB 2000. Der Natur- und der Granitbrechsand wurden einer Nasssiebung unterzogen. Überkorn- und Fülleranteil wurden ausgesondert. Die Sande wurden in die Kornklassen 0,09/0,25 mm, 0,25/0,7 mm, 0,7/0,2 mm fraktioniert. Der Natursand 0/2a wie auch der Granitbrechsand 0/2 wurde nach der TL Min-StB 2000 geprüft. Die Prüfungen ergaben, dass die zulässigen Anwendungsbereiche alle Bauweisen nach den ZTV Asphalt-StB 01 und den ZTVT-StB 95 umfassten. Als Fremdfüller wurde ein Kalksteinmehl verwendet, dass die Anforderungen der TL Min-StB 2000, der DIN 4226 und der RAL-RG 544/4 erfüllte.

5.1.3 Bitumen

Zur Herstellung der Referenzmischungen und als zusätzliches Bitumen für die Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat wurde in der ersten Serie ein B80 nach DIN 52000 und in den Serien 2 bis 5 entsprechendes B70/100 nach der neuen DIN EN 12591 jeweils aus einer Lieferung verwendet. Die folgenden Bitumeneigenschaften und Kennwerte wurden ermittelt:

- Eigenschaften nach DIN 52 000 (vergl. Abb. 5-6)
 - Nadelpenetration nach DIN 52010
 - Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52011
 - Brechpunkt nach Fraaß nach DIN 52012
 - Duktilität nach DIN 52013

- Rheologische Kennwerte für das B80 mit dem dynamischen Scherrheometer aus (vergl. Anlagen 5):
 - Schubwechselfersuchen bei den Prüftemperaturen +35 und +50°C (Phasenverschiebungswinkel, komplexer Schubmodul)
 - Schubkriechversuchen bei den Prüftemperaturen +20, +35° und 50°C (elastischer und viskoser Verformungsanteil)

Bitumeneigenschaften	B 80	70/100
Nadelpenetration nach DIN 52010 [1/10 mm]	80	83
Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52011 [°C]	46,0	49,5
Brechpunkt nach Fraaß, DIN 52012 [°C]	-12	-14
Duktilität nach DIN 52013 [cm]	5,0	6,0

Abb. 5-6: Eigenschaften der neuen Bitumen der Sorten B80 und 70/100

5.2 Rezepturen und Eignungsprüfungen der Referenzasphalte

Um mögliche Auswirkungen von stabilisierenden Zusätzen und PmB im Ausbauasphalt auf die Eigenschaften des resultierenden Bindemittels bzw. des Mörtels und damit auf die Asphalteeigenschaften feststellen und quantifizieren zu können, wurden in den Versuchsreihen möglichst andere Einflussfaktoren, so z.B. die von ARAND und RENKEN (1992) nachgewiesenen Einflussfaktoren auf die Asphalteeigenschaften, konstant gehalten. Dazu wurden die Rezepturen bezüglich der Korngrößenverteilungen der Asphaltvarianten mit und ohne Anteile von Fräsasphalt einschließlich der Brechsand-Natursand-Verhältnisse sowie der Bindemittelgehalte identisch zusammengestellt. Zudem wurde jeweils das gleiche Erwärmungsverfahren angewandt, um die Temperaturbelastung auf die Bindemittel und die stabilisierenden Zusätze weitestgehend konstant zu halten (vergl. Kap. 5.4).

Die Referenzasphalte Asphaltbeton 0/11S, Asphaltbinder 0/16 und Asphalttragschicht 0/32C wurden mit neuen Materialien, Bitumen B80 und Mineralstoffen (vergl. Kap. 5.1) nach den ZTV Asphalt-StB 01 bzw. ZTVT-StB 95 hergestellt. Die Sieblinien der Asphalte wurden so zusammengestellt, dass sie in den geforderten Sieblinienbändern lagen (vergl. Anlagen 1). Dazu wurden die Mineralstoffe zuvor nach Kornklassen abgesiebt. Die Eignungsprüfungen der Referenzasphalte wurden nach dem Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt, FGSV (1998), durchgeführt.

Mischgutart und -sorte	B	H_{bit}	ρ_A	$\rho_{R,bit}$	$S_{Marshall}$	$f_{Marshall}$
	Gew.-%	Vol.-%	g/cm ³	g/cm ³	kN	mm
AB 0/11S	6,2	3,0	2,468	2,545	9,4	4,8
ABi 0/16	4,6	5,4	2,476	2,617	10,5	4,4
ATS 0/32C	3,8	4,1	2,473	2,580	11,5	5,1

Abb. 5-7: Gewählte Bindemittelgehalte B und ermittelte Hohlraumgehalte H_{bit} , Raumdichten ρ_A , Rohdichten $\rho_{R,bit}$, Marshall-Stabilitäten $S_{Marshall}$ und Marshall-Fließwerte $f_{Marshall}$ der Vergleichsmischungen bzw. Referenzasphalte

Die gewählten Bindemittelgehalte und die ermittelten Hohlraumgehalte der Asphalte entsprachen den Anforderungen nach den ZTV Asphalt-StB 01 bzw. den ZTVT-StB 95 (vergl. Abb. 5-7).

5.3 Rezepturen der Asphalte mit Asphaltgranulat

Die Anteile des Asphaltgranulats einschließlich des Asphaltgranulatbindemittels wurden jeweils auf den Anteil der neuen Mineralstoffe bezogen. Die gewählten Varianten sind in Abb. 5-8 und Abb. 5-9 aufgeführt.

Mischgutart und -sorte	Asphaltgranulat Anteil in Gew.-%	Neue Mineralstoffe Anteil in Gew.-%
Asphaltbeton 0/11S	20	80
Asphaltbinder 0/16	20	80
Asphalttragschicht 0/32C	25	75
	40	60

Abb. 5-8: Anteile der Asphaltgranulate und der neuen Mineralstoffe am Mischgut der Asphaltvarianten

Die Rezepturen der Asphalte mit Asphaltgranulat wurden so zusammengestellt, dass die resultierende Korngrößenverteilung und der resultierende Bindemittelgehalt jeweils dem zugehörigen Referenzasphalt entsprachen (vergl. Anlagen 3).

Asphaltart und -sorte	Asphalt- granulat *		Füller- gehalt	Brechsand - Natursand - Verhältnis	Sand- gehalt	Splitt- gehalt	Gröbst- kornanteil	Cellulose Fasern/ Kiesel- säure/ PmB	Binde- mittel- gehalt
	Nr.	Gew.-%							
AB 0/11S	---**		9	2:1	36	55	21	---	6,2
	1	20	9	2:1	36	55	21	0,05/ ---/ ---	6,2
	2	20	9	2:1	36	55	21	0,01/ 0,08/ ---	6,2
	3	20	9	2:1	36	55	21	---/ ---/ 1,45	6,2
ABi 0/16	---**		6	2:1	24	70	28	---	4,6
	1	20	6	2:1	24	70	28	0,05/ ---/ ---	4,6
	2	20	6	2:1	24	70	28	0,01/ 0,08/ ---	4,6
	3	20	6	2:1	24	70	28	---/ ---/ 1,47	4,6
ATS 0/32C	---**		8	7:1	23	69	14	---	3,8
	1	25	8	7:1	23	69	14	0,06/ ---/ ---	3,8
	2	25	8	7:1	23	69	14	0,02/ 0,10/ ---	3,8
	3	25	8	7:1	23	69	14	---/ ---/ 1,86	3,8
	1	40	8	7:1	23	69	14	0,10/ ---/ ---	3,8
	2	40	8	7:1	23	69	14	0,02/ 0,15/ ---	3,8
	3	40	8	7:1	23	69	14	---/ ---/ 3,02	3,8

* bezogen auf die neuen Mineralstoffe

** Vergleichsmischung ohne Asphaltgranulat

Abb. 5-9: Zusammensetzung der Varianten des Asphaltbetons 0/11S, des Asphaltbinders 0/16 und der Asphalttragschicht 0/32C

5.4 Erwärmungsverfahren

Für die Produktion von Asphalt mit Anteilen von Fräsasphalt werden an Mischanlagen verschiedene Erwärmungsverfahren für die Asphaltgranulate angewandt. Zur Auswahl eines Erwärmungsverfahrens für die Untersuchungen wurden drei Verfahren im Labor simuliert und anhand der Kennwerte der Bindemittel aus den produzierten Asphalten beurteilt.

5.4.1 Varianten

In die Wahl wurden drei Erwärmungsverfahren für Asphaltgranulate einbezogen, die nach PÄTZOLD (1997) an Chargenmischanlagen praktiziert werden:

- Erwärmung der Asphaltgranulate durch die heißen Mineralstoffe (Verfahren A)
Das Asphaltgranulat wird hierbei kalt dem Mischer entweder über die Mineralstoffwaage oder über eine separate Waage chargenweise zugeführt.
Bei einer kontinuierlichen Zugabe wird das Asphaltgranulat am Trommelauslauf, über den Heißelevator oder eine Siebumgehungstasche zugeführt.
- Gemeinsame Erwärmung mit den Mineralstoffen (Verfahren B)
Die Zugabe des Asphaltgranulats erfolgt in die Trockentrommel, die nach dem Gegenstromprinzip arbeitet, kontinuierlich über eine Mittenzugabe oder durch eine Zugabevorrichtung am Trommelauslauf.
- Erwärmung in gesonderten Vorrichtungen, separat (Verfahren C)
Für die Erwärmung des Asphaltgranulats haben sich Paralleltrommeln mit Gleichstromprinzip bewährt. Die Zugabe der erwärmten Asphaltgranulate erfolgt in die Mineralstoffwaage oder direkt in den Mischer.

Diese drei Erwärmungsverfahren wurden mit Laborgeräten simuliert. Die gewählten Temperaturen für die neuen Mineralstoffe, das Asphaltgranulat und das zusätzliche Bindemittel orientierten sich an praxisrelevanten Vorgaben aus dem Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat, FGSV (2000), und an der DIN 1996, Teil 20: Herstellung von Asphaltmischgut im Laboratorium (1992).

5.4.2 Beanspruchung von Bitumen und Zusätzen

Die stabilisierenden Zusätze und PmB im Fräsasphalt sind während der Asphaltproduktion durch das Erwärmen des Asphaltgranulats und durch den Mischprozess mit den neuen Mineralstoffen und dem neuen Bitumen sowohl Wärme- als auch Bewegungsenergie ausgesetzt. Besonders das Bindemittel des Asphaltgranulats und die stabilisierenden Zusätze im Bindemittel und auch die Polymere im PmB unterliegen thermischen Beanspruchungen.

Die Konsistenzkennwerte der Bindemittel, wie die Nadelpenetration und der Erweichungspunkt Ring und Kugel, wurden vor der Wiederverwendung an dem neuen Bitumen und nach einer Kaltextraktion nach DIN 1996 Teil 6 (1988) am rückgewonnenen Bindemittel des Asphaltgranulats gemessen. Nach der Wiederverwendung können die Kennwerte des resultierenden Bindemittels ebenfalls nur nach Extraktion ermittelt werden. Die stabilisierenden Zusätze wie Cellulosefasern und Kieselsäure sind in den rückgewonnenen Bindemitteln nicht mehr feststellbar, sie befinden sich zwischen den rückgewonnenen Mineralstoffen. Die Auswirkungen dieser stabilisierenden Zusätze auf die Bindemittleigenschaften sind durch Untersuchungen an rückgewonnenen Bindemitteln daher nicht möglich. Mögliche Auswirkungen der Erwärmungs- und Mischverfahren auf die stabilisierenden Zusätze können deshalb nur über die Asphalteeigenschaften angesprochen werden.

Eine mögliche Ursache für Veränderungen der Bitumen- bzw. Asphalteeigenschaften könnte die teilweise Verbrennung der Cellulosefasern durch Kontakt mit der Brennerflamme darstellen, wobei für vorhandene Cellulosefasern in dem Asphaltgranulat vom Hersteller eine Verarbeitungstemperatur von kurzzeitig maximal 250°C angegeben wird. Mehrere Tage sind Cellulosefasern gegenüber Temperaturen von bis 140°C widerstandsfähig, World Road Association AIPCR/PIARC (1999).

Die Auswirkungen des Erwärmungsverfahrens werden anhand der Veränderung der Konsistenzdaten der Bindemittel erfasst. Im Asphaltmischprozess unterliegt das Bitumen einer so genannten „heißen Alterung“. Die Expositionsdauer des Asphaltgranulatbindemittels zur Herstellung einer Charge beträgt in der Praxis nur rund eine Minute, im Labor dagegen bis zu vier Stunden.

Den alterungsbedingten Veränderungen der Bitumeneigenschaften liegen nach ZENKE (1985) ein physikalischer und ein chemischer Effekt zugrunde. Der physikalische ist ein thermischdestillativer Effekt durch Verdampfung leichter Bitumenanteile, überwiegend der Öle, durch hohe Temperatur und/oder Abführung der Dämpfe. Es kommt zu einer physikalischen Aufkonzentration schwerer Bitumenanteile und damit zu einer Verhärtung des Bindemittels. Der chemische Effekt entsteht durch verschiedene Reaktionen von Bitumenkomponenten mit dem Sauerstoff der Luft. Die Oxidation durch Sauerstoffeintritt und Wasserstoffabspaltung führt zu einer Verhärtung des Bindemittels, weil durch Dehydrierung von Erdölharzen neue Asphaltene entstehen

und schon vorhandene Asphaltene zu höhermolekularen, schwerlöslichen Asphaltanteilen verändert werden.

Nach ZENKE (1985) entsteht bei kurzzeitiger und heißer Beanspruchung, wie beim Mischen und Silieren von Asphalt, überwiegend der thermisch-destillative Effekt, der nur zu geringen Veränderungen des Stoffbestandes führt.

Die Polymermoleküle können nach ZENKE durch thermische Beanspruchung in kleinere Fragmente aufbrechen. Brüche der Molekülketten und Bruchstücke mit kleineren Molmassen würden zu Erweichungen führen, falls nicht Folgereaktionen der Bruchstücke, wie Polykondensation und Vernetzung, zu Erhöhungen der Molmassen führen. HERR (1999) untersuchte die Einflüsse von Lösungsmitteln auf die PmB-Eigenschaften. Es ist denkbar, dass die Forschungsergebnisse es ermöglichen, die Eigenschaften des resultierenden Bindemittels aufzuteilen in mögliche Veränderungen der PmB-Eigenschaften durch das Extraktions- oder durch das Erwärmungsverfahren.

5.4.3 Auswahlkriterien

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden die Erwärmungsverfahren anhand der Ergebnisse aus den Bindemitteluntersuchungen beurteilt.

Um das Erwärmungsverfahren auswählen zu können, welches die geringsten relativen Veränderungen der Bindemittelkennwerte des resultierenden Bindemittels zu denen des neu zugegebenen Bindemittels bzw. des Asphaltgranulatbindemittels bewirkte, wurden jeweils die Veränderungen der Bindemittelkennwerte (vergl. Kap. 5.1.3) durch die Erwärmungsverfahren betrachtet.

Durch die Untersuchungen mit dem dynamischen Scherrheometer wurden die viskoelastischen Eigenschaften der Bitumen detailliert bestimmt. Mit den Schubwechselfersuchen wurde jeweils der komplexe Schubmodul IG^* und der Phasenverschiebungswinkel δ in Abhängigkeit der Frequenz f bei Temperaturen von 35 und 50°C ermittelt. Der elastische und der viskose Verformungsanteil wurden mit dem Schubkriechversuch unter einer Schubspannung τ von 8.000 [Pa] in Abhängigkeit von der Zeit t bei Temperaturen von 20 bis 50°C ermittelt (vergl. Anlagen 5).

Somit wurden die Veränderungen der viskoelastischen Eigenschaften durch die Art der Zufuhr und durch die Temperaturen der neuen Mineralstoffe bei den drei Erwärmungsverfahren ermittelt. Denn geringe Änderungen der Eigenschaften, die sich mit konventionellen Bindemitteluntersuchungen aufgrund der Prüffehler nicht feststellen lassen, können mit der Messtechnik des dynamischen Scherrheometers anhand der rheologischen Kennwerte erfasst werden.

Das Mengenverhältnis zwischen Asphaltgranulatbitumen und neuem Bitumen in den aus den Mischgutvarianten rückgewonnenen Bindemittelmischungen entsprach dabei nicht dem Asphaltgranulatanteil am Mischgut (vergl. Abb. 7-3).

In den untersuchten Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten betrug der Anteil des Asphaltgranulats jeweils 20% bezogen auf die neuen Mineralstoffe. Der größte Mengenanteil im resultierenden Bindemittelgemisch fiel auf das neue Bitumen. Es war daher zu erwarten, dass für die resultierenden Bindemittelleigenschaften des Gemisches die Eigenschaften des neuen Bitumens ausschlaggebend sein würden. Je mehr die Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittelgemisches von dem des neuen Bitumens vor der Wiederverwendung abwichen, desto größer war demnach der Einfluss des Erwärmungsverfahrens.

Die Mengenverhältnisse in den resultierenden Bindemittelgemischen der Asphalttragschichten mit jeweils 25% Asphaltgranulat waren etwa ausgeglichen, denn die Fräsasphalte stammten aus Deckschichten, die allgemein höhere Bindemittelgehalte als Asphalttragschichten aufwiesen. Deshalb wurden zur Beurteilung der Erwärmungsverfahren die Abweichungen der Kennwerte des resultierenden Bindemittelgemisches von denen des neuen und denen des Asphaltgranulatbindemittels vor der Wiederverwendung herangezogen.

In den Tragschichten mit 40% Asphaltgranulat überwogen die Bitumenanteile aus dem Asphaltgranulat. Analog war zu erwarten: Je größer die Abweichungen der Eigenschaften des rückgewonnenen Gemisches zu denen des Asphaltgranulatbitumens vor der Wiederverwendung waren, desto größer war der Einfluss des Erwärmungsverfahrens.

5.4.4 Simulation der Erwärmungs- und Mischverfahren im Labor

Die drei im Kapitel 5.4.1 beschriebenen Erwärmungsverfahren A, B und C für die Asphaltgranulate zur Herstellung von Asphalt in Mischanlagen wurden im Labor simuliert:

- Verfahren A (Erwärmung durch die heißen Mineralstoffe)
Es wurde eine an der Praxis orientierte Mischguttemperatur von ca. 170°C angestrebt. Die Temperatur der Asphaltgranulate betrug jeweils ca. 20°C (Raumtemperatur). Unter Berücksichtigung eines Wassergehaltes der Asphaltgranulate von bis zu 3 Gew.-% wurden die Mineralstoffe auf die im verwendeten Wärmeschrank maximal erreichbare Temperatur von 250°C erhitzt.

- Verfahren B (Gemeinsame Erwärmung mit den Mineralstoffen)
Die angestrebte Mischguttemperatur betrug ebenfalls ca. 170°C. Die Mineralstoffe und das Asphaltgranulat wurden, homogen vermischt, gemeinsam in einem Wärmeschrank auf 170°C erhitzt.
- Verfahren C (Erwärmung in gesonderten Vorrichtungen)
Bei diesem Verfahren wurden die Asphaltgranulate im Wärmeschrank nach dem Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat, FGSV (2000), auf 130°C und die Mineralstoffe auf 150°C erhitzt.

Dabei wurden die Erwärmungstemperaturen der Asphaltgranulate und der Mineralstoffe (vergl. Abb. 5-20) in Anlehnung an das Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat, MVAG, FGSV (2000), und die Bindemitteltemperatur nach DIN 1996, Teil 20: Prüfung von Asphalt, Herstellung von Asphaltmischgut im Laboratorium, gewählt.

In der Versuchsserie 1 bzw. bei Mineralstofftemperaturen von 150°C wurde ein Labormischer mit Kessel auf Gasflamme verwendet. Das zusätzliche Bitumen wurde auf 150°C erhitzt. Die Erwärmungszeiten der Mineralstoffe und der Asphaltgranulate betragen vier Stunden, die Mischzeit drei Minuten.

5.4.5 Ergebnisse der konventionellen und rheologischen Bindemittelprüfungen

Die Bindemittleigenschaften der aus den Asphaltgranulaten AG1, 2 und 3 rückgewonnenen Bindemittel sowie des neuen Bitumens B80 wurden ermittelt (vergl. Abb. 5-12, Abb. 5-13). Zudem wurden die Eigenschaften der aus den Asphaltvarianten nach Verfahren A, B und C mit AG1 rückgewonnenen Bindemittel untersucht. Es wurden konventionelle Bindemittleigenschaften nach DIN 52000 (vergl. Anlagen 4) und Kennwerte mit dem dynamischen Scherrheometer (Rheo Stress RS50) in Schubkriechversuchen und Schubwechselfersuchen (vergl. Anlagen 5) ermittelt (vergl. Kap. 5.1.3).

5.4.6 Wahl des Erwärmungsverfahrens

Die Ergebnisse der konventionellen und der rheologischen Untersuchungen ließen die Auswahl eines der drei Erwärmungsverfahren hinsichtlich der geringsten Schädigung der Bindemittel nicht eindeutig zu.

Die Nadelpenetrationen, die Duktilitäten, die Erweichungs- und Brechpunkte wiesen nach den Erwärmungsverfahren A und C überwiegend nur geringe bis keine Unterschiede auf (vergl. Abb. 5-10).

	Bindemittel													
	B80	aus AG1	aus Asphaltbeton 0/11S			aus Asphaltbinder 0/16			aus Asphalttragschicht 0/32C					
			Asphaltgranulat AG1 in % (bezogen auf die neuen Mineralstoffe)											
			20			20			25			40		
			Mischverfahren											
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C			
Duktilität nach DIN 52013 [cm]	11	5	6	6	6	6	6	6	5	4	5	5	1	4
Brechpunkt nach Fraaß, DIN 52012 [°C]	-12	-14	-14	-9	-14	-12	-9	-12	-11	-9	-9	-11	+2	-8
Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52011 [°C]	46,0	58,0	51,5	53,5	50,0	50,5	57,0	50,5	54,0	61,5	55,0	56,5	80,0	61,0
Nadelpenetration nach DIN 52010 [1/10 mm]	80	32	53	56	57	53	40	53	43	28	38	38	16	29

Abb. 5-10: Eigenschaften des neuen Bitumens der Sorte B80 und der rückgewonnenen Bindemittel aus AG1 und aus den Asphaltbetonvarianten mit AG1 nach den Erwärmungsverfahren A, B und C

Das Erwärmungsverfahren B bewirkte nach den Erweichungspunkten Ring und Kugel und den Nadelpenetrationen die relativ größte der erwarteten Konsistenz erhöhungen der rückgewonnenen Bindemittelgemische.

Da der Anteil des neuen Bitumens in den Mischungen überwog (vergl. Abb. 5-11), konnte die Größe der Abweichungen der rheologischen Kennwerte der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten mit AG1 nach den Erwärmungsverfahren A, B und C von den Kennwerten des neuen Bitumens B80 als Maß zur Quantifizierung der Einflüsse der Erwärmungsverfahren auf die Bindemittleigenschaften angesetzt werden.

Asphaltart und -sorte	Asphalt- granulat- gehalt Gew.-%*	Bindemittelanteil (ca.)	
		Neues Bitumen %	aus AG1 %
AB 0/11S	20	80,7	19,3

Abb. 5-11: Bindemittelanteile des neuen Bitumens und des rückgewonnenen Bindemittels aus dem Asphaltgranulat AG1 im Asphaltbeton 0/11S infolge der Asphaltgranulatzugabe zum Mischgut (* bezogen auf die neuen Mineralstoffe)

Die im Schubwechselfersuch (vergl. Kap. 5.5.3) ermittelten rheologischen Kennwerte komplexer Schubmodul IG^* und Phasenverschiebungswinkel δ ließen bei einer Frequenz von 1 bis 10 Hz erkennen, dass die Bindemittel der Asphaltbetone mit AG1 durch das Erwärmungsverfahren C gegenüber A und B geringere Unterschiede zu den Kennwerten des Bitumens B80 aufwiesen (vergl. Abb. 5-12).

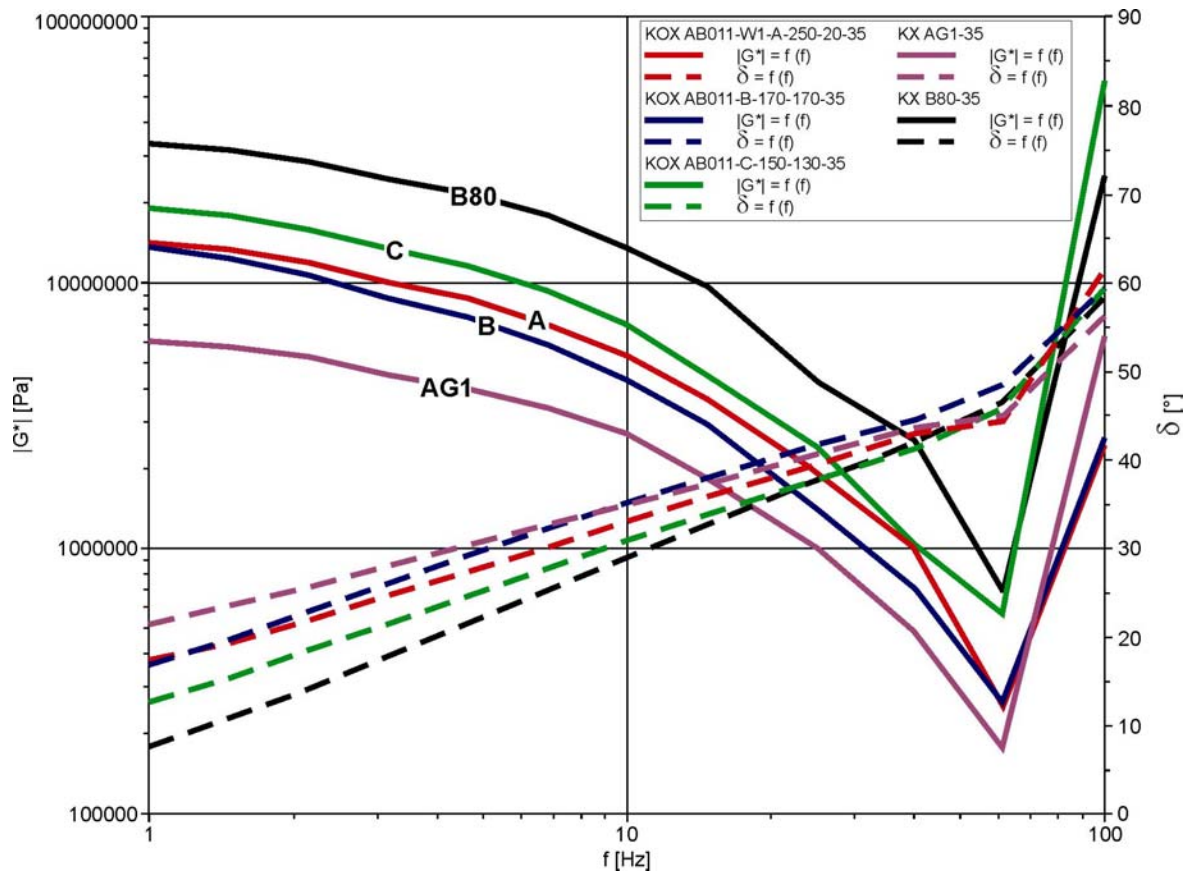


Abb. 5-12: Komplexer Schubmodul $|G^*|$ und Phasenverschiebungswinkel δ in Abhängigkeit von der Frequenz f im Schubwechselfersuch bei 35°C des neuen Bitumens der Sorte B80 und der rückgewonnenen Bindemittel aus AG1 und aus den Asphaltbetonvarianten mit AG1 nach den Verfahren A, B und C

Das Erwärmungsverfahren C, die getrennte parallele Erwärmung von neuen Mineralstoffen und Asphaltgranulat, wurde deshalb für die weitere Produktion von Asphalt zur Untersuchung der Einflüsse von Fräsasphalten mit stabilisierenden Zusätzen bzw. PmB auf die Asphalteeigenschaften ausgewählt. Das Erwärmungsverfahren C war zudem für die vorgesehenen Zugabemengen an Asphaltgranulat bis zu 40% gut geeignet, denn nach dem Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat, FGSV (2000), kann dieses Verfahren für die Produktion von Asphalt mit Asphaltgranulatanteilen von bis etwa 80% (z.B. Asphalttragschicht) angewendet werden.

5.4.7 Mischgutherstellung in gesonderten Behältnissen

Die Asphaltgranulate wurden nach dem Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat, FGSV (2000), jeweils auf 130°C erwärmt (vergl. Abb. 5-13). Diese Temperatur ist die praxisgerechte

obere Temperaturgrenze, denn bei höheren Temperaturen verkleben die Trocken- bzw. Paralleltrommeln der Mischanlagen.

Mischgutart und -sorte	Asphaltgranulat AG 1, 2 und 3		Neue Mineralstoffe		Neues Bitumen	Serie
	Anteil in Gew.-%	Temperatur in ° C	Anteil in Gew.-%	Temperatur in ° C	Temperatur in ° C	
Asphaltbeton AB 0/11S	20	130	80	150	150	1
				165	170	2
				180	170	3
Asphaltbinder ABi 0/16	20	130	80	150	150	1
				165	170	2
				180	170	3
Asphalttragschicht ATS 0/32C	25	130	75	150	150	1
				165	170	2
				180	170	3
				200	170	4
	40	130	60	150	150	1
				165	170	2
				180	170	3
				230	170	5

Abb. 5-13: Temperaturen der neuen Mineralstoffe, des neuen Bitumens und der Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3 bei der Herstellung der Asphaltvarianten mit dem Erwärungsverfahren C

Bei der Herstellung des Asphaltbetons 0/11S und des Asphaltbinders 0/16 mit jeweils 20 Gew.-% Asphaltgranulat wurden die Temperaturen der Mineralstoffe ab 150°C um jeweils 15°C auf 165 und 180°C erhöht (vergl. Abb. 5-13). Die Spanne der Mineralstofftemperaturen von 150 bis 180°C markiert die für eine Zugabe von 20% sinnvoll gesetzten Grenzen der Untersuchung. Die Mineralstofftemperatur von 150°C liegt am unteren Rand sinnvoller Mineralstofftemperaturen, weil die Mischguttemperatur wie angestrebt niedrig ausfällt. Bei 130°C heißem Asphaltgranulat und einer Zugabe von 20 Gew.-% Asphaltgranulat liegt die Mineralstofftemperatur von 180°C im oberen Bereich der für dieses Verfahren sinnvollen Mineralstofftemperatur. Denn allein die Erwärmung einer Menge von 20% nicht vorerwärmten Asphaltgranulats durch 180°C heiße Mineralstoffe führt nach BLUMER (1985) schon zu Mischguttemperaturen von über 140°C

(vergl. Abb. 5-14). Zudem soll die Mineralstofftemperatur nach DIN 1996 Teil 20 bei der Herstellung von konventionellem Mischgut maximal 170°C betragen.

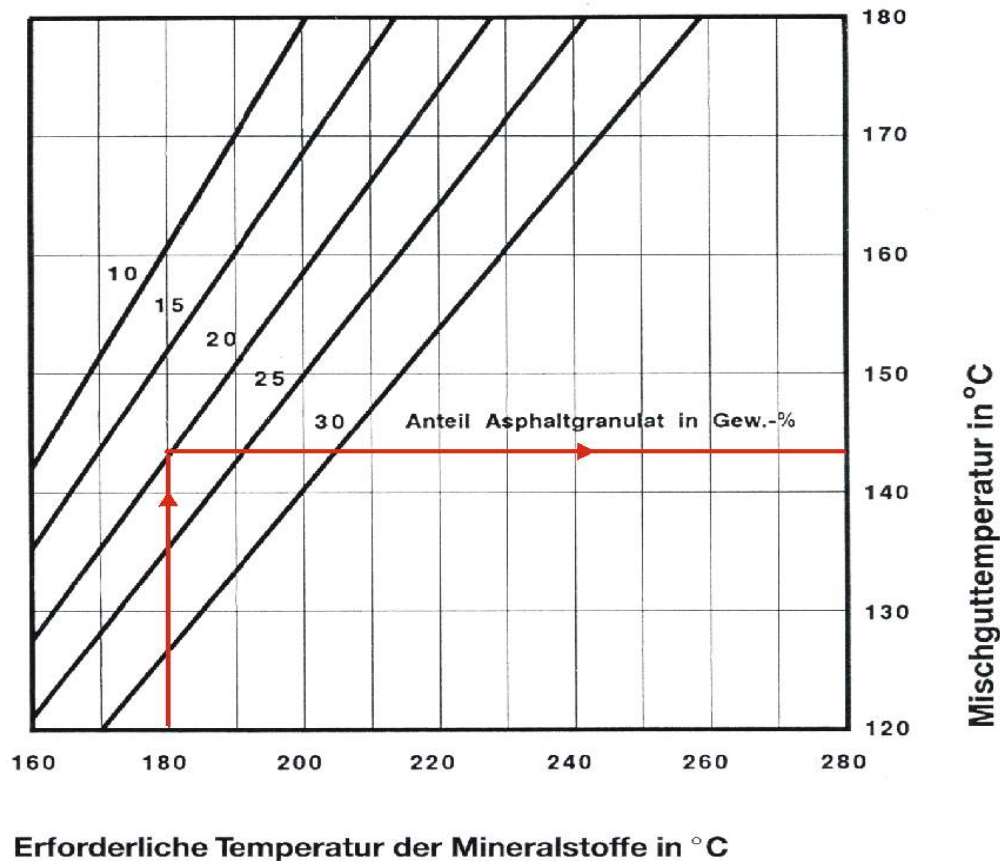


Abb. 5-14: Erreichbare Mischguttemperatur bei der Erwärmung von 20 Gew.-% Asphaltgranulat mit 180°C heißen Mineralstoffen nach BLUMER (1985)

Die Tragschicht 0/32C wurde zudem mit Mineralstofftemperaturen von 200°C bei 25 Gew.-% Asphaltgranulatanteil und 230°C bei 40 Gew.-% Asphaltgranulatanteil hergestellt.

Das Asphaltmischgut wurde bei Mineralstofftemperaturen von 150°C in einem Labormischer mit einem Kessel auf Gasflamme gemischt. Ab Mineralstofftemperaturen von 165 bis 230°C wurde ein Laborzwangsmischer verwendet. Die Drehzahl des Mischwerkzeuges betrug 30 U/min. Dieser Mischer wurde auf 100°C vorgeheizt, um die Auskühlung des Materials während der Mischdauer von drei Minuten zu vermindern.

Die Temperatur des neuen Bitumens betrug in der ersten Versuchsserie 150°C gemäß der DIN 1996 Teil 20. In der zweiten bis fünften Versuchsserie wurde das Bitumen jeweils auf eine Temperatur von 170°C erhitzt, die als unbedenkliche obere Grenze anzunehmen ist.

Bei der Herstellung mit Mineralstofftemperaturen von 150 bis 200°C wurde das zusätzliche Bitumen, ohne die Mineralstoffe und das Asphaltgranulat vorzumischen, in den Mischer ge-

ben. Bei der Mineralstofftemperatur von 230°C zur Herstellung der Asphalttragschicht 0/32 C mit 40 Gew.-% Asphaltgranulat wurden die Mineralstoffe und das Asphaltgranulat eineinhalb Minuten vorgemischt und mit dem zusätzlichen Bitumen nochmals eineinhalb Minuten nachgemischt.

Der Füller wurde, außer bei den Mischungen mit Mineralstofftemperaturen von 150°C, nicht mit den Mineralstoffen erwärmt, sondern wie in der Praxis an Asphaltmischanlagen kalt in den Mischer gegeben.

Augenscheinlich wurden erst nach Mischdauern von drei Minuten homogene Mischungen festgestellt. Am Ende des Mischvorgangs lagen die Mischguttemperaturen zwischen 122 und 142°C (vergl. Abb. 5-15). Die Mischgüter wurden im Anschluss an das Mischen in abgeschlossenen Behältern, portioniert nach den benötigten Mengen herzustellender Probekörper für die vorgesehenen Versuchsreihen, eingelagert, um jeweils die Wiedererwärmung zur Probekörperherstellung nur einmalig vornehmen zu müssen.

Mischgutart und -sorte	AG-Anteil %	Asphaltgranulat- / Mineralstoff-Temperatur in °C			
		130/165	130/180	130/200	130/230
AB 0/11	20	123	124	---	---
ABi 0/16	20	126	125	---	---
ATS 0/32C	25	123	124	141	---
ATS 0/32C	40	122	123	---	142

Abb. 5-15: Mittlere Mischguttemperaturen in °C nach einer Mischdauer von drei Minuten

5.5 Prüfverfahren

5.5.1 Verdichtung

Das Verdichtungsverhalten wurde mit zwei unterschiedlichen Verfahren im Labor untersucht. Zum einen wurde das in Deutschland gängigste Verfahren, die Verdichtung im Marshall-Gerät, angewendet, welches im Merkblatt für die Verdichtung von Asphalt, Teil 2: Theorie der Verdichtung, FGSV (1993), beschrieben ist. Da aber im Marshall-Gerät eine Schlagverdichtung vorgenommen wird, die nicht ganz der Walzverdichtung in der Praxis entspricht, wurden die Verdichtungseigenschaften auch mit einer praxisgerechteren Druckschubverdichtung im Gyrator-Verdichter untersucht. Das Gyrator-Verfahren bietet zudem Analysen des Verdichtungsverhaltens, die eine weitergehende Beurteilung des Verdichtungsverhaltens ermöglichen, auch bezüglich der Einflüsse der Zusätze und des PmB (vergl. Kap. 4.3).

Mit dem Marshall-Gerät können nach dem Merkblatt für die Verdichtung von Asphalt, Teil 2: Theorie der Verdichtung, FGSV (1993), die Verdichtungswiderstände C und D ermittelt werden.

Aus den Raumdichten von Marshall-Probekörpern, die unter systematischer Variation der Anzahl der Verdichtungsschläge hergestellt wurden, lässt sich der Verdichtungswiderstand C berechnen. Der Verdichtungswiderstand D wird über die Dickenänderung der Marshall-Probekörper während des Verdichtungsprozesses ermittelt. Die verschiedenen Verfahren sind nach dem Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, Theorie der Verdichtung, FGSV (1993), als gleichwertig anzusehen. Da für das Verfahren zur Ermittlung des Verdichtungswiderstandes C die Herstellung einer größeren Anzahl von Marshall-Probekörpern nötig ist und die Versuchsmaterialien nur in beschränkter Menge zu beschaffen waren, wurde für die Beurteilung der Verdichtungseigenschaften der Verdichtungsgrad D ermittelt. Die hierbei mögliche automatische Dickenmessung erbrachte zusätzliche Beurteilungskriterien.

Da nach KANDHAL et al. (1995) (vergl. Kap. 4.3) mit Druckschubverdichtungen im Gyrator-Verdichter weitere Erkenntnisse zum „inneren“ Verdichtungsverhalten von Asphalten mit Asphaltgranulat gewonnen werden konnten, wurden auf der Grundlage der von PAULMANN (1969) und GAUER (1975) durchgeführten Forschungen verschiedene Verdichtungsarbeiten der Mischgutvarianten ermittelt. Hierzu wurden die Versuchskennwerte Gyratorwinkel, Rollenlagerkraft und Probekörperhöhe erfasst.

Anhand der Differenzen zwischen den Verdichtungswiderständen der Mischgutsorten mit Asphaltgranulatanteilen und denen der Asphaltmischgüter ohne Asphaltgranulat wurde festgestellt, ob die Wiederverwendung der Fräsasphalte, bzw. die Zusätze oder das PmB im Granulat, Einflüsse auf die Verdichtungseigenschaften ausübten.

Dazu wurde bei den Verdichtungsversuchen mit dem Marshall-Gerät und dem Gyrator-Verdichter jeweils eine Prüftemperatur von 135°C angesetzt. Denn nach Untersuchungen von ARAND und RENKEN (1992) war ein Einfluss der Bindemittelsorte auf den Verdichtungswiderstand D bei der Verdichtungstemperatur von 135°C im Labor nicht nachzuweisen. Der Verdichtungswiderstand D wurde aber durch Mehrzugaben von organischen Faserstoffen im Splittmastixasphalt geringer. Auswirkungen auf die Verdichtungsarbeit im Marshall-Gerät wurden dagegen nicht beobachtet.

5.5.1.1 Schlag-Verdichtung mit dem Marshall-Gerät

Mit dem Marshall-Gerät wurde der Verdichtungswiderstand D nach dem Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2: Theorie der Verdichtung, FGSV (1993), ermittelt.

Durch die Dickenmessungen der Marshall-Probekörper in Abhängigkeit von der Schlagzahl S bzw. der Verdichtungsarbeit wurden die Kehrwerte der Probekörperdicken ermittelt und durch eine Exponentialfunktion (vergl. Gl. 5-1) angenähert.

$$\frac{1}{d(S)} = a - b \cdot e^{\frac{-S}{D}} \text{ [mm}^{-1}\text{]} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

mit $a = \frac{1}{d_{\infty}}$

und $b = \frac{1}{d_{\infty}} - \frac{1}{d_0}$

Darin bedeuten:

$d(S)$ Probekörperdicke [mm] in Abhängigkeit von der aufgewendeten Verdichtungsarbeit

S Verdichtungsarbeit [21 Nm], Anzahl der Verdichtungsschläge

d_{∞} rechnerisch minimal erreichbare Probekörperdicke [mm]

d_0 rechnerische Anfangsdicke [mm] zu Beginn des Verdichtungsprozesses

D Verdichtungswiderstand [21 Nm]

Die physikalische Dimension des Verdichtungswiderstandes D ergibt sich aus der Masse des Fallgewichts des Fallhammers nach Marshall (ca. 46 N) und der Fallhöhe (0,46 m) zu 21 Nm. Der Verdichtungswiderstand D beschreibt die Krümmung der Verdichtungskurve bzw. die Geschwindigkeit der Dickenänderung in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit. Daher gilt: Ist der Zahlenwert für D groß, ist das Asphaltmischgut schwer verdichtbar, ist er klein, dann ist das Asphaltmischgut leicht verdichtbar.

5.5.1.2 Druckschubverdichtung mit dem Gyrator-Verdichter

Die Asphaltvarianten wurden im Gyrator-Verdichter einer Druckschubverdichtung unterzogen. Die Einwaage des Mischguts wurde nach GAUER (1975) auf 0,525 x Mischgutrohndichte $\rho_{R,bit}$ [Kg] festgelegt und das Mischgut in der Probekörperform mit einer Lehre auf einen Anfangshohlraumgehalt von 25 Vol.-% vorverdichtet.

Das Mischgut wird im Gyrator-Verdichter durch einen hydraulischen Stempel (vergl. Abb. 5-16, Nr. 10) mit einer vertikalen Druckspannung von 0,7 N/mm² belastet und eingespannt. Der Probe wird durch das Verstellen der unteren Rolle (Nr. 7) des Rollenträgers (Nr. 6) eine Anfangsverformung aufgezwungen, die einem Vorgabewinkel von $\alpha_v = 1^\circ$ entspricht. Der Rollenträger (Nr. 6) dreht sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 Umdrehungen pro Minute.

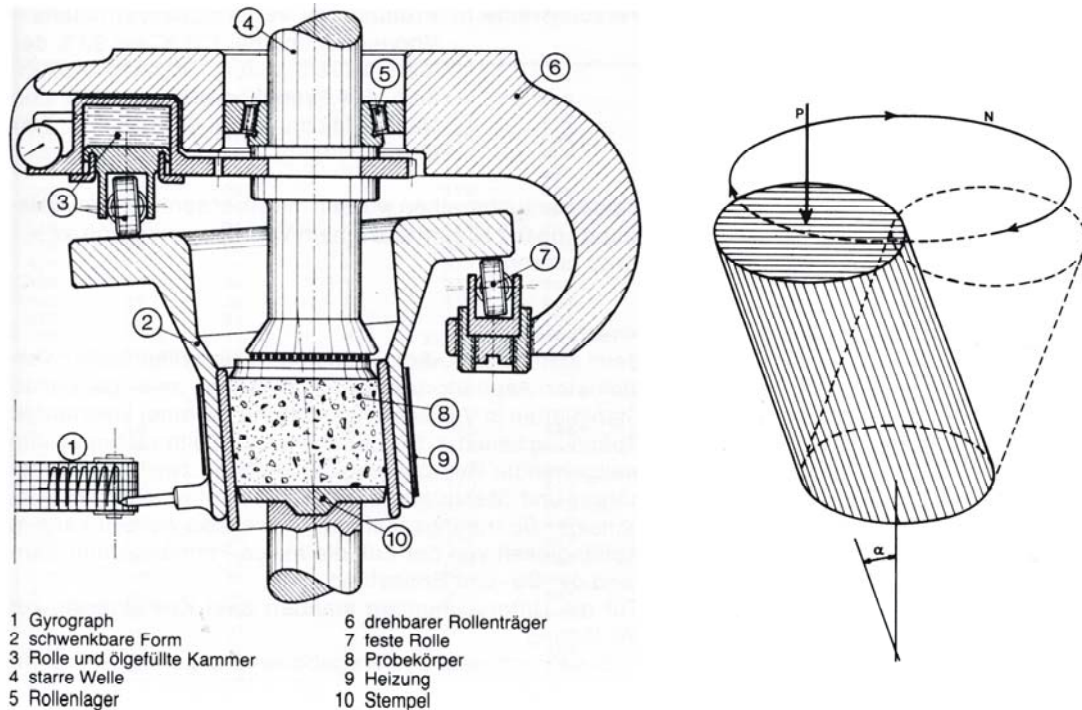


Abb. 5-16: Verdichtungsmechanismus des Gyrator-Verdichters und kreiselnde Bewegung des Probekörpers während der Verdichtung im Gyrator-Verdichter, PAULMANN und MOTZ (1984)

Da die schwenkbare Form auch um eine gedachte Achse durch die Auflager der beiden Rollen kippen kann, muss nach LOEWENSTEIN (1976) der größte Neigungswinkel der Rollenbahn zur Horizontalen nicht in der vertikalen Ebene durch die beiden Rollen auftreten. Der größte Neigungswinkel α_G tritt danach an einer anderen Stelle auf und ist um den Nachlaufwinkel Φ gegenüber dem Vorgabewinkel α_V phasenversetzt (vergl. Abb. 5-17).

Der Nachlaufwinkel Φ entspricht nach PAULMANN und KOLB (1985) dem Verlustfaktor einer viskoelastischen Substanz bei einer dynamischen Prüfung (vergl. Gl. 5-2)

$$\Phi = \arccos \frac{\alpha_V}{\alpha_G} \quad (\text{Gl. 5-2})$$

Während der Versuchsdurchführung wurden die Rollenlagerkraft P, der Gyratorwinkel α_G und die Änderung der Probekörperhöhe h erfasst. Die inneren Verdichtungsabläufe wurden nach PAULMANN und MOTZ (1985) mit dem Nachlaufwinkel Φ beurteilt, wonach der Nachlaufwinkel Φ eine Kenngröße für die innere Reibung darstellt und auf der Grundlage der komplexen Flüssigkeit nach dem Burgers-Modell in Abhängigkeit des Verdichtungszustandes anzeigt, welches Stoffverhalten im Mischgut vorherrscht, das eines viskoelastischen Festkörpers nach Kelvin oder einer elastoviskosen Flüssigkeit nach Maxwell.

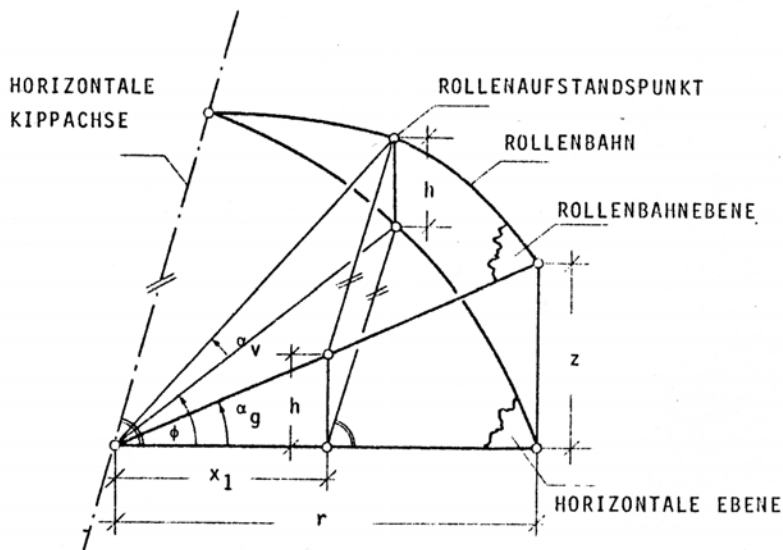


Abb. 5-17: Geometrische Bedingungen am Gyrator-Verdichter nach LOEWENSTEIN (1976)

Der Verlauf des Nachlaufwinkels gliedert sich nach PAULMANN und MOTZ in drei Bereiche (vergl. Abb. 5-18).

Im ersten Bereich, zu Beginn des Verdichtungsprozesses, sind die Mineralstoffe sehr locker gelagert, und die Mörtelviskosität bestimmt hauptsächlich die möglichen Kornverschiebungen. Die Nachlaufwinkel sind im ersten Bereich relativ groß. Im zweiten Bereich baut sich mit größer werdender Lagerungsdichte ein Korngerüst auf. Die Stabilität des Korngerüsts ist abhängig von der inneren Reibung und der Mörtelviskosität und Mörtelmenge. Der Nachlaufwinkel verringert sich. Die Abnahme des Nachlaufwinkels nimmt mit zunehmender Lagerungsdichte differenziell ab. Unter 45 Grad nähern sich die Mischguteigenschaften denen eines viskoelastischen Festkörpers nach Kelvin an. Der erreichte Minimalwert des Nachlaufwinkels kennzeichnet den Lagerungszustand der Mineralstoffe, bei dem das Mischgut der aufgebrachten Verformung den größten Widerstand bietet. Wird der Verdichtungsprozess fortgesetzt, dann treten Kantenabplatzungen und Kantenabriebe auf. Zudem vermindert der in die Hohlräume vordringende Mörtel durch den entstehenden Strömungsdruck die Kontaktflächen der Mineralstoffe. Die innere Reibung nimmt damit ab, erkenntlich durch einen ansteigenden Nachlaufwinkel. Der dritte Bereich beginnt, wenn der Nachlaufwinkel 45 Grad überschreitet. Das Mischgut zeigt ein viskoelastisches Flüssigkeitsverhalten nach Maxwell.

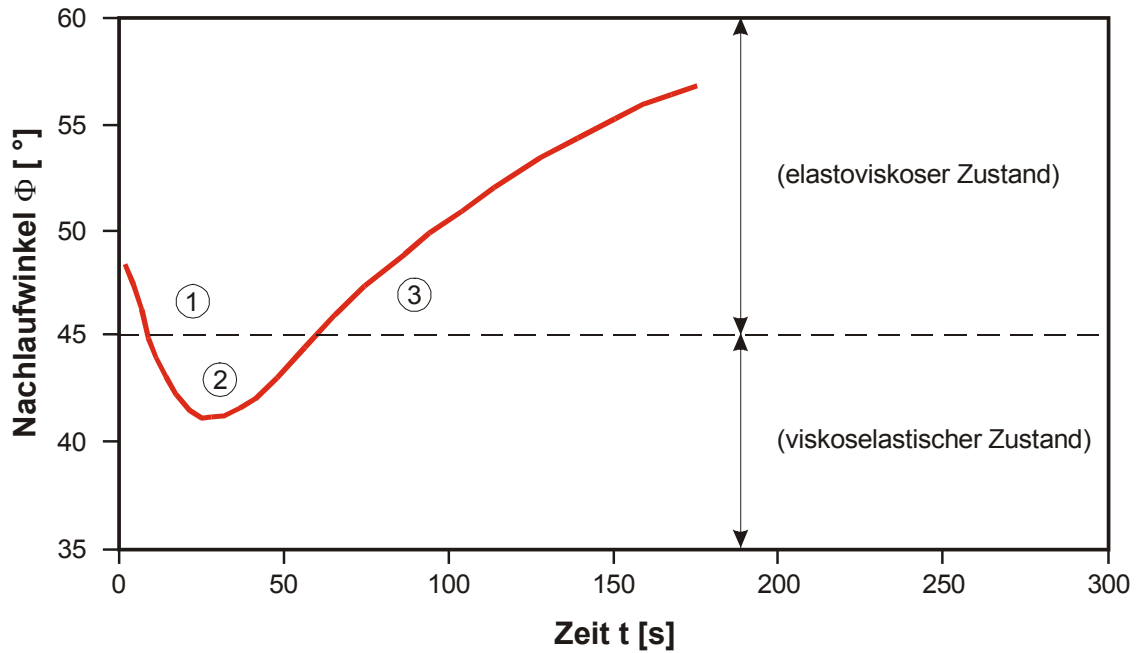


Abb. 5-18: Typischer Verlauf des Nachlaufwinkels in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit im Gyrator-Verdichter

Für die Beurteilung des inneren Verdichtungsverhaltens wurde die Verdichtungsarbeit berechnet, die zum Durchlaufen des Feststoffbereiches nötig ist. Diese Verdichtungsarbeit bietet nach PAULMANN und MOTZ die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit des Korngerüsts zu beurteilen und Rückschlüsse auf das Verdichtungsverhalten insofern zu ziehen, als bei einem leicht verdichtbaren Mischgut die Verdichtungsarbeit gering ist, weil die Stützwirkung des Korngerüsts nur kurz erhalten bleibt.

Dazu wurde in Anlehnung an PAULMANN und MOTZ jeweils der Verlauf des Nachlaufwinkels Φ als Funktion der Verdichtungszeit t ermittelt (vergl. Anlagen 7).

Die geleistete Verdichtungsarbeit setzt sich nach GAUER (1975) aus folgenden Arbeitsanteilen zusammen, die aus den bei der Verdichtung wirksamen Kräften entstehen:

- A_V infolge der senkrechten Last
- A_R infolge der Wandreibung
- A_H infolge der Radialspannung
- A_W aus Walkarbeit gegen das Rückstellmoment bzw. den Verformungswiderstand

Da die sich nahezu aufhebenden Arbeitsanteile aus Reibung und Radialspannung nach GAUER vernachlässigbar sind, wird die Verdichtungsarbeit nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen U bei konstanter Querschnittsfläche F und konstantem senkrechtem Stempeldruck

P_V in Abhängigkeit von der Höhenabnahme Δh des Probekörpers, der Rollenlagerkraft P sowie dem Gyratorwinkel α_G folgendermaßen berechnet (vergl. Gl. 5-3):

$$A_G = P_V * F * \Delta h + k * P * \alpha_G * U \quad (\text{Gl. 5-3})$$

Darin bedeuten:

P_V senkrechter Stempeldruck = 0,7 N/mm²

F Querschnittsfläche = 8107,3 mm²

Δh Höhenabnahme des Probekörpers nach Umdrehungen U

k Gerätekonstante = $0,0278 = \frac{4 * \pi^2}{180} * l$ (l ist der Abstand des Rollenlagers bzw. der Rollenlagerkraft zur Achse der schwenkbaren Form, vergl. Abb. 5-16)

P Rollenlagerkraft

α_G Gyratorwinkel

U Umdrehungen

Bei verformungsbeständigeren Asphaltmischungen überschreitet der Nachlaufwinkel während des Verdichtungsprozesses im Gyrator-Verdichter die 45 Grad nicht mehr. In solchen Fällen wurden zur Beurteilung der Verdichtungseigenschaften die Verdichtungsarbeiten berechnet, die zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels benötigt wurden, weil die maximale Lagerungsdichte der Mineralstoffe durch einen minimalen Nachlaufwinkel gekennzeichnet ist. Die minimalen Nachlaufwinkel wurden dazu grafisch jeweils aus dem Verlauf des Nachlaufwinkels in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit ermittelt.

5.5.2 Gebrauchsverhalten

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde das Gebrauchsverhalten der Mischgutvarianten hinsichtlich der Auswirkungen von Fräsasphalten mit stabilisierenden Zusätze bzw. PmB untersucht.

Zum einen wurde jeweils der Widerstand gegen Spurrinnenbildung mit dem einaxialen Druckschwellversuch im oberen Gebrauchstemperaturbereich ermittelt. Es wurde eine Prüftemperatur von 50°C nach der Technischen Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme (1999), angesetzt.

Zum anderen wurde das Gebrauchsverhalten im unteren und mittleren Gebrauchstemperaturbereich bezüglich des Widerstandes gegen Ermüdung bzw. Rissbildung ermittelt. Hierzu wurden

Spaltzugschwellversuche bei +20°C und zusätzlich für die Asphaltbetone 0/11S bei -5°C durchgeführt. Der Widerstand gegen Rissbildung wurde nach GRÄTZ (1998) am Verlauf der Querverformung mittels der Wendepunktkoordinaten sowie der Asymptoten der unteren Hüllkurven beurteilt.

5.5.2.1 Verformung

Das Verformungsverhalten wurde mit dem einaxialen Druckschwellversuch in Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme (1999), geprüft.

Dazu wurden mit den Asphaltvarianten Marshall-Probekörper hergestellt. Die Marshall-Probekörper wurden einer einaxialen sinusförmigen Druckbelastung zwischen einer Oberlast von $P_0 = 1.600 \text{ N}$ bzw. einer Oberspannung von $\sigma_0 = 0,20 \text{ MN/m}^2$ und einer Unterlast von $P_U = 200 \text{ N}$ bzw. einer Unterspannung von $\sigma_U = 0,025 \text{ MN/m}^2$ unterworfen. Die Belastungsimpulsdauer betrug 0,2 Sekunden bzw. die Impulsfrequenz 5 Hz. Es erfolgte alle 0,02 Sekunden eine Datenaufzeichnung der Axial- und der Querdehnung, dies entspricht zehn Einzeldaten für jede Messgröße pro Lastimpuls. Die Versuche wurden ohne Lastpause gefahren, denn HOU (1996) stellte fest, dass nur die Dehnungsraten bei Versuchen ohne Lastpause in engem Zusammenhang mit berechneten Spurrinntiefen stehen.

Der Verlauf einer Impulskriechkurve kann nach der TP A-StB (1999) in drei Phasen unterteilt werden (Abb. 5-19). Die erste Phase ist gekennzeichnet durch eine Konsolidierung mit großer Verformung und progressiv abnehmender Verformungsgeschwindigkeit. Die zweite Phase umfasst den Bereich mit annähernd konstanter Verformungsgeschwindigkeit und mit dem Wendepunkt. Die Formänderung ist in diesem Bereich noch volumenkonstant. In der dritten Phase nimmt die Verformung progressiv zu. Dabei beginnt eine fortschreitende volumendilatante Gefügezerstörung des Probekörpers.

In der unteren und der oberen Hüllkurve der axialen bzw. horizontalen Verformung treten in der Phase 2 zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_w Wendepunkte auf.

Nach HOU (1996) bestehen die Dehnungsraten bei Versuchen ohne Lastpause schon nach ca. 1.000 Lastwechseln überwiegend aus viskosem Dehnungszuwachs. Deshalb kann von den Dehnungsraten am Versuchsende nach 1.000 Lastwechseln auf die Spurrinntiefe bzw. den Widerstand gegen bleibende Verformungen geschlossen werden. Nach HOU ergaben sich jeweils gleich gute Korrelationen zwischen Dehnungsraten aus Axial- und aus Querdehnungen zu berechneten Spurrinntiefen.

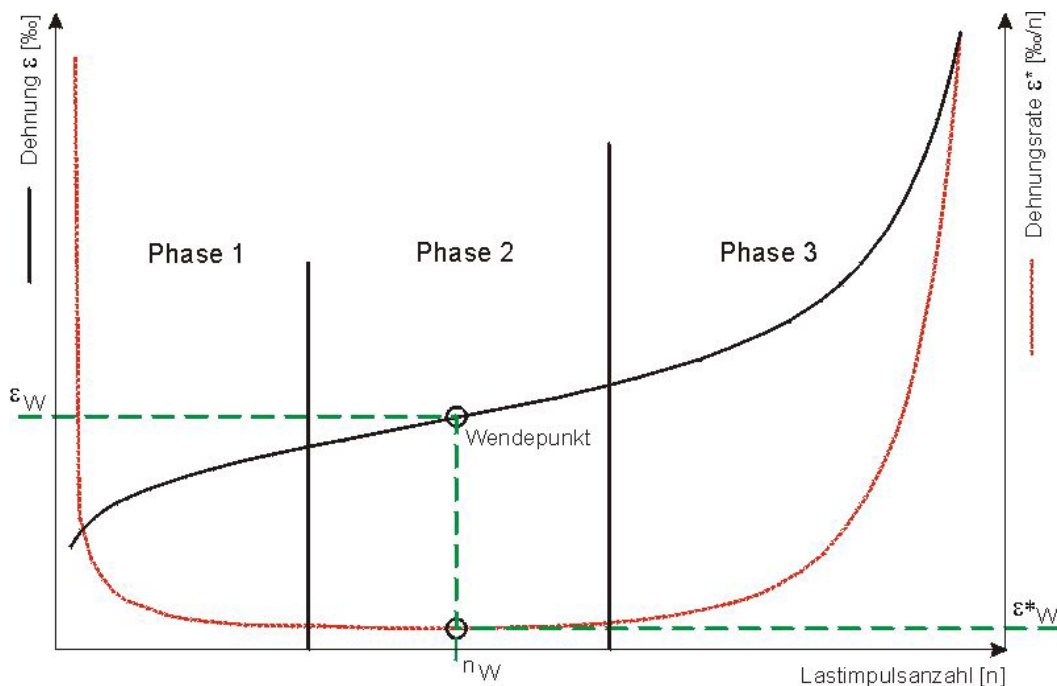


Abb. 5-19: Typischer Verlauf einer Impulskriechkurve aus der Dehnung in Abhängigkeit der Lastimpulsanzahl mit zugehöriger Kurve der Dehnungsrate nach TP A-StB (1999)

Die Druckschwellversuche wurden in Anlehnung an die Vorschläge zu den Versuchsbedingungen von HOU nach ca. 15 min. bzw. 4.500 Lastwechseln beendet. Die Dehnungsraten aus den Axialdehnungen am Versuchsende wurden als maßgebende Kennwerte zur Ansprache des viskosen Verformungsverhaltens der Asphaltvarianten herangezogen.

Dafür wurden berechnet:

- Stauchung bzw. (negative) Axialdehnung am Versuchsende $EP_{SA} = W/h$ [-]
 W : Axialverformung [mm]
 h : Höhe des Probekörpers [mm]
- Axialdehnungsrate am Versuchsende $VE_{PSA} = V/h$ [-/s]
 V : Verformungsgeschwindigkeit [mm/s]
 h : Höhe des Probekörpers [mm]

5.5.2.2 Rissbildung

Das Rissverhalten der Asphaltvarianten wurde mit lastgeregelten Spaltzugschwellversuchen untersucht. Mit einer hydraulischen Presse wurden Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm hergestellt. Die Höhen der Probekörper wurden in Anlehnung an die ZTV Asphalt-StB 01 für den Asphaltbeton 0/11S mit 40 mm und für den Asphaltbinder 0/16 mit 80 mm gewählt.

Die Probekörperhöhe der Asphalttragschicht 0/32C wurde nach der ZTVT-StB 95 mit 120 mm festgelegt. Die Prüftemperaturen betragen für alle Asphaltvarianten 20°C. Zusätzlich wurden mit den Varianten des Asphaltbetons 0/11S Spaltzugschwellversuche bei minus 5 °C gefahren.

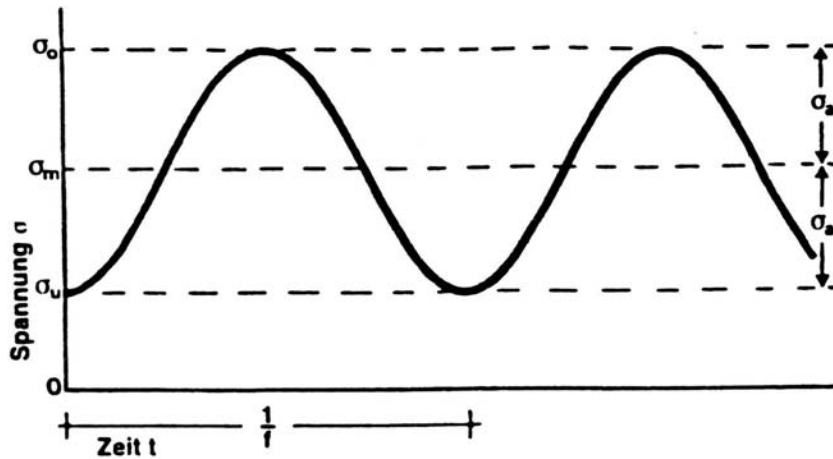


Abb. 5-20: Spannungsverlauf der Schwellbelastung bei lastgeregeltem Spaltzugschwellversuch, PAULMANN und GRÄTZ (1987)

Die Probekörper wurden axial mit einer Schwellbelastung beaufschlagt (vergl. Abb. 5-20). Die gegeneinander gerichteten Flächenlasten wurden über Lastverteilungstreifen mit zur Probekörperachse parallel verlaufenden Mantelflächen eingeleitet. In den Probekörpern entstehen infolge der Schwellbelastung $\sigma_{(t)}$ (vergl. Gl. 5-4) unter der Voraussetzung eines ebenen Spannungszustandes ($\sigma_z = 0$) und der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes $\sigma = E \cdot \varepsilon$ die Schwellnormalspannungen $\sigma_x(t)$ und $\sigma_y(t)$ (vergl. Abb. 5-21).

$$\sigma_{(t)} = \sigma_m - \sigma_a \cdot \cos \left[\frac{360}{t_B} \cdot t \right] \quad (\text{Gl. 5-4})$$

$$t_B \quad \text{Belastungszeit} = \frac{1}{f}$$

Die horizontale Spannung σ_x entlang der x-Achse ist eine Zugspannung. Im Mittelpunkt ($x = 0$) beträgt die Spannung $\sigma_x = 2 \cdot P / \pi \cdot d \cdot h$ und am Kreisumfang ($X = d/2$) ist $\sigma_x = 0$. Die vertikale Spannung σ_y entlang der x-Achse ist eine Druckspannung. Im Mittelpunkt ($x = 0$) beträgt die Spannung $\sigma_y = -6 \cdot P / \pi \cdot d \cdot h$ und am Kreisumfang ($X = d/2$) ist $\sigma_y = 0$. Danach tritt ein Zugbruch ein, wenn der Asphalt eine mindestens dreimal größere Druck- als Zugfestigkeit aufweist, denn im Mittelpunkt gilt für die vertikale Spannung $\sigma_y = -3 \cdot \sigma_x$.

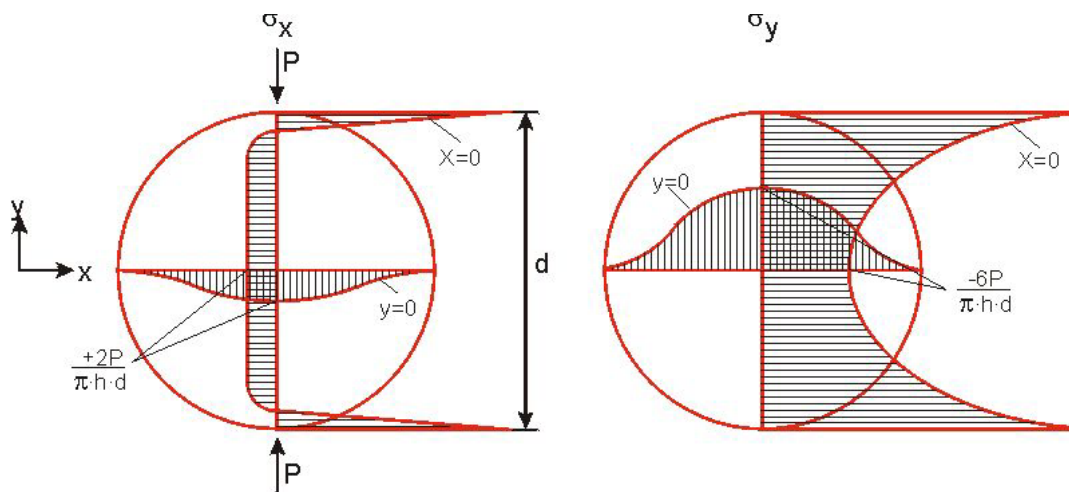


Abb. 5-21: Spannungsverteilung im Spaltzug-Probekörper entlang der horizontalen und vertikalen Achse

Die horizontale Spannung σ_x wäre bei einer punktuellen Lastübertragung, also einer Lastübertragung ohne Lastverteilungstreifen, entlang der y -Achse mit $\sigma_x = 2 * P / \pi * d * h$ konstant. Mit einem Lastverteilungstreifen entstehen aber in der Nähe der Einleitungsstellen aus Zugspannungen Druckspannungen (vergl. Abb. 5-22).

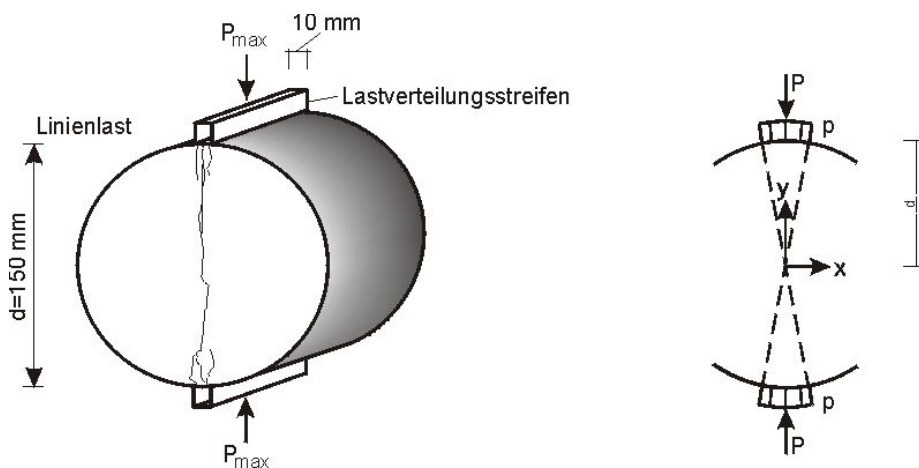


Abb. 5-22: Probekörper mit Lastverteilungstreifen und Belastungsschema in der Lastachse des Spaltzug-Probekörpers infolge einer Flächenbelastung nach DURTH und GRÄTZ (1996)

Die vertikale Spannung σ_y tritt entlang der y -Achse als Druckspannung auf. Ihre Größe reicht von $\sigma_y = -6 * P / \pi * d * h$ bei $y = 0$ bis zu unendlich an den Lasteinleitungsstellen bei $y = \frac{d}{2}$.

Durch die Lastverteilungstreifen ist ein Bruch aufgrund des Überschreitens der aufnehmbaren Druckspannung an den Scheitelpunkten vermeidbar.

Der untere Scheitelwert der Zug-Schwellspannung stellt nach ARAND (2000) die kryogenen Zugspannungen bei kraftgeregelten Versuchen dar. Nach GRÄTZ (1998) wurde für die Unterlast $P_U = 200$ N, für die Belastungszeit $t_B = 0,2$ Sekunden gewählt und die Versuche ohne Lastpause gefahren.

Die Oberlast P_0 ist von der Höhe h des Probekörpers abhängig (vergl. Gl. 5-5).

$$P_0 = \frac{\pi * d}{2} * h * \sigma_x \quad [N] \quad \text{Gl. 5-5}$$

Zur Berechnung der zulässigen horizontalen Spannung σ_x im ebenen Spannungszustand des Spaltzugschwellversuchs wurde das von DURTH und GRÄTZ (1996) berechnete Verhältnis zur Biegezugspannung σ_B im einaxialen Spannungszustand des Biegeschwellversuchs angewendet (vergl. Gl. 5-6), welches aus der Gestaltänderungsenergiehypothese hergeleitet wurde. In diesem Verhältnis erzeugen die Spannungen in den Probekörpern im Biegezugschwell- und im Spaltzugschwellversuch gleiche Beanspruchungszustände.

$$\sigma_B = 3,6056 * \sigma_x \quad \text{Gl. 5-6}$$

Danach berechnet sich nach Gl. 5-6 mit einer Biegezugspannung $\sigma_B = 1,625$ N/mm² bei einer Prüftemperatur von 20°C die „zulässige“ Spaltzugspannung zu $\sigma_x = 0,4507$ N/mm². Daraus ergeben sich nach Gl. 5-5 folgende Oberlasten $P_{(20^\circ\text{C})}$:

- 4,3 kN für 4 cm hohe Probekörper (Asphaltbeton 0/11S),
- 8,5 kN für 8 cm hohe Probekörper (Asphaltbinder 0/16) und
- 12,8 kN für 12 cm hohe Probekörper (Asphalttragschicht 0/32C).

Die Biegezugspannung bei -5°C beträgt nach DURTH und GRÄTZ $\sigma_B = 4,687$ N/mm². Die Oberlast $P_{(-5^\circ\text{C})}$ berechnet sich nach Gl. 5-5 und 5-6 für 4 cm hohe Probekörper zu 12,3 kN.

Es entstehen axiale Verformungen entsprechend einer Stauchung und horizontale Verformungen entsprechend einer Dehnung. Die Querdehnungsrate im Wendepunkt der unteren Hüllkurve der Impulskriechkurve ist nach DURTH und GRÄTZ die maßgebende Kenngröße für die Beurteilung des Widerstandes gegen Rissbildung. Der Wendepunkt kennzeichnet den Beginn der Bruchphase (vergl. Abb. 5-23).

Die Lastspielzahl in der Asymptote kennzeichnet den Bruch. Nach GRÄTZ (1998) können hohe Lastspielzahlen von Asphaltsschichten nur bei geringen Dehnungsraten ertragen werden, ohne dass sie Schaden nehmen. Niedrige Dehnungsraten bergen aber die Gefahr in sich, dass beispielsweise bei häufigen Frost-Tau-Wechseln eine weichere Unterlage zu Rissbildungen in der

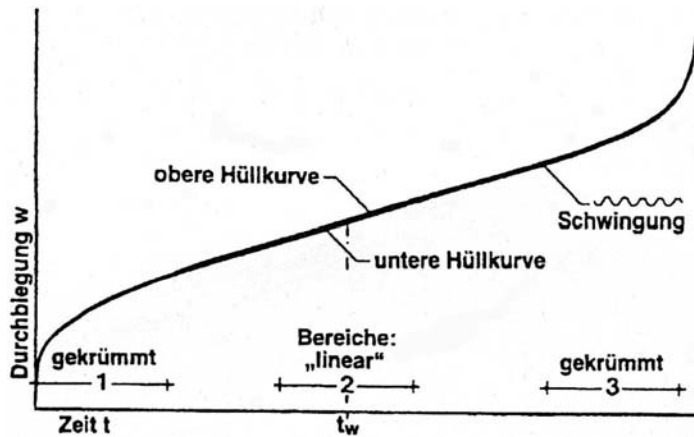


Abb. 5-23: Qualitativer Verlauf der Verformung, PAULMANN und GRÄTZ (1987)

steiferen darüber liegenden Schicht führt. Für einen ausreichenden Widerstand eines Asphalts gegen Rissbildung leitete GRÄTZ daher mit Versuchsergebnissen aus Spaltzugschwellversuchen bei 20°C einen unteren Grenzwert für die Querdehnungsrate in Höhe von $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ [-/s]}$ ab.

5.5.3 Bindemitteluntersuchungen mit einem dynamischen Scherrheometer

Das elastische Verhalten und die Steifigkeit der Bindemittel wurden mit einem dynamischen Scherrheometer (Rheo Stress RS50, HAAKE) geprüft. Dazu wird zwischen zwei Platten ein Bitumenblättchen kraftschlüssig „eingespannt“ (vergl. Abb. 5-24).

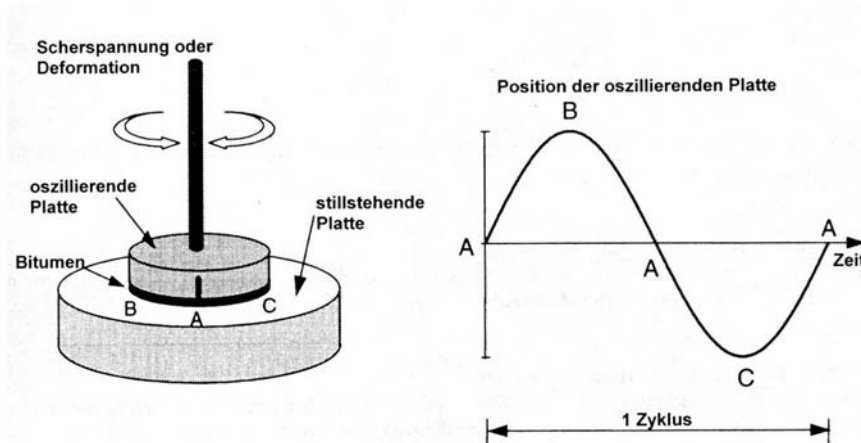


Abb. 5-24: Funktionsprinzip eines dynamischen Scherrheometers, ASPHALT INSTITUTE (1994)

Im Schubwechsel- bzw. Schwingungsversuch bewegt sich die obere Platte (Markierung) in einem Oszillationszyklus von Punkt A nach Punkt B und zurück über Punkt A nach Punkt C sowie wieder zurück nach Punkt A (vergl. Abb. 5-24 und 5-25). Die untere Platte ist dabei festgesetzt.

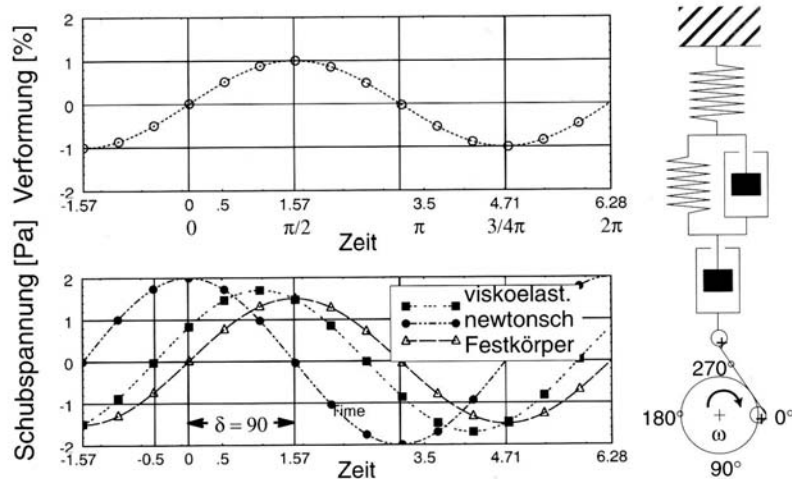


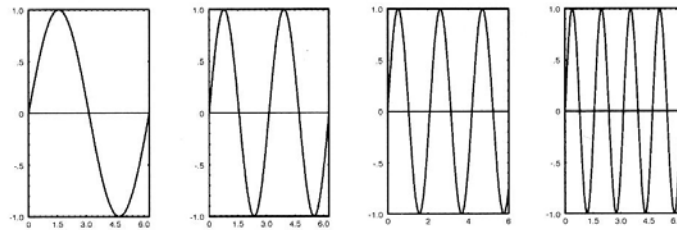
Abb. 5-25: Ansprache der Verformung und der Spannung eines viskoelastischen Burger-Fluid im Schubwechselversuch im Bereich zwischen Hooke'schem Festkörper und Newtonscher Flüssigkeit, SCHRAMM (1995)

Die Frequenz und die Schubspannung können variiert werden. Es können entweder Messungen mit unterschiedlicher Frequenz (Frequenzsweep) oder mit unterschiedlicher Deformation (Schubspannungssweep) bei unterschiedlichen Temperaturen (Temperatursweep) vorgenommen werden.

Die Schubwechselversuche wurden mit einem Frequenzsweep im Bereich von 1 Hz bis 100 Hz mit einer konstanten Schubspannung von 1.000 Pa bei Prüftemperaturen von 35 und 50°C durchgeführt (vergl. Abb. 5-26).

Als Maß für die Bindemittelsteifigkeit wurden die komplexen Schubmodule IG^*I ermittelt sowie deren elastische Anteile (Speichermodul) $G' = IG^*I \cos \delta$ und deren viskose Anteile (Verlustmodul) $G'' = IG^*I \sin \delta$ berechnet.

Der Phasenverschiebungswinkel δ einer viskoelastischen Substanz ist der mechanisch erfasste Zeitunterschied zwischen den Extremwerten der eingebrachten Spannung und den Extremwerten der resultierenden Verformung (vergl. Abb. 5-27, Gl. 5-7).



Frequenzen werden in Stufen gesteigert und ergeben Paare von G^* und δ .

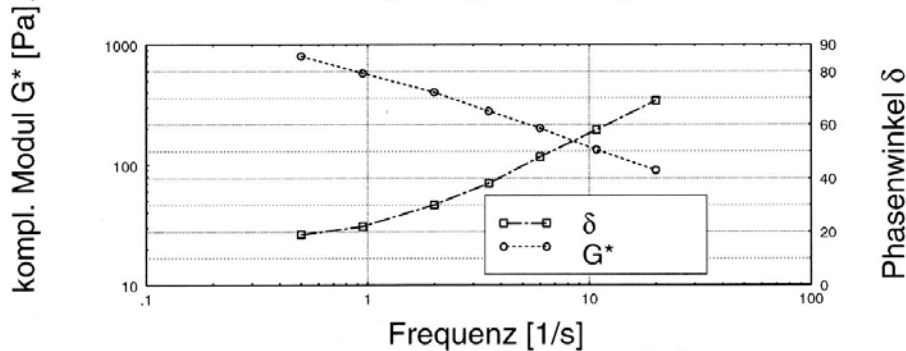


Abb. 5-26: Dynamische Schwingversuche mit programmiert gesteigerter Frequenz, SCHRAMM (1995)

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} * 360^\circ \quad (\text{Gl. 5-7})$$

Darin bedeuten:

δ Phasenverschiebungswinkel [°]

Δt Zeitverschiebung zwischen τ_{\max} und γ_{\max} [s]

t Zeit für eine Schwingung [s] mit $t = \frac{1}{f}$

f Frequenz [Hz]

Der Phasenverschiebungswinkel δ ist ein Kennwert für das Verhalten des Bitumens. Ist der Phasenverschiebungswinkel δ gering, so ist der elastische Anteil groß, ist er hoch, dann ist das Verhalten eher viskos.

Der Beitrag des Bitumens zum Widerstand des Asphalts gegen Spurrinnenbildung wurde nach BELLIN (1995) in Anlehnung an die amerikanischen Prüfungen im Strategic Highway Research Program (SHRP) mit dem Kennwert $IG^*/\sin \delta$ bei einer Frequenz von 1,47 Hz angesprochen. Ein steifes und sowohl elastisches Bitumen zeichnet sich durch einen hohen komplexen Schubmodul IG^* und einen möglichst geringen Phasenwinkel δ aus (vergl. Abb. 5-26, 5-27).

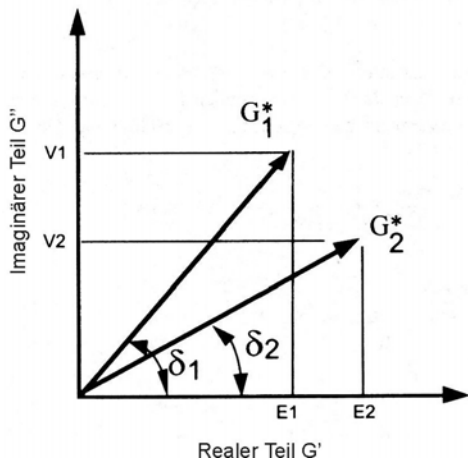


Abb. 5-27: Zusammenhang zwischen komplexem Schubmodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ zweier Substanzen mit gleichem Widerstand gegen Scherung ($G_1^* = G_2^*$), aber unterschiedlich großen elastischen bzw. viskosen Anteilen in der Gauß'schen Zahlenebene nach LITZKA et al. (1998)

Die Deformationen γ und die elastischen Rückverformungen sowie die viskosen Anteile der Verformung wurden mit Schubkriechversuchen bei Temperaturen von 20, 35 und 50°C ermittelt. Es wurde jeweils eine Schubspannung τ in Höhe von 8.000 Pa für eine Dauer von 180 Sekunden aufgebracht (vergl. Abb. 5-28).

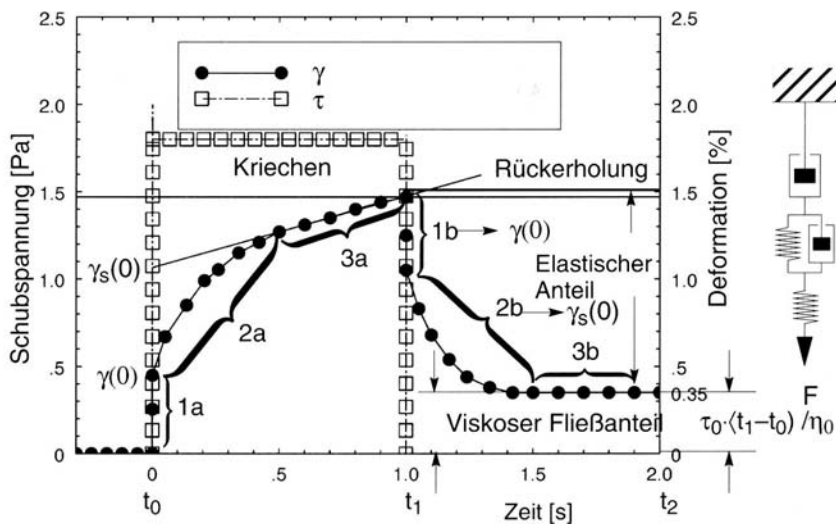


Abb. 5-28: Kriech- und Rückholversuch an einem Burger-Fluid in Abhängigkeit der Versuchszeit, SCHRAMM (1995)

6. Übersicht Messergebnisse

Die jeweils drei Messwerte bzw. daraus errechneten Kennwerte wurden einem varianzabhängigen Verfahren zur Ermittlung von Ausreißern nach dem Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Behandlung von abweichenden Messwerten (Ausreißern), FGSV (1978), unterzogen. Jeweils größter (x_n) und kleinster (x_1) Wert einer Messreihe wurden mittels der Prüfgrößen T_n bzw. T_1 (vergl. Gl. 6-1 und 6-2) unter Zugrundelegung einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 5% als mutmaßliche Ausreißer überprüft.

$$T_n = \frac{(x_{(n)} - \bar{x})}{s} \quad (\text{Gl. 6-1})$$

$$T_1 = \frac{(\bar{x} - x_{(1)})}{s} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

darin bedeuten:

\bar{x} arithmetisches Mittel der Messwerte n

s Standardabweichung der Messwerte n

Zudem wurden nach SACHS (1992) varianzanalytische Schnelltests und multiple Vergleiche von Mittelwerten nach Link und Wallace durchgeführt.

Mit varianzanalytischen Schnelltests wurde festgestellt, ob zwischen den Mittelwerten statistisch signifikante Unterschiede vorhanden sind. Gegebenenfalls wurde mit multiplen Mittelwertvergleichen bestimmt, welche der Mittelwerte sich untereinander statistisch signifikant unterscheiden. Diese Verfahren setzen voraus, dass zumindest angenäherte Normalverteilung, Gleichheit der Varianzen und gleiche Umfänge der Messreihen bestehen. Die Gleichheit der Varianzen wurde nach SACHS (1992) mit dem Cochran-Test überprüft. Dazu wurde mit den Varianzen innerhalb einer Gruppe und der maximalen Gruppenvarianz die Prüfgröße G_{\max} (vergl. Gl. 6-3) berechnet.

$$G_{\max} = \frac{s_{\max}^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_k^2} \quad (\text{Gl. 6-3})$$

Darin bedeuten:

s_{\max}^2 maximale Gruppenvarianz

Die Beurteilung von G_{\max} erfolgt mit tabellierten Signifikanzschranken. Ist G_{\max} größer als der für die Anzahl k der Varianzen innerhalb einer Gruppe und der Anzahl der Freiheitsgrade ν sowie für das gewählte Niveau von 5% tabellierte Wert, dann muss die Nullhypothese auf

Gleichheit der Varianzen abgelehnt und die Alternativhypothese $\sigma_{\max}^2 \neq \sigma^2$ akzeptiert werden. Heterogene Varianzen müssen zur Erzielung normalverteilter Werte mit homogenen Varianzen transformiert werden. Nach SACHS (1992) gelten die Signifikanzaussagen über transformierte Werte auch für die ursprünglichen Werte.

Statistisch signifikante Mittelwertunterschiede liegen vor, wenn folgende Bedingung erfüllt ist (vergl. Gl. 6-4):

$$\frac{n * R_{(\bar{x}_j)}}{\sum R_i} > K \quad (\text{Gl. 6-4})$$

darin bedeuten:

- n Anzahl der Einzelwerte
- $R_{(\bar{x}_j)}$ Spannweite der Mittelwerte
- R_i Spannweite der Einzelgruppen
- K Tabellierter kritischer Wert für den Test von Link und Wallace

Mittelwertunterschiede \bar{D} sind auf dem verwendeten Niveau statistisch signifikant, wenn Folgendes gilt (vergl. Gl. 6-5):

$$\bar{D} > \frac{K * \sum R_i}{n} \quad (\text{Gl. 6-5})$$

6.1 Marshall-Versuche

Die Verdichtungsversuche der Asphaltvarianten ergaben Verdichtungswiderstände D [21 Nm] in unterschiedlicher Reihung, sowohl nach den Mineralstofftemperaturen der Serien 1 bis 5 als auch nach den wiederverwendeten Asphaltgranulaten AG1, 2 und 3 (vergl. Abb. 6-1).

Die Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone 0/11S wurden in einer Spannweite von 5,3 Einheiten im Bereich von 15,6 bis 20,9 [21 Nm] ermittelt und waren erwartungsgemäß aufgrund geringeren Bindemittelgehalts und geringeren Splittgehalts nach ARAND und RENKEN (1992) (vergl. Abb. 5-19, Abb. 6-2) deutlich geringer als bei den Asphaltbindern 0/16 und Asphalttragschichten 0/32C, die im Bereich von ca. 26 bis 51 [21 Nm] lagen. Das arithmetische Mittel der Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone 0/11S mit 20% Asphaltgranulat betrug 17,9 [21 Nm]. Der Wert der Asphaltbetonreferenzmischung wurde mit 18,1 [21 Nm] nur unwesentlich größer ermittelt.

Asphaltvariante	Mittelwerte der Verdichtungswiderstände D [21 Nm]					
	Referenz- mischgut	Serie				
		1	2	3	4	5
		Asphaltgranulat- / Mineralstofftemperatur [°C]				
		130/150	130/165	130/180	130/200	130/230
AB 0/11S	18,1	---	---	---	---	---
AB 0/11S + 20% AG1	---	15,6	19,1	17,8	---	---
AB 0/11S + 20% AG2	---	16,4	15,9	18,2	---	---
AB 0/11S + 20% AG3	---	19,3	20,9	17,5	---	---
ABi 0/16	41,6	---	---	---	---	---
ABi 0/16 + 20% AG1	---	33,2	37,8	41,0	---	---
ABi 0/16 + 20% AG2	---	39,1	38,3	45,9	---	---
ABi 0/16 + 20% AG3	---	26,2	38,7	37,5	---	---
ATS 0/32C	39,7	---	---	---	---	---
ATS 0/32C + 25% AG1	---	39,0	38,5	32,1	31,7	---
ATS 0/32C + 40% AG1	---	35,6	41,5	37,4	---	29,7
ATS 0/32C + 25% AG2	---	40,4	42,3	50,8	40,6	---
ATS 0/32C + 40% AG2	---	40,4	41,5	41,0	---	39,5
ATS 0/32C + 25% AG3	---	44,2	38,1	40,4	39,9	---
ATS 0/32C + 40% AG3	---	39,2	39,4	39,5	---	37,6

Abb. 6-1: Verdichtungswiderstände D der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 5

Der Asphaltbeton 0/11S mit AG1 ließ sich in der Serie 1 unter den Asphaltbetonvarianten am leichtesten verdichten, wobei die Differenz zum Verdichtungswiderstand des Asphaltbetons 0/11S mit AG2 in der Serie 2 nur 0,3 Einheiten betrug. Die Erhöhung der Mineralstofftemperatur um 15°C von 150 auf 165°C hatte eine deutliche Erhöhung des Verdichtungswiderstandes von 3,5 Einheiten zur Folge.

Eine andere Reihung der Verdichtungswiderstände in Abhängigkeit von der Mineralstofftemperatur wurde bei den Asphaltbetonen 0/11S mit AG2 ermittelt. In der Serie 1 lag der Verdichtungswiderstand nur 0,8 Einheiten höher als bei dem Asphaltbeton 0/11S mit AG1. Infolge des Anhebens der Mineralstofftemperatur um 15°C wurde keine wesentliche Auswirkung auf den Verdichtungswiderstand ermittelt. Die Erhöhung der Mineralstofftemperatur auf 180°C führte aber wiederum zu einem deutlichen Anstieg des Verdichtungswiderstandes von 2,3 Einheiten auf 18,2 [21 Nm].

Der Verdichtungswiderstand des Asphaltbetons 0/11S mit AG3 wurde in der Serie 1 und 2 über dem der Referenzmischung ermittelt. Einem Verdichtungswiderstand von 19,3 [21 Nm] in der Serie 1 folgte nach einer Erhöhung der Mineralstofftemperatur auf 165°C in der Serie 2 ein Anstieg auf 20,9 [21 Nm]. Eine Zunahme der Mineralstofftemperatur ergab wiederum eine Abnahme des Verdichtungswiderstandes unter den Wert der Referenzmischung auf 17,5 [21 Nm]. Das arithmetische Mittel der Verdichtungswiderstände der Asphaltbindervarianten 0/16 betrug 37,5 [21 Nm]. Der Verdichtungswiderstand des Referenzmischguts Asphaltbinder 0/16 ergab sich zu 41,6 [21 Nm]. Die Verdichtungswiderstände lagen vornehmlich in einer Spannweite von -0,6 bis -4,1 [21 Nm] relativ zum Wert des Referenzmischguts.

Die Größenordnungen der Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone und der Asphaltbinder entsprachen den Ergebnissen von ARAND und RENKEN (1992). Die Verdichtungswiderstände der Asphaltbetonvarianten 0/11S lagen im Durchschnitt um rund 4 Einheiten über dem eines durchschnittlich zusammengesetzten Asphaltbetons 0/11 von ca. 14 [21 Nm]. Die Verdichtungswiderstände der Asphaltbinder 0/16 waren im Mittel um rund 1,5 Einheiten geringer als die eines durchschnittlich zusammengesetzten Asphaltbinders 0/16 von ca. 39 [21 Nm] (vergl. Abb. 6-1 bis -3).

Mit zunehmender Mineralstofftemperatur von 150 auf 180°C stiegen die Verdichtungswiderstände der Asphaltbinder 0/16 mit AG1 von 33,2 [21 Nm] auf 41,0 [21 Nm] an. Das arithmetische Mittel der Verdichtungswiderstände der Asphaltbinder 0/16 mit AG1 betrug 37,3 [21 Nm].

Die Erhöhung der Mineralstofftemperatur um 15°C von der Serie 1 zur Serie 2 führte bei dem Asphaltbinder 0/16 mit AG2 zu einem etwas geringeren Verdichtungswiderstand. Eine weitere Erhöhung um 15°C von der Serie 2 zur Serie 3 ergab wiederum einen deutlichen Anstieg von 7,6 Einheiten. Der Mittelwert der Verdichtungswiderstände der Asphaltbinder 0/16 mit AG2 ist mit 41,1 [21 Nm] nur 0,5 Einheiten kleiner als der Wert der Referenzmischung.

Für den Asphaltbinder 0/16 mit AG3 wurde in der Serie 1 ein um 15,4 [21 Nm] signifikant geringerer Verdichtungswiderstand zur Referenzmischung festgestellt. Eine um 15°C höhere Mineralstofftemperatur bewirkte einen Anstieg um 12,5 Einheiten. Mit einer Mineralstofftemperatur von 180°C in der Serie 3 hingegen wurde nur eine gering leichtere Verdichtbarkeit relativ zu dem Wert der Serie 2 erreicht.

Das arithmetische Mittel der Verdichtungswiderstände der Asphalttragschichten 0/32C mit 25 und 40% Asphaltgranulat in den Serien 1 bis 5 betrug 39,5 [21 Nm]. Der Verdichtungswiderstand der Tragschichtreferenzmischung lag in etwa gleicher Höhe bei 39,7 [21 Nm].

Die Verdichtungswiderstände der Asphalttragschichten 0/32C mit 25% AG1 lagen in den Temperaturstufen 150°C mit 39,0 [21 Nm] und 165°C mit 38,5 [21 Nm] etwas niedriger als der Wert der Referenzmischung. Eine Erhöhung der Mineralstofftemperatur um 15°C auf 180°C ließ den Verdichtungswiderstand um 6,4 Einheiten auf 32,1 [21 Nm] abfallen. Eine weitere Erhöhung

der Mineralstofftemperatur um 20°C von 180 auf 200°C ergab eine nur unwesentliche Änderung des Verdichtungswiderstandes von 0,4 Einheiten auf 31,7 [21 Nm].

Das Tragschichtmischgut mit 40% AG1 erreichte in der Temperaturstufe 150°C einen Verdichtungswiderstand von 35,6 [21 Nm]. Eine Erhöhung der Mineralstofftemperatur um 15°C auf 165°C ließ den Verdichtungswiderstand um 5,9 Einheiten auf 41,5 [21 Nm] ansteigen. Ein weiterer Anstieg der Mineralstofftemperatur auf 180°C senkte den Verdichtungswiderstand auf 37,4 [21 Nm], etwa die Größe der Referenzmischung.

In der Serie 5, die sich durch eine Mineralstofftemperatur von 230°C und durch das Vormischen des Asphaltgranulats mit den heißen Mineralstoffen auszeichnete (vergl. Kap. 5.4.7), wurde ein Verdichtungswiderstand von 29,7 [21 Nm] ermittelt, der deutlich unter 37,4 [21 Nm] der Serie 3 bei einer Mineralstofftemperatur von 180°C lag.

Tendenziell ließ sich die Asphalttragschicht 0/32C mit 25 und 40% AG1 mit zunehmender Mineralstofftemperatur im Temperaturbereich von 165 bis 200°C bzw. 230°C jeweils leichter verdichten.

Die Asphalttragschichten 0/32C mit AG2 waren, bis auf das Mischgut in der Serie 5, alle schwerer zu verdichten als das Referenzmischgut. Mit der stufenweisen Erhöhung der Mineralstofftemperatur um 15°C von 150 auf 180°C stieg der Verdichtungswiderstand der Asphalttragschicht 0/32C mit 25% AG2 von 40,4 [21 Nm] auf 50,8 [21 Nm] an, wobei der Temperaturschritt von 165 auf 180°C die größte Zunahme um 8,5 Einheiten bewirkte. Auch hier war wiederum eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Verdichtungsversuchen mit den Asphaltbetonen 0/11S und den Asphaltbindern 0/16 mit jeweils 20% AG2 zu beobachten. Mit einer Mineralstofftemperatur von 200°C wurde ein Verdichtungswiderstand von 40,6 [21 Nm] ermittelt, in gleicher Größenordnung wie bei 150°C.

Die Verdichtungswiderstände der Asphalttragschichten 0/32C mit 40% AG2 zeigten in dem Mineralstofftemperaturbereich von 150 bis 180°C nur unwesentliche Veränderungen. Auch die Anhebung der Mineralstofftemperatur von 180 auf 230°C ergab nur eine geringe Abnahme des Verdichtungswiderstandes um 1,5 Einheiten. Die Reihung der Verdichtungswiderstände der Asphalttragschichten 0/32C mit 40% AG2 in Abhängigkeit von der Mineralstofftemperatur entsprach der Reihung der Asphalttragschicht 0/32C mit 40% AG1. Nur waren die absoluten Differenzen der Verdichtungswiderstände von Temperaturstufe zu Temperaturstufe bei dem Mischgut mit 40% AG1 erheblich größer.

Mit einer Mineralstofftemperatur von 150°C wurde der Verdichtungswiderstand der Asphalttragschicht 0/32C mit 25% AG3 in Höhe von 44,2 [21 Nm] ermittelt. Eine Erhöhung der Mineralstofftemperatur auf 165°C ließ den Verdichtungswiderstand um 6,1 Einheiten gegenüber der Referenzmischung sinken. Eine Anhebung der Mineralstofftemperatur von 165 auf 180°C ergab wiederum einen Anstieg des Verdichtungswiderstandes auf 40,4 [21 Nm]. Eine weitere

Erhöhung der Mineralstofftemperatur um 20°C auf 200°C bewirkte dagegen keine wesentliche Änderung.

Die Verdichtungswiderstände der Asphalttragschichten 0/32C mit 40% AG3 wiesen in den Temperaturstufen 150, 165 und 180°C keine Abhängigkeit von der Mineralstofftemperatur auf. Mit einer Anhebung der Mineralstofftemperatur um 50°C von 180 auf 230°C wurde analog zu der Asphalttragschicht 0/32C mit 40% AG1 und AG2 eine Abnahme des Verdichtungswiderstandes ermittelt, wobei die Abnahme bei dem Mischgut mit AG1 7,7 Einheiten betrug und bei den Mischgütern mit AG2 und AG3 jeweils nur rund 2 Einheiten umfasste.

Asphaltart und -sorte	Füllergehalt	Brechsandanteil (relativ)	Splittgehalt	Größtkornanteil	Faserstoffanteil	Bindemittelgehalt
	Gew.-%	%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%
AB 0/11	10	50	52	18	-	5,9
ABi 0/16	6	75	68	30	-	4,6

Abb. 6-2: Zusammensetzung der durch die fette Markierung u.a. in Abb. 6-3 herausgehobenen durchschnittlich zusammengesetzten Asphaltbetone und Asphaltbinder, Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, FGSV (1993)

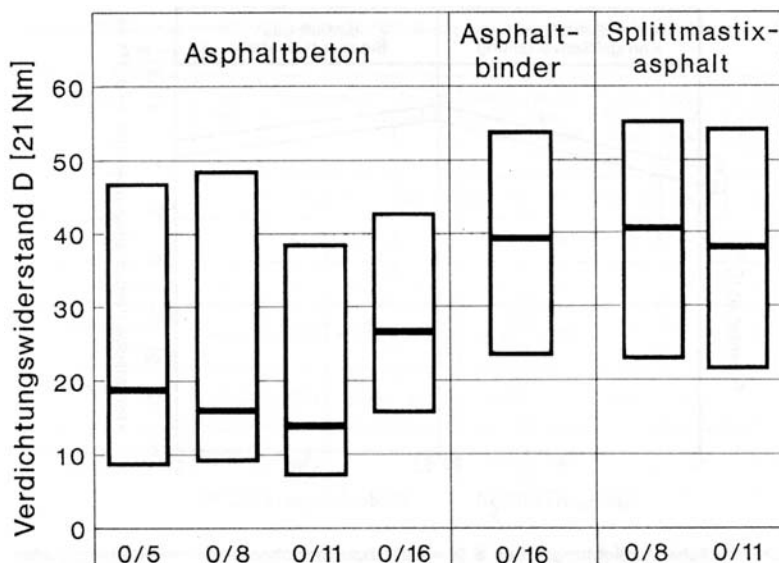


Abb. 6-3: Variationsbereiche des Verdichtungswiderstandes D verschiedener Asphaltmischgutarten und -sorten, die fette Markierung gibt den Verdichtungswiderstand D eines durchschnittlich zusammengesetzten Asphaltmischguts an, Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, FGSV (1993)

6.2 Gyrator-Versuche

Asphaltvariante	Spezifische Verdichtungsarbeit [Nm/kg]					
	Referenz- mischgut	Serie				
		1	2	3	4	5
		Asphaltgranulat- / Mineralstofftemperatur [°C]				
		130/150	130/165	130/180	130/200	130/230
AB 0/11S	209,1	---	---	---	---	---
AB 0/11S + 20% AG1	---	186,7	303,4	324,5	---	---
AB 0/11S + 20% AG2	---	231,2	322,3	419,7	---	---
AB 0/11S + 20% AG3	---	335,7	369,2	426,5	---	---

Abb. 6-4: Spezifische Verdichtungsarbeiten für das Durchlaufen des viskoelastischen Bereiches der Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3 (vergl. Anlagen 8)

Asphaltvariante	Spezifische Verdichtungsarbeit [Nm/kg]					
	Referenz- mischgut	Serie				
		1	2	3	4	5
		Asphaltgranulat- / Mineralstofftemperatur [°C]				
		130/150	130/165	130/180	130/200	130/230
AB 0/11S	190,8	---	---	---	---	---
AB 0/11S + 20% AG1	---	187,8	169,4	266,6	---	---
AB 0/11S + 20% AG2	---	227,2	180,8	255,5	---	---
AB 0/11S + 20% AG3	---	230,7	254,0	290,9	---	---
ABi 0/16	1016,0	---	---	---	---	---
ABi 0/16 + 20% AG1	---	1138,0	772,1	487,3	---	---
ABi 0/16 + 20% AG2	---	601,8	1318,6	1359,9	---	---
ABi 0/16 + 20% AG3	---	525,9	703,2	844,1	---	---
ATS 0/32C	717,1	---	---	---	---	---
ATS 0/32C + 25% AG1	---	544,7	330,1	594,9	446,3	---
ATS 0/32C + 40% AG1	---	517,8	2165,1	345,2	---	413,2
ATS 0/32C + 25% AG2	---	557,1	934,2	1197,6	1786,3	---
ATS 0/32C + 40% AG2	---	598,0	3014,8	545,2	---	3306,4
ATS 0/32C + 25% AG3	---	593,1	1433,9	561,9	610,3	---
ATS 0/32C + 40% AG3	---	1258,3	743,7	2026,9	---	597,4

Abb. 6-5: Spezifische Verdichtungsarbeiten bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3 (vergl. Anlagen 9)

Die Beurteilung des inneren Verdichtungsverhaltens der Asphaltvarianten konnte anhand der Verdichtungsarbeiten, die nötig waren, um den elastoviskosen Bereich zu durchlaufen, nur für die Asphaltbetone 0/11S vorgenommen werden (vergl. Abb. 6-4). Denn bei den Asphaltbindern 0/16 und den Asphalttragschichten 0/32C trat jeweils der viskoelastische Zustand während des Verdichtungsprozesses im Gyrator-Verdichter nicht mehr auf (vergl. Anlagen 7). Daher wurden die Verdichtungsarbeiten bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels zur Beurteilung des inneren Verdichtungsverhaltens bestimmt (vergl. Abb. 6-5).

6.3 Druckschwellversuche

In Druckschwellversuchen wurden die Axialdehnungsraten der Asphaltvarianten bei 50°C nach 4.500 Lastwechseln ermittelt (vergl. Abb. 6-6). Je größer die Axialdehnungsrate der unteren Hüllkurve ist, desto größer ist der viskose Dehnungszuwachs. Der Widerstand eines Asphalts gegen Spurrinnenbildung ist somit umso größer, je kleiner die Axialdehnungsrate ist.

Die Axialdehnungsraten der Asphaltbetonvarianten lagen in der Spanne von $1,07E-06$ [-/s] bis $2,27E-06$ [-/s]. In der Serie 1 wurden jeweils die größten Axialdehnungsraten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat gemessen, wobei sich mit Asphaltgranulat AG1 und signifikant mit AG2 die Axialdehnungsraten größer als bei der Referenzmischung ergaben. Die übrigen Axialdehnungsraten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat sind in den Serien 1 bis 3 jeweils kleiner bei der Referenzmischung.

Die Axialdehnungsraten der Asphaltbindervarianten 0/16 mit 20% Asphaltgranulat wurden signifikant geringer als die Axialdehnungsraten des Referenzmischguts und der Asphaltbetonvarianten 0/11S ermittelt.

Die Axialdehnungsraten der Asphalttragschichten 0/32C mit Asphaltgranulat waren ebenfalls signifikant kleiner als bei dem Referenzmischgut.

Asphaltvariante	Axialdehnungsrate [-/s]					
	Referenz- mischgut	Serie				
		1	2	3	4	5
		Asphaltgranulat- / Mineralstofftemperatur [°C]				
		130/150	130/165	130/180	130/200	130/230
AB 0/11S	1,75E-06	---	---	---	---	---
AB 0/11S + 20% AG1	---	1,90E-06	1,41E-06	1,37E-06	---	---
AB 0/11S + 20% AG2	---	2,27E-06	1,21E-06	1,17E-06	---	---
AB 0/11S + 20% AG3	---	1,41E-06	1,11E-06	1,07E-06	---	---
ABi 0/16	1,43E-06	---	---	---	---	---
ABi 0/16 + 20% AG1	---	1,15E-06	1,05E-06	7,74E-07	---	---
ABi 0/16 + 20% AG2	---	1,18E-06	9,94E-07	9,44E-07	---	---
ABi 0/16 + 20% AG3	---	1,11E-06	5,60E-07	6,75E-07	---	---
ATS 0/32C	9,74E-07	---	---	---	---	---
ATS 0/32C + 25% AG1	---	7,93E-07	6,42E-07	6,42E-07	4,96E-07	---
ATS 0/32C + 40% AG1	---	7,43E-07	8,47E-07	5,59E-07	---	6,37E-07
ATS 0/32C + 25% AG2	---	7,90E-07	6,84E-07	5,00E-07	5,01E-07	---
ATS 0/32C + 40% AG2	---	8,75E-07	6,18E-07	6,47E-07	---	3,83E-07
ATS 0/32C + 25% AG3	---	5,88E-07	4,65E-07	5,57E-07	4,33E-07	---
ATS 0/32C + 40% AG3	---	5,27E-07	4,57E-07	4,71E-07	---	4,22E-07

Abb. 6-6: Axialdehnungsraten der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 nach 4.500 Lastwechseln in den Serien 1 bis 5 im Druckschwellversuch

6.4 Spaltzugschwellversuche

Die Querdehnungsraten der Asphaltvarianten (vergl. Abb. 6-7) wurden im Wendepunkt ermittelt (vergl. Kap. 5.5.2.2) und jeweils über der Lastspielzahl in der Asymptote (Bruchzustand) aufgetragen (vergl. Kap. 7.3).

Asphaltvariante	Querdehnungsrate [-/s]					
	Referenz- mischgut	Serie				
		1	2	3	4	5
		Asphaltgranulat- / Mineralstofftemperatur [°C]				
		130/150	130/165	130/180	130/200	130/230
AB 0/11S	3,71E-06	---	---	---	---	---
AB 0/11S + 20% AG1	---	7,69E-06	1,02E-05	1,27E-05	---	---
AB 0/11S + 20% AG2	---	5,81E-06	1,90E-05	1,01E-05	---	---
AB 0/11S + 20% AG3	---	2,27E-05	9,29E-06	8,83E-06	---	---
ABi 0/16	6,38E-05	---	---	---	---	---
ABi 0/16 + 20% AG1	---	5,44E-05	1,84E-05	2,45E-05	---	---
ABi 0/16 + 20% AG2	---	6,07E-05	7,56E-06	3,65E-05	---	---
ABi 0/16 + 20% AG3	---	5,44E-05	3,23E-05	1,35E-05	---	---
ATS 0/32C	6,02E-05	---	---	---	---	---
ATS 0/32C + 25% AG1	---	2,81E-05	6,09E-05	2,24E-05	6,70E-06	---
ATS 0/32C + 40% AG1	---	1,81E-05	7,56E-05	8,83E-06	---	1,15E-05
ATS 0/32C + 25% AG2	---	1,82E-05	8,87E-06	4,70E-05	2,00E-05	---
ATS 0/32C + 40% AG2	---	6,33E-06	3,57E-05	5,40E-05	---	1,23E-05
ATS 0/32C + 25% AG3	---	1,08E-05	2,61E-05	1,17E-05	5,97E-06	---
ATS 0/32C + 40% AG3	---	2,87E-05	5,49E-05	7,23E-05	---	3,28E-05

Abb. 6-7: Spaltzugschwellversuch bei 20°C: Querdehnungsraten im Wendepunkt der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 5

Mit den Asphaltbetonvarianten aus der ersten Serie wurden Druckschwellversuche bei minus 5°C durchgeführt. Die gemessenen Querdehnungsraten waren sehr gering und lagen in einer engen Spanne von 8,02E-09 und 1,66E-08 [-/s] (vergl. Abb. 6-8).

Asphaltvariante	Querdehnungsrate [-/s]	
	Referenz- mischgut	Serie 1
		Asphaltgranulat- / Mineralstoff- temperatur [°C] 130/150
AB 0/11S	8,02E-09	---
AB 0/11S + 20% AG1	---	1,66E-08
AB 0/11S + 20% AG2	---	8,58E-08
AB 0/11S + 20% AG3	---	4,45E-08

Abb. 6-8: Spaltzugschwellversuch bei -5°C: Querdehnungsraten im Wendepunkt der Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 1

7. Interpretation der Versuchsergebnisse

7.1 Verdichtungsverhalten

7.1.1 Verdichtungswiderstand D

7.1.1.1 Verdichtungswiderstände D der Asphaltbetonvarianten 0/11S

Die höheren Verdichtungswiderstände der Asphaltbetonvarianten und des Referenzmischguts im Vergleich zu durchschnittlich zusammengesetztem Asphaltbeton 0/11 ließen sich auf die Summe der Einflüsse eines vergleichsweise niedrigeren Füllergehalts, eines höheren Brechsandanteils und eines höheren Splittgehalts zurückführen (vergl. Abb. 6-2 und 7-1).

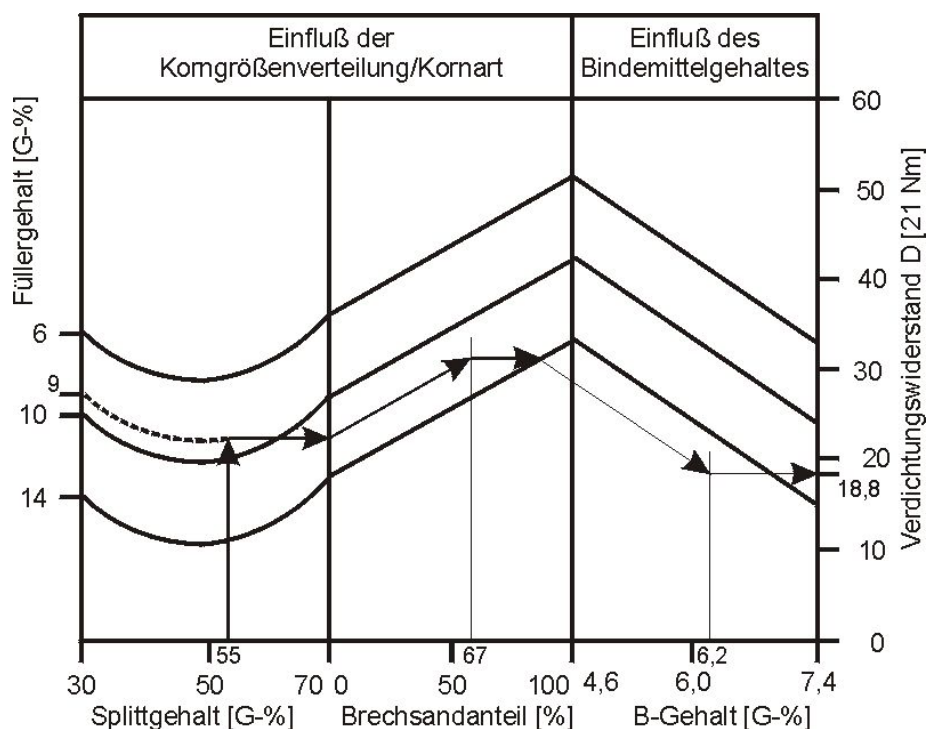


Abb. 7-1: Verdichtungswiderstand D von Asphaltbeton 0/11 in Abhängigkeit von Füllergehalt, Splittgehalt, Brechsandanteil und Bindemittelgehalt B nach dem Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, Theorie der Verdichtung, FGSV (1993), mit Werten des untersuchten AB 0/11S

Die Spannweite der ermittelten Verdichtungswiderstände der Asphaltbetonvarianten war gering (vergl. Abb. 7-2). Die Wiederverwendung wirkte sich somit nach dem Durchschnitt der Verdichtungswiderstände nicht auf die Verdichtungseigenschaften aus.

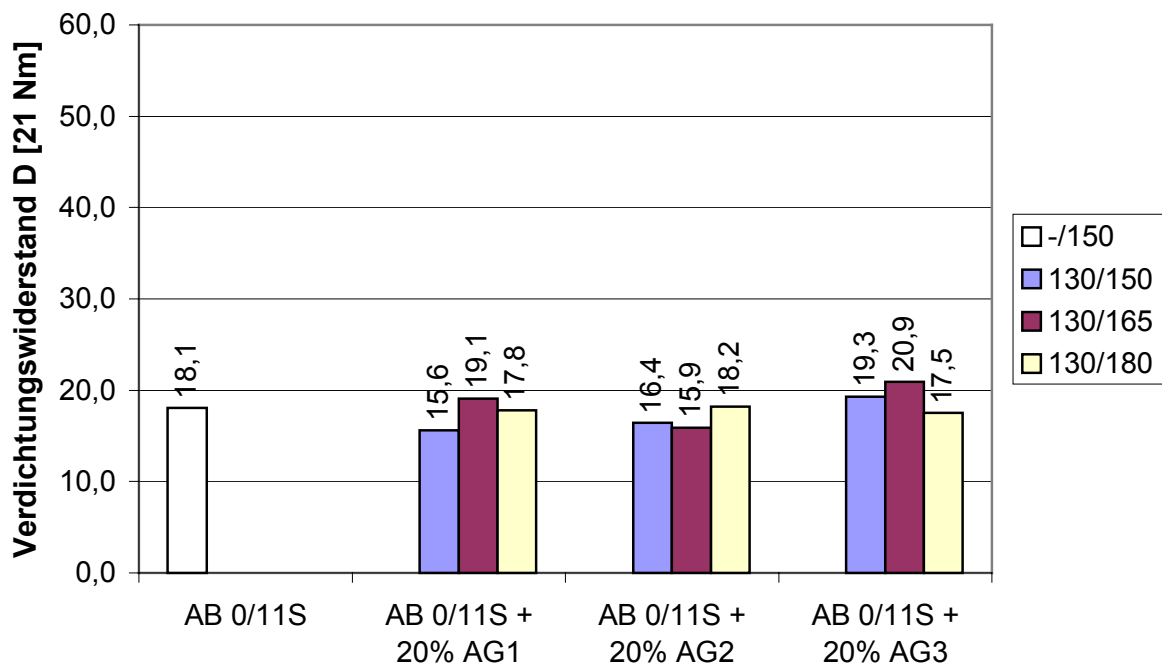


Abb. 7-2: Verdichtungswiderstände D der Asphaltbetonvarianten 0/11S unter Variation der Mineralstofftemperatur bei gleich bleibender Asphaltgranulattemperatur von 130°C

Die geringen Unterschiede der Verdichtungswiderstände erlaubten keine Aussage hinsichtlich höherer oder niedrigerer Verdichtungswiderstände aufgrund der zugesetzten unterschiedlichen Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3 und damit aufgrund der Gehalte an stabilisierenden Zusätzen oder an PmB in den Asphaltbetonen aus den Asphaltgranulaten. Im untersuchten Temperaturbereich von 150°C bis 180°C war kein einheitlicher Einfluss der Höhe der Mineralstofftemperatur auf die Verdichtbarkeit der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 festzustellen. Es wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Verdichtungswiderständen der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat und dem Verdichtungswiderstand der Referenzmischung festgestellt (vergl. Anlage 6.1). Der Mittelwert der Verdichtungswiderstände deutete, ohne statistische Signifikanz, auf eine tendenziell gleiche, allenfalls nur geringfügig leichtere Verdichtbarkeit der Asphaltbetone 0/11S mit Asphaltgranulat im Vergleich zu einem Asphaltbeton 0/11S ohne Asphaltgranulat hin. Damit wurden die Ergebnisse der meisten bisherigen Untersuchungen bestätigt, denn bis auf KANDHAL et al. (1995), die durch die Wiederverwendung leichtere Verdichtbarkeit feststellten, ergaben die Untersuchungen von GRAGGER (1982), BLUMER (1985) und ARAND (1996) keine Auswirkungen der Wiederverwendung auf die Verdichtungseigenschaften.

Asphaltbeton 0/11S mit AG1

Die Mineralstofftemperatur von 165°C war bei einer Kaltzugabe des Füllers in der Serie 2 gegenüber einer Mineralstofftemperatur von 150°C und Heißzugabe des Füllers (150°C) in der Serie 1 nicht ausreichend, um eine offenbar schlechtere Vermischung des neuen und des Asphaltgranulatbitumens bzw. Doppelumhüllungen in der Serie 2 zu vermeiden. Doppelumhüllungen führen zu einem überwiegend dünneren Bitumen- bzw. Mörtelfilm im Mischgut. Der Effekt ist, wie bei einer Reduzierung des Bindemittelgehalts und bei sonst gleich bleibender Zusammensetzung, eine Erhöhung des Verdichtungswiderstandes. Die Abnahme des Verdichtungswiderstandes in der Serie 3 gegenüber der Serie 2 wurde deshalb dahin gehend gedeutet, dass aufgrund einer höheren Mineralstofftemperatur von 180°C eine bessere Mischung des neuen Bitumens mit dem Asphaltgranulatbitumen bei ebenfalls kaltem Füller in der Serie 3 stattgefunden hatte.

Die Unterschiede der Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone mit AG1 in den Serien 1 bis 3 waren statistisch aber nicht signifikant.

Nach ARAND und RENKEN (1992) ergab die Erhöhung des Faseranteils im Mischgut eines Splittmastixasphalts 0/11 von 0,2 auf 0,6 Gew.-% eine Verringerung des Verdichtungswiderstandes von 39,6 [21 Nm] auf 35,5 [21 Nm] um 4,1 Einheiten, das entspricht einer Abnahme um 1,025 Einheiten bei einer Erhöhung des Fasergehalts um 0,1 Gew.-%. Überträgt man diese Ergebnisse auf die untersuchten Varianten des Asphaltbetons 0/11S, so müsste sich ein Faseranteil von 0,05 Gew.-% in Form einer Reduzierung des Verdichtungswiderstandes um nur rund 0,5 Einheiten auswirken. Daraus konnte zwar der Schluss gezogen werden, dass der Cellulosefasergehalt von 0,05 Gew.-% im Asphaltbeton 0/11S einen Beitrag zu dem im Vergleich zur Referenzmischung durchschnittlich um 0,6 Einheiten geringeren Verdichtungswiderstand von 17,5 [21 Nm] lieferte, aber eine statistische Absicherung lag hierfür nicht vor.

Asphaltbeton 0/11S mit AG2

Der Kieselsäuregehalt in den Asphaltbetonvarianten mit AG2 betrug nur rund 0,08 Gew.-%. Der Mittelwert der Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone 0/11S mit AG2 berechnete sich zu 16,8 [21 Nm]. Der mögliche Beitrag des Kieselsäuregehaltes zu den im Mittel um 1,3 Einheiten geringeren Verdichtungswiderständen im Vergleich zur Referenzmischung konnte nicht quantifiziert werden, denn die Differenzen zwischen den Verdichtungswiderständen waren auch hierbei nicht statistisch signifikant. Das Bitumen der Referenzmischungen hatte eine geringere Härte als die aus den Asphaltbetonvarianten rückgewonnenen Bitumen. Da aber ein Einfluss der Bindemittelhärte auf den Verdichtungswiderstand nach ARAND und RENKEN (1992) bei einer Verdichtungstemperatur von 135°C nicht nachweisbar war, ließ sich aus den Ergebnissen tendenziell eine Bestätigung der Untersuchungsergebnisse von PAULMANN et al. (1983) ab-

leiten, dass ein Einfluss der Kieselsäure aus dem Asphaltgranulat bestand. Denn die von PAULMANN et al. an Asphaltbeton 0/11 mit 0,6 Gew.-% synthetischer Kieselsäure (SIPERNAT 22) und an Asphaltbeton 0/11 ohne Kieselsäure durchgeführten Verdichtungsversuche ergaben, dass Mischgut mit Kieselsäure leichter verdichtbar war.

Asphaltbeton 0/11S mit AG3

Die Reihung der Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone mit AG3 entsprach der Reihung der Asphaltbetone mit AG1. Die Differenzen zwischen den Verdichtungswiderständen der Asphaltbetone mit AG3 konnten, wie die Differenzen der Verdichtungswiderständen der Asphaltbetone mit AG1, darauf zurück geführt werden, dass Doppelumhüllungen durch die Variationen der Mineralstoff- und Füllertemperatur in den Serien 1 bis 3 (s.o.) entstanden. Die Differenzen der Verdichtungswiderstände in den Serien 1 bis 3 waren allerdings auf dem verwendeten Niveau statistisch nicht signifikant (vergl. Anlage 6.1).

Asphaltart und -sorte	Asphaltgranulatgehalt Gew.-%*	Bindemittelanteil (ca.)					
		Neues Bitumen	aus AG1	Neues Bitumen	aus AG2	Neues Bitumen	aus AG3
		%	%	%	%	%	%
AB 0/11S	20	80,7	19,3	78,5	21,5	76,7	23,3
ABi 0/16	20	73,5	26,5	70,6	29,4	68,0	32,0
ATS 0/32C	25	59,5	40,5	57,9	45,1	51,0	49,0
ATS 0/32C	40	34,5	65,5	27,1	72,9	20,6	79,4

Abb. 7-3: Bindemittelanteile des neuen Bitumens und der Bindemittel aus den Asphaltgranulaten infolge der Asphaltgranulatgehalte an den Mischgütern
(* bezogen auf die neuen Mineralstoffe)

Der Mittelwert der Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone 0/11S mit AG3 betrug 19,2 [21Nm]. Damit ließen sich diese Mischungen unter den Asphaltbetonvarianten im Durchschnitt am schwersten verdichten. Die teils statistisch signifikanten Unterschiede der Verdichtungswiderstände der Asphaltbetone mit AG1 und AG2 zu denen der Asphaltbetone mit AG3 (vergl. Anlage 6.1) deuten auf einen Zusammenhang mit den Anteilen des neuen Bitumens und des Asphaltgranulatbitumens im Mischgut sowie mit der Härte des Asphaltgranulatbitumens hin. Denn das Asphaltgranulatbitumen erreichte in den Mischungen mit AG3 den höchsten Anteil am Gesamtbindemittel von den Mischgütern mit Asphaltgranulat (vergl. Abb. 7-3), und das Bitumen aus dem AG3 weist unter den Asphaltgranulatbitumen die größte Härte nach dem Erweichungspunkt Ring und Kugel auf (vergl. Abb. 5-5). Die Härte des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat AG3 könnte die Verdichtbarkeit dadurch beeinflusst haben, dass durch die höhere Viskosität des

PmB mehr Doppelumhüllungen entstanden waren. Dies steht somit nicht im Widerspruch zu den Untersuchungen von ARAND und RENKEN (1992), nach denen bei konventionellem Mischgut kein Einfluss der Bindemittelsorte auf den Verdichtungswiderstand bei einer Verdichtungstemperatur von 135°C im Laboratorium nachgewiesen werden konnte.

7.1.1.2 Verdichtungswiderstände D der Asphaltbindervarianten 0/16

Die Zusammensetzung der Asphaltbindervarianten 0/16 entsprach im Bindemittel- und Füllergehalt der Zusammensetzung eines durchschnittlich zusammengesetzten Asphaltbinders 0/16 (vergl. Abb. 5-9 und 6-2).

Mittels eines Nomogramms für die Ermittlung des Verdichtungswiderstandes D eines Asphaltbinders 0/16 im Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2: Theorie der Verdichtung, FGSV (1993), ergibt sich für die Zusammensetzung des Referenzmischguts ein Verdichtungswiderstand von rund 44 [21 Nm] (vergl. Abb. 7-4).

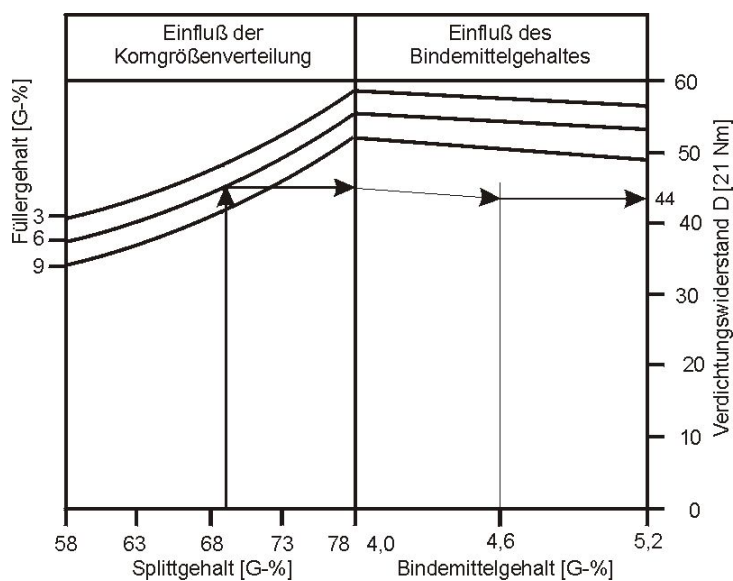


Abb. 7-4: Verdichtungswiderstand D der Asphaltbinder 0/16 in Abhängigkeit von Füllergehalt, Splittgehalt und Bindemittelgehalt (Bestimmtheitsmaß B = 88,9) nach dem Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, Theorie der Verdichtung, FGSV (1993)

Die Wiederverwendung der Asphaltgranulate bewirkte bei den Asphaltbindervarianten 0/16 mit den Asphaltgranulaten AG1, AG2 und AG3 im Vergleich zu Asphaltbinder 0/16 ohne Asphaltgranulat bei sonst gleicher Zusammensetzung tendenziell eine Verringerung der Verdichtungswiderstände. Aber nur für den Asphaltbinder mit AG3 wurde in der Serie 1 eine statistisch signifi-

fikante Differenz von -15,4 [21 Nm] zum Referenzmischgut festgestellt (vergl. Abb. 7-5, Anlage 6.2).

Die Mineralstofftemperaturen von 150°C bis 180°C in den Serien 1 bis 3 führten bei den Asphaltbindern 0/16 mit den Asphaltgranulaten AG1, AG2 und AG3 zu unterschiedlichen Auswirkungen auf die Verdichtbarkeit.

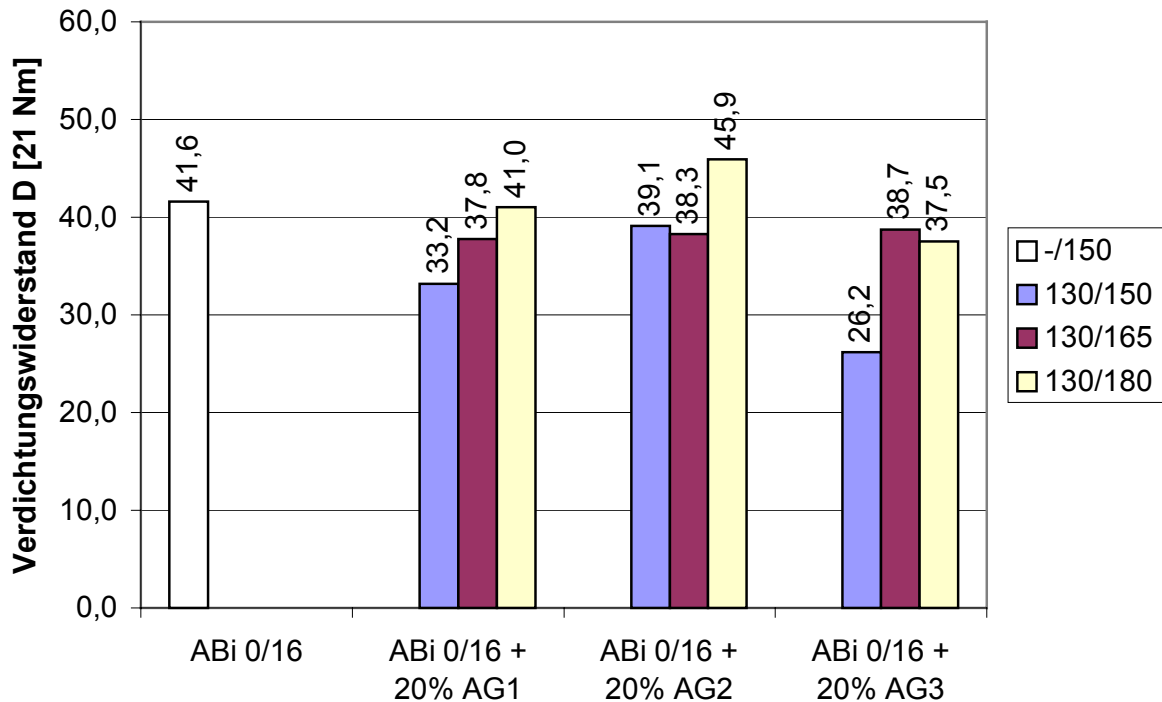


Abb. 7-5: Verdichtungswiderstände D der Asphaltbindervarianten 0/16 bei Variation der Mineralstofftemperatur bei gleich bleibender Asphaltgranulattemperatur von 130°C

Asphaltbinder 0/16 mit AG1

Die Auswirkungen von Faseranteilen auf das Verdichtungsverhalten von Asphaltbindern wurden bisher noch nicht untersucht. Ein geringer Beitrag der Faserstoffe zu dem im Mittel um 4,3 Einheiten kleineren Verdichtungswiderstand der Asphaltbinder mit AG1 im Vergleich zum Referenzmischgut konnte daher unter Bezug auf Untersuchungsergebnisse von ARAND und RENKEN (1992) zu Splittmastixasphalt mit Faseranteilen angenommen werden.

Asphaltbinder 0/16 mit AG2

Die im Asphaltbinder vorhandene Menge von 0,08 Gew.-% Kieselsäure aus dem Fräsasphalt führte, analog zu den Ergebnissen der Asphaltbetonvarianten, zu keinen wesentlichen Auswirkungen auf die Verdichtungswiderstände der Asphaltbinder 0/16, denn die Differenzen zu

dem Verdichtungswiderstand der Referenzmischung waren in den Serien 2 und 3 statistisch nicht signifikant (vergl. Anlage 6.2). Folglich konnten keine Auswirkungen der Kieselsäure auf die Verdichtungswiderstände der Asphaltbinder festgestellt werden.

Asphaltbinder 0/16 mit AG3

Die Ursache für den deutlich geringeren Verdichtungswiderstand in der Serie 1 gegenüber denen der Serien 2 und 3 wurde, analog zu den Varianten der Asphaltbetone mit AG1 und AG3, in unterschiedlichen Mischzuständen der Asphaltgranulatbindemittel und dem neuen Bitumen bzw. in Doppelumhüllungen gesehen, infolge unterschiedlicher Mineralstoff- und Füllertemperaturen in den Serien. Aufgrund der Größe der Differenzen waren andere im Rahmen dieser Arbeit nicht analysierbare Einflüsse aber nicht auszuschließen, wobei Einflüsse der Proben aufgrund der gemeinsamen Probenherstellung und der Probenteilung weitestgehend ausgeschlossen werden konnten (vergl. Kap. 5.4.7). Die Größe der Verdichtungswiderstände ließ sich nicht auf Auswirkungen des PmB im Asphaltgranulat AG3 zurückführen.

7.1.1.3 Vergleichende Analyse der Verdichtungswiderstände D von Asphaltbeton 0/11S und Asphaltbinder 0/16

Der Asphaltbinder 0/16 mit AG1 zeigte in den Serien 1 und 2 mit der Erhöhung der Mineralstofftemperatur von 150°C auf 165°C einen Anstieg des Verdichtungswiderstandes um 4,6 Einheiten. Auch bei dem Asphaltbeton 0/11S mit AG1 wurde in der Temperaturstufe von Serie 1 zu 2 ein Anstieg des Verdichtungswiderstandes von 3,5 Einheiten ermittelt (vergl. Abb. 7-2 und 7-5).

Aus der Erhöhung der Mineralstofftemperaturen von 150°C auf 165°C ergab sich bei dem Asphaltbinder 0/16 mit AG2 keine wesentliche Änderung der ermittelten Verdichtungswiderstände. Eine weitere Erhöhung der Mineralstofftemperatur um 15°C auf 180°C führte aber zu einem deutlichen Anstieg des Verdichtungswiderstandes von 38,3 [21 Nm] auf 45,9 [21 Nm]. Der Asphaltbinder 0/16 mit AG2 ließ sich also durch Erhöhung der Mineralstofftemperaturen von 165°C auf 180°C deutlich schwerer verdichten. Hierbei bestand wiederum nahezu eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Asphaltbetons 0/11S mit AG2.

Auch für den Asphaltbinder 0/16 mit AG3 wurden in der Mineralstofftemperaturstufe von 150°C auf 165°C ähnliche Auswirkungen auf den Verdichtungswiderstand wie bei dem Asphaltbeton 0/11S mit AG3 festgestellt. Der bei einer Mineralstofftemperatur von 150°C signifikant unter dem der Referenzmischung liegende Verdichtungswiderstand von 26,2 [21 Nm] des Asphaltbinders 0/16 mit AG3 stieg bei einer Mineralstofftemperatur von 165°C auf 38,7 [21 Nm] an. Tendenziell zeigte der Asphaltbeton 0/11S mit AG3 gleiches Stoffverhalten mit geringeren absoluten

Differenzen in den Serien 1 und 2, wobei die Verdichtungswiderstände jeweils über dem Verdichtungswiderstand der Referenzmischung lagen.

Die ermittelten Veränderungen der Verdichtungswiderstände infolge der stufenweisen Erhöhung der Mineralstofftemperatur konnten aufgrund der ansonsten innerhalb der Mischgutart weitgehend identischen Zusammensetzung der Asphaltbinder 0/16 bzw. der Asphaltbetone 0/11S mit Asphaltgranulat den Auswirkungen der unterschiedlichen Härten der Asphaltgranulatbindemittel und daraus entstandenen unterschiedlich ausgeprägten Doppelumhüllungen zugeschrieben werden. Die Einflüsse der unterschiedlichen Asphaltgranulatkomponenten auf das Verdichtungsverhalten waren anhand der Verdichtungswiderstände der Asphalte nicht quantifizierbar.

Die zwischen den Temperaturstufen der Mineralstoffe ermittelten Differenzen der Verdichtungswiderstände waren bei den Asphaltbindern 0/16 jeweils absolut größer als bei den Asphaltbetonen 0/11S. Bei gleichem Asphaltgranulatanteil von 20% beträgt der Bindemittelgehalt in den Asphaltbindern 0/16 jeweils 4,6 Gew.-% und in den Asphaltbetonen 0/11S jeweils 6,2 Gew.-%. Daraus ergeben sich wiederum jeweils unterschiedliche Bindemittelanteile des zusätzlichen bzw. neuen Bitumens und des Asphaltgranulatbindemittels in den Asphaltmischgütern. Der zum Asphaltbeton 0/11 vergleichsweise geringere Bindemittelgehalt im Asphaltbinder 0/16 hatte einen jeweils höheren Anteil an Asphaltgranulatbindemittel zur Folge (vergl. Abb. 7-3). Die o.g. größeren Veränderungen der Verdichtungswiderstände bei den Asphaltbindern 0/16 gegenüber denen der Asphaltbetone 0/11S in den Serien 1 bis 3 standen folglich im Zusammenhang mit den größeren Bindemittelanteilen aus den Asphaltgranulaten im Asphaltbinder 0/16. Die Doppelumhüllungen hatten somit eine größere Auswirkung, weil der Anteil der neuen Mineralstoffe im Asphaltbinder mit weniger neuem Bindemittel umhüllt war.

7.1.1.4 Verdichtungswiderstände D der Asphalttragschichtvarianten 0/32C

Im Mittel war keine statistisch signifikante Änderung der Verdichtbarkeit der Asphalttragschicht 0/32C durch die Zugaben der Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3 bis zu Anteilen von 40% festzustellen (vergl. Abb. 7-6, Anlage 6.3). Betrachtet man die Verdichtungswiderstände der Asphalttragschichten mit 25% und 40% Asphaltgranulat getrennt voneinander, so ergaben sich die Mittelwerte für die Asphalttragschichten mit 25% zu 39,8 [21 Nm] und für die Asphalttragschichten mit 40% Asphaltgranulat zu 38,5 [21 Nm]. Die Zugaben von 25% Asphaltgranulat bewirkten danach im Mittel keine Änderung der Verdichtbarkeit gegenüber der Referenzmischung. Auch ein um 15% höherer Asphaltgranulatanteil von 40% führte im Vergleich zu der Referenzmischung nur zu einem unwesentlich kleineren mittleren Verdichtungswiderstand.

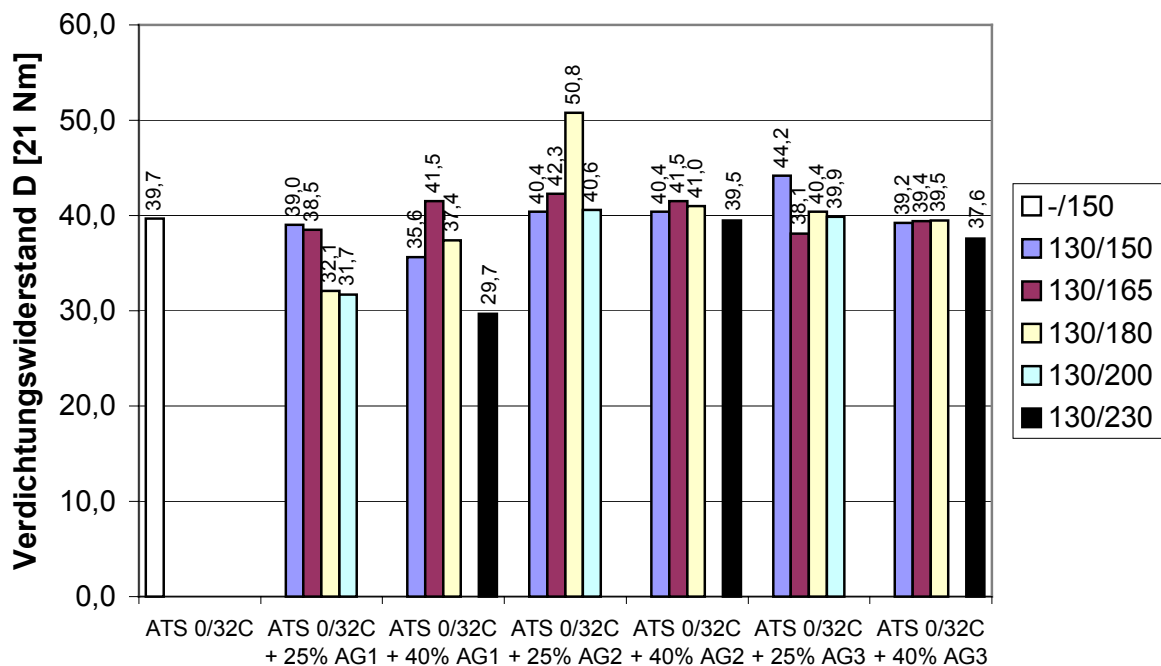


Abb. 7-6: Verdichtungswiderstände D der Asphalttragschichtenvarianten 0/32C unter Variation der Mineralstofftemperatur bei gleich bleibender Asphaltgranulattemperatur von 130°C

Die Reihung der Verdichtungswiderstände der Asphalttragschichten mit 40% AG2 gleicht denen der Asphaltbetone 0/11S und Asphaltbinder 0/16 jeweils mit 20% AG1. Demnach traten offenbar auch bei den Tragschichtmischungen Doppelumhüllungen auf infolge der Mineralstoff- und Füllertemperatur in den Serien 2 und 3.

Mit den für die getrennte Erwärmung hohen Mineralstofftemperaturen von 200°C (Serie 4) und 230°C (Serie 5) wurden zwar durchweg Abnahmen der Verdichtungswiderstände relativ zu den Werten der Serie 3 mit 180°C festgestellt, aber die Differenzen waren überwiegend gering und statistisch nicht signifikant. Bedeutsame Auswirkungen der Zusätze aus den Asphaltgranulatanteilen in den Tragschichten auf die Verdichtungswiderstände wurden nicht festgestellt.

7.1.1.5 Zusammenhänge zwischen den Bindemittelanteilen aus Asphaltgranulat und neuem Bitumen und dem Verdichtungswiderstand D

Aus der Höhe des Gesamtbindemittelgehalts, des Bindemittelgehalts im Asphaltgranulat und aus der Zugabemenge des Asphaltgranulats resultieren die Anteile des Asphaltgranulatbindemittels und neuen Bitumens im Mischgut. Schon die Asphalttragschichten mit 25% Asphalt-

granulat hatten gegenüber den Asphaltbindern 0/16 mit 20% Asphaltgranulat unter Verwendung von AG1 einen um 14%, mit AG2 einen um 15,7 % und mit AG3 einen um 17% höheren relativen Anteil von Asphaltgranulatbindemittel am Gesamtbindemittelgehalt (vergl. Abb. 7-3). Diese Anteilsverteilung entstand durch die hohen Bindemittelgehalte der verwendeten Fräsasphalte aus Deckschichten gegenüber dem Bindemittelgehalt der Asphalttragschicht. Die Verwendung einer Asphaltgranulatmischung aus z.B. Fräsgut einer Deck-, Binder- und Tragschicht würde zu einem geringeren mittleren Bindemittelgehalt im Asphaltgranulat führen.

Bei Anteilen von 40% Fräsasphalt aus den Deckschichten überwogen daher schon die Anteile des Asphaltgranulatbindemittels am Gesamtbindemittelgehalt im Asphalttragschichtmischgut. Die Anteile des Asphaltgranulatbindemittels am Gesamtbindemittelgehalt betragen bei der Verwendung von AG1 65,5%, bei AG2 72,9% und bei AG3 schon 79,4% (vergl. Abb. 7-3).

Die höheren Verdichtungswiderstände im Vergleich zur Referenzmischung wurden vermutlich durch größtenteils dünnere Mörtelfilme aufgrund unvollständiger Vermischungen des neuen Bitumens und des Asphaltgranulatbindemittels verursacht. Das neue Bindemittel umhüllt theoretisch alle Mineralstoffe und auch Asphaltgranulatstücke, deren Bindemittelanteile nicht aufgeschmolzen sind. Eine Doppelumhüllung von Asphaltgranulatmineralstoffen würde zu einem dünneren Mörtelfilm um die neuen Mineralstoffe führen, wodurch ein höherer Verdichtungswiderstand entstehen würde, wie er bei einer Reduzierung des Bindemittelgehaltes bei sonst gleich bleibender Zusammensetzung entsteht.

Eine vorliegende Doppelumhüllung wurde als eine Ursache für den Anstieg der Verdichtungswiderstände D der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat gegenüber der jeweiligen Referenzmischung bestätigt, da die Erhöhung der Mineralstofftemperaturen um 20°C bzw. 50°C bei den Tragschichten mit 40% Asphaltgranulat jeweils eine Abnahme des Verdichtungswiderstandes zur Folge hatte. Offensichtlich bewirkte das vollständigere Aufschmelzen des Asphaltgranulatbindemittels infolge höherer Mineralstofftemperaturen eine leichtere Verdichtbarkeit der Asphalttragschicht 0/32C durch sowohl eine homogenere Vermischung des Asphaltgranulatbindemittels mit dem neuen Bitumen als auch infolgedessen durch einen größtenteils dickeren Mörtelfilm um die Mineralstoffe.

7.1.2 Verdichtungsarbeit

Die berechneten spezifischen Verdichtungsarbeiten für das Durchlaufen des viskoelastischen Bereiches der Asphaltbetonvarianten (Abb. 5-18, Anlagen 8) ließen deutlich gleichgerichtete Auswirkungen der ansteigenden Mineralstofftemperaturen bei der Asphaltproduktion erkennen (vergl. Abb. 7-7). Höhere Mineralstofftemperaturen führten zu größeren Verdichtungsarbeiten bei allen Asphaltbetonvarianten. Die geringeren Verdichtungsarbeiten für die Asphaltbetone mit

AG1 gegenüber den übrigen Varianten sind nach PAULMANN und MOTZ (1985) kennzeichnend für ein leichter verdichtbares Mischgut. Da die Korngrößenverteilungen der Asphaltbetonvarianten weitestgehend übereinstimmten, wurde von einer gleich großen Leistungsfähigkeit der Korngerüste ausgegangen. Die Bindemittleigenschaften und die unterschiedlichen Zusätze bzw. das PmB aus den Asphaltgranulatanteilen waren demzufolge maßgebend ursächlich für die festgestellten Differenzen zwischen den inneren Verdichtungsverhalten der Asphaltbetonvarianten.

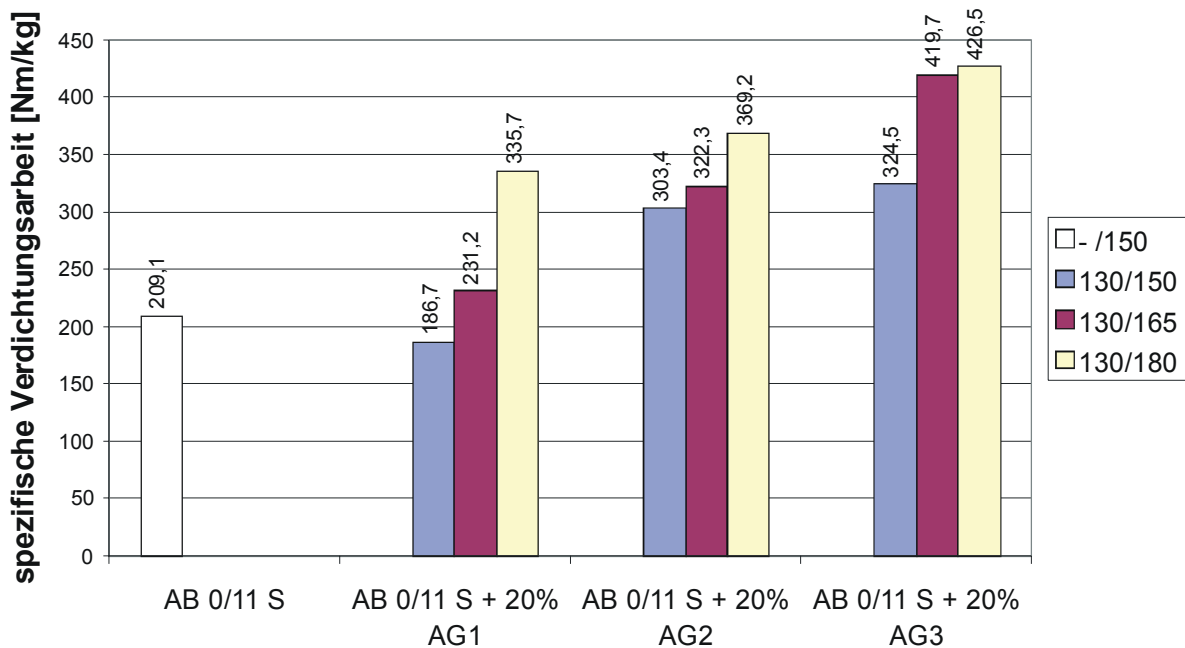


Abb. 7-7: Spezifische Verdichtungsarbeiten für das Durchlaufen des viskoelastischen Bereiches der Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3

Die Verdichtungsarbeiten stiegen mit zunehmendem Anteil von Asphaltgranulatbitumen (vergl. Abb. 7-3) und zunehmender Härte des Asphaltgranulatbitumens nach dem Erweichungspunkt Ring und Kugel an, obwohl die Härten der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltbetonvarianten nur geringe Differenzen zeigten (vergl. Abb. 7-8, 7-9).

Asphaltgranulat	Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52 011 in °C			
	rückgewonnenes Bindemittel aus			
	Asphaltbetonvarianten			Asphaltgranulat
	Serie 1 130/150°C	Serie 2 130/165°C	Serie 3 130/180°C	
AG1	50,0	54,0	55,5	58,0
AG2	51,0	55,0	55,5	61,0
AG3	51,5	56,0	55,0	63,5

Abb. 7-8: Erweichungspunkte Ring und Kugel nach DIN 52 011 der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltbetonvarianten in den Serien 1 bis 3 und aus den Asphaltgranulaten

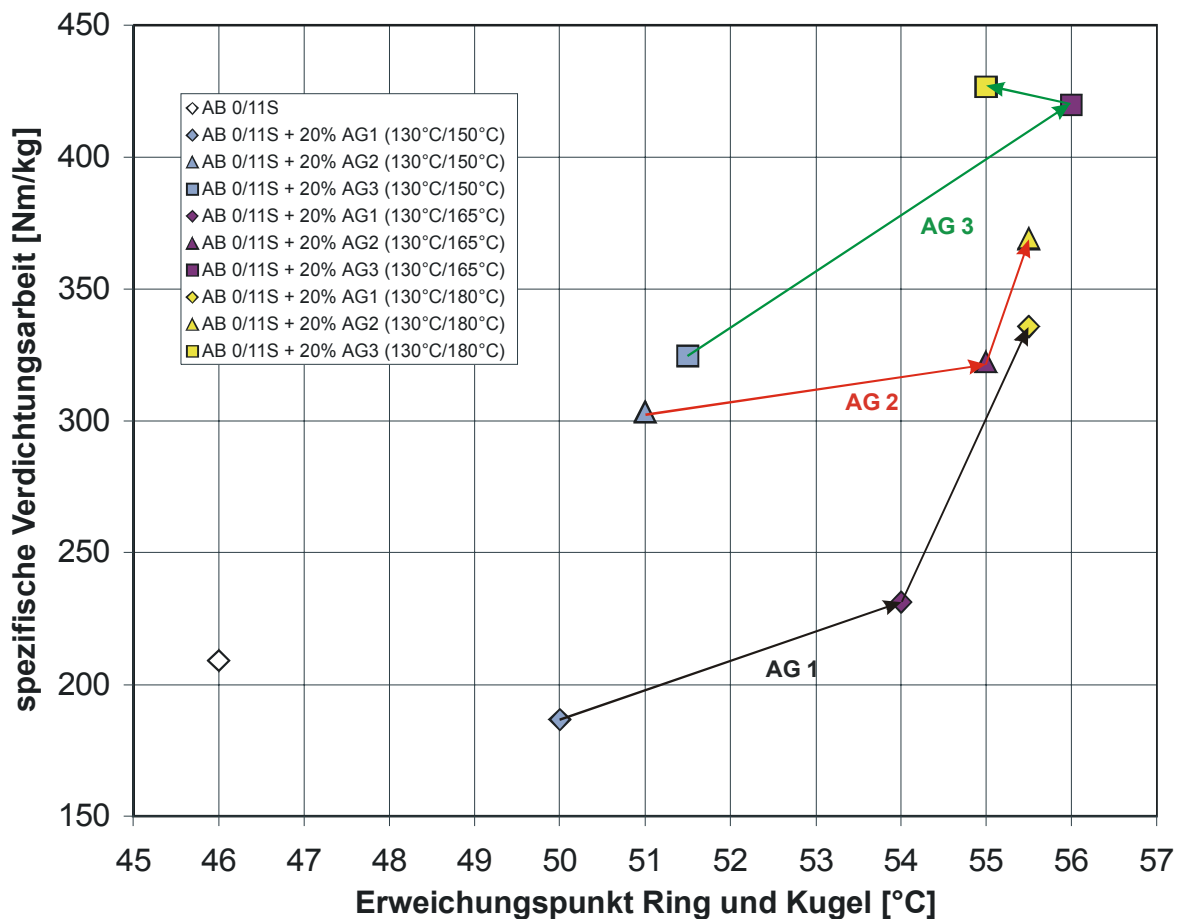


Abb. 7-9: Zusammenhang zwischen der spezifischen Verdichtungsarbeit für das Durchlaufen des viskoelastischen Bereiches und dem Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels aus den Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3

Als Ursache der ansteigenden Verdichtungsarbeiten wurde die Doppelumhüllung bestätigt, deren Auswirkungen in Form ansteigender Verdichtungsarbeiten mit ansteigender Härte der Asphaltgranulatbitumen zunahmen.

Die Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB auf das innere Verdichtungsverhalten der Asphaltbetone wurden somit von Einflüssen der Doppelumhüllung überlagert.

Die Nachlaufwinkel der Asphaltbinder- und der Asphalttragschichtvarianten wurden unter der 45-Grad-Grenze ermittelt (vergl. Anlagen 7). Die Mischgüter behielten somit nach PAULMANN und MOTZ (1985) während des Verdichtungsprozesses im Gyrator-Verdichter den elastoviskosen Zustand bei. Daher wurde für alle Asphaltvarianten jeweils die Arbeit zur Ansprache des inneren Verdichtungsverhaltens berechnet, die vom Anfang des Verdichtungsprozesses bis zum Minimum des Nachlaufwinkels bzw. bis zum maximalen Widerstand des Korngerüsts aufzuwenden war (vergl. Anlagen 9).

Aufgrund der weitgehend identischen Korngrößenverteilungen wurde davon ausgegangen, dass die Ursachen unterschiedlicher Verdichtungsarbeiten in Einflüssen unterschiedlicher Produktionsprozesse auf die Bindemittel und in unterschiedlichen Mischzuständen des neuen Bitumens und des Asphaltgranulatbitumens sowie in verschiedenen stofflichen Bestandteilen, in diesem Fall den Anteilen an stabilisierenden Zusätzen und dem PmB, zu sehen waren. Bei den Asphaltbetonen mit AG1 und AG2 bewirkte eine geringere Füllertemperatur in der Serie 2 im Vergleich zur Serie 1 entgegen den Erwartungen, trotz härteren Bindemittels aufgrund höherer Mineralstofftemperatur, geringere Arbeiten in der Serie 2 (vergl. Abb. 7-10).

Die Differenzen der Verdichtungsarbeiten bis zum Minimum des Nachlaufwinkels waren bei den Asphaltbetonen und den Asphaltbindern geringer als die Differenzen der Verdichtungsarbeiten für das Durchlaufen des elastoviskosen Zustandsbereiches (vergl. Abb. 7-7, 7-10). Folglich erhöhten sich erwartungsgemäß die Auswirkungen der Bindemittel bzw. der Zusätze auf die Verdichtungsarbeiten im viskoelastischen Zustand. Die gleichen Reihungen der Verdichtungsarbeiten für die Asphaltbetone und Asphaltbinder mit AG3 in den Serien 1 bis 3 ließen erkennen, dass durch den PmB-Anteil der Bindemittelinfluss auf die Verdichtungsarbeiten gegenüber den Einflüssen der Mineralstoffe und deren Zugabeverfahren dominierte (vergl. Abb. 7-7, 7-10, 7-11).

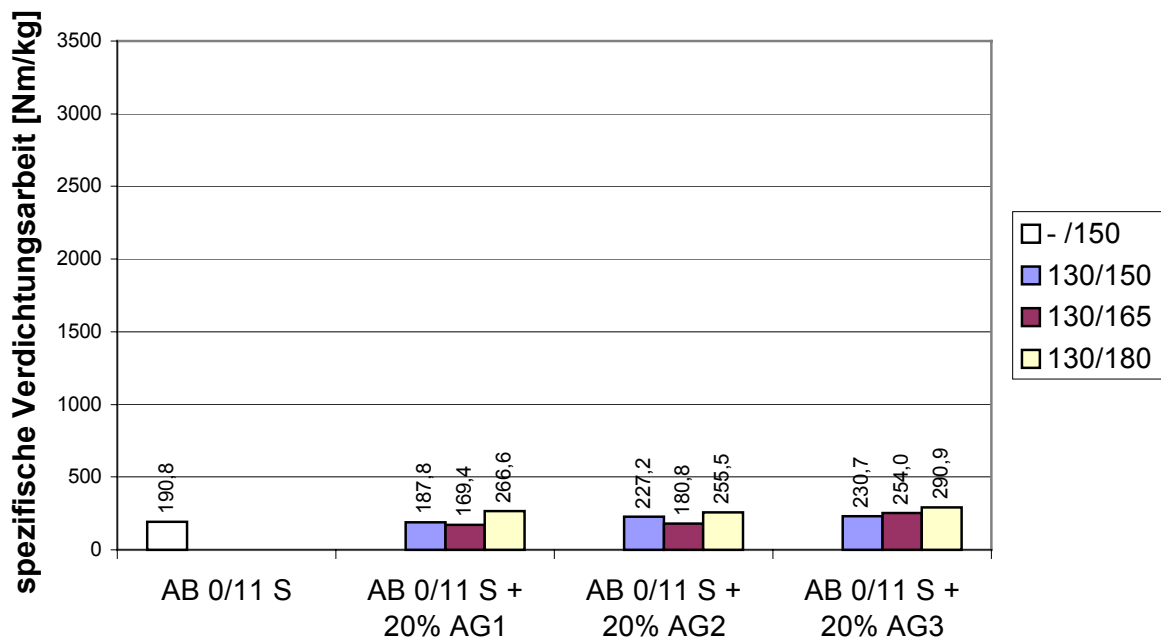


Abb. 7-10: Spezifische Verdichtungsarbeit bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels Φ für die Asphaltbetonvarianten 0/11S mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3

Eine nähere Analyse der inneren Verdichtungsprozesse hinsichtlich der Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze und des PmB war anhand der berechneten Verdichtungsarbeiten für die Asphaltbinder und die Asphalttragschichten durch die stark schwankenden Ergebnisse in den Serien 1 bis 4 bzw. 5 nicht sinnvoll (vergl. Abb. 7-11, 7-12). Die sensibleren, aber nicht an einzelnen Ursachen festzumachenden Reaktionen der Asphaltbinder und der Asphalttragschichten hinsichtlich sich ändernder innerer Verdichtungsprozesse spiegelten sich aber auch in den größeren Spannweiten der Verdichtungswiderstände D gegenüber denen der Asphaltbetone wider.

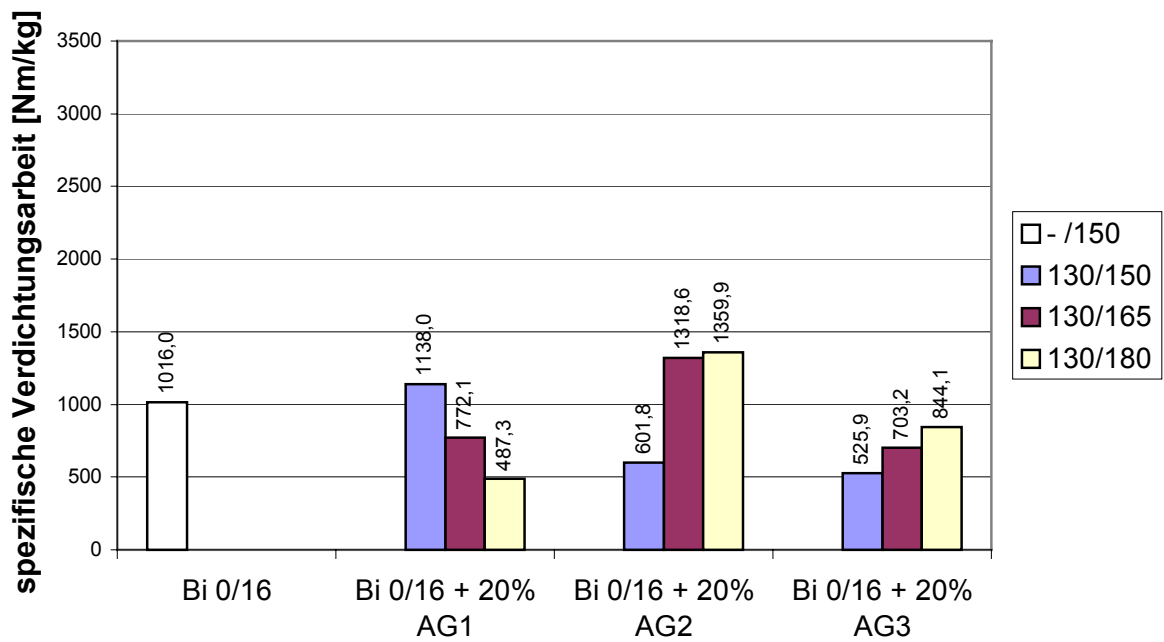


Abb. 7-11: Verdichtungsarbeit bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels Φ für die Asphaltbindervarianten 0/16 mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3

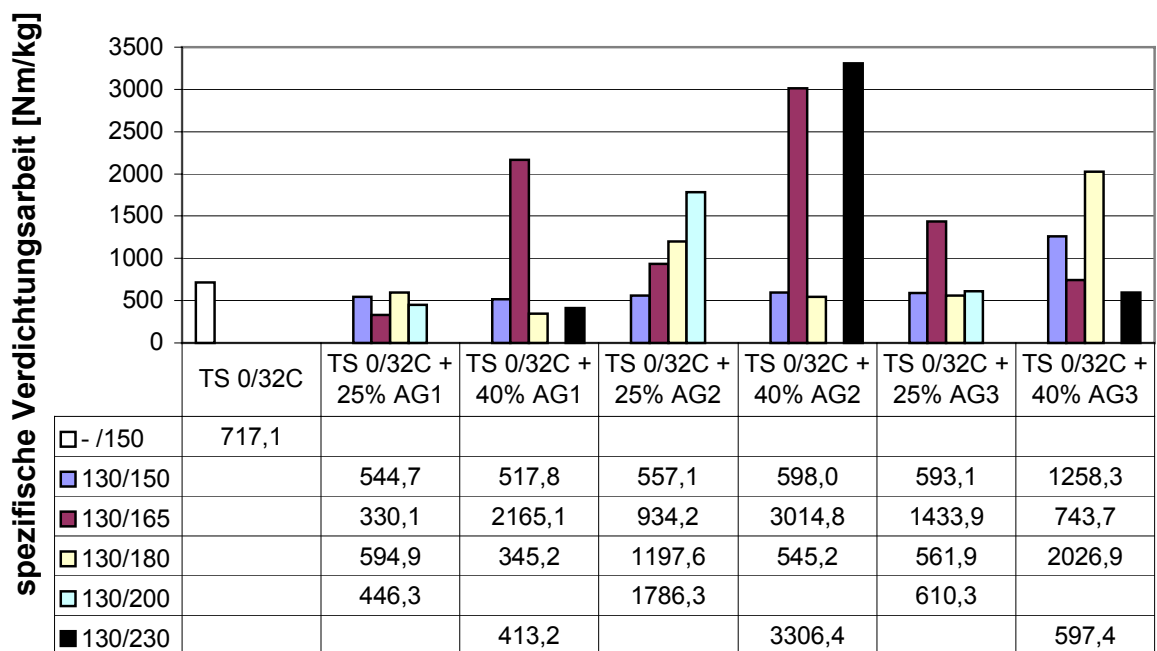


Abb. 7-12: Verdichtungsarbeit bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels Φ für die Asphalttragschichtvarianten 0/32C mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 5

7.2 Verformungsverhalten

Asphaltbetonvarianten

Die überwiegend statistisch signifikant geringeren Axialdehnungsraten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat gegenüber der Referenzmischung kennzeichneten tendenziell besseres Verformungsverhalten (vergl. Abb. 7-13), wie es nach den Forschungsergebnissen von GERARDU und VIZI (1982), HADIPOUR und ANDERSON (1988) sowie von LEYKAUF (1988) zu erwarten war.

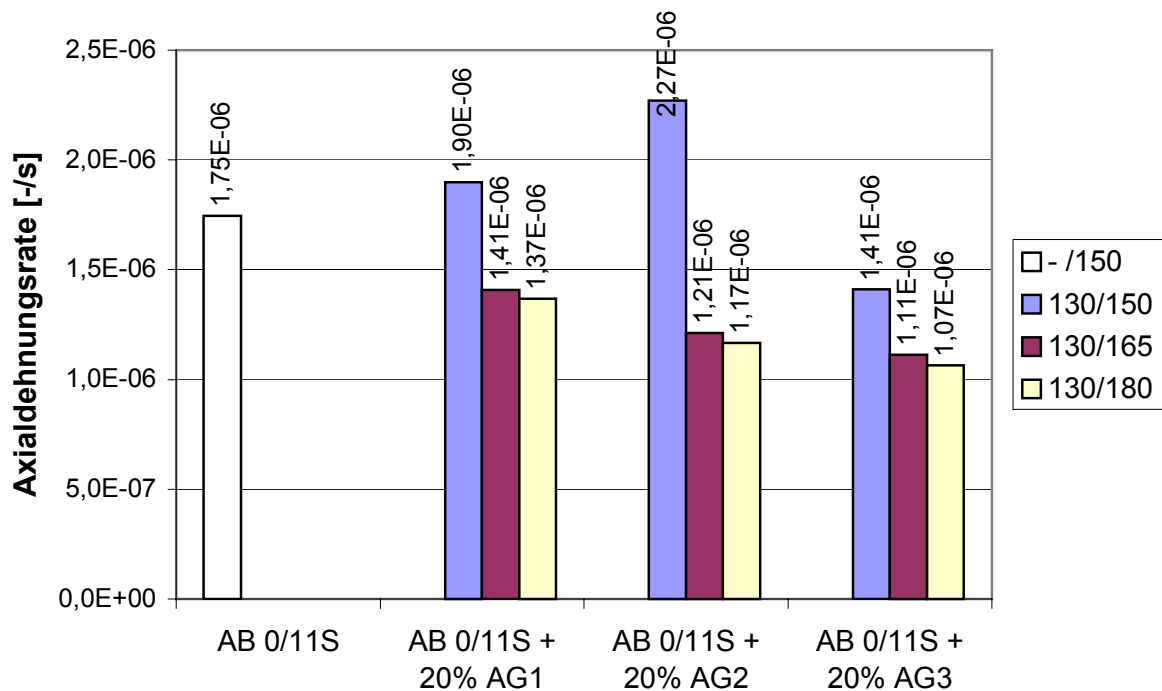


Abb. 7-13: Axialdehnungsraten der Asphaltbetonvarianten 0/11S nach 4.500 Lastwechseln

Aus den offensichtlichen und auch teils signifikanten Differenzen zwischen den Axialdehnungsraten der ersten Serie und denen der zweiten und dritten Serie wurde gefolgert, dass Auswirkungen der unterschiedlichen Produktionsverfahren auftraten (vergl. Kap. 5.4.7, Anlage 10.1). Die Differenzen zwischen den Axialdehnungsraten in den Serien 2 und 3 waren nur sehr gering und nicht statistisch signifikant. Eine Erhöhung der Mineralstofftemperaturen von 165°C um 15°C auf 180°C bewirkte keine wesentliche Änderung der viskosen Verformung im oberen Gebrauchstemperaturbereich. Festzustellen war, dass die Axialdehnungsrate in der zweiten und dritten Serie jeweils mit höherem Anteil an Asphaltgranulatbindemittel im Mischgut geringfügig abnahm (vergl. Abb. 7-3, 7-13). Ein höherer Bindemittelgehalt im Asphaltgranulat und damit ein höherer Bindemittelanteil aus dem Asphaltgranulat im Mischgut wirkte sich somit positiv auf das viskose Verformungsverhalten der untersuchten Asphaltbetone aus. Auch hier bestand, wie bei

den Verdichtungsarbeiten, ein Zusammenhang mit den in der Reihung von AG1, AG2 nach AG3 ansteigenden Härten der Asphaltgranulatbindemittel. Allerdings ließ sich in der Serie 1 dieser Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten und den Bindemittelanteilen aus den Asphaltgranulaten im Mischgut nicht ableiten. Zudem waren die Erweichungspunkte Ring und Kugel der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltbetonen in den Serien 1 bis 3 mit AG1, AG2 und AG3 jeweils etwa gleich groß (vergl. Abb. 7-8).

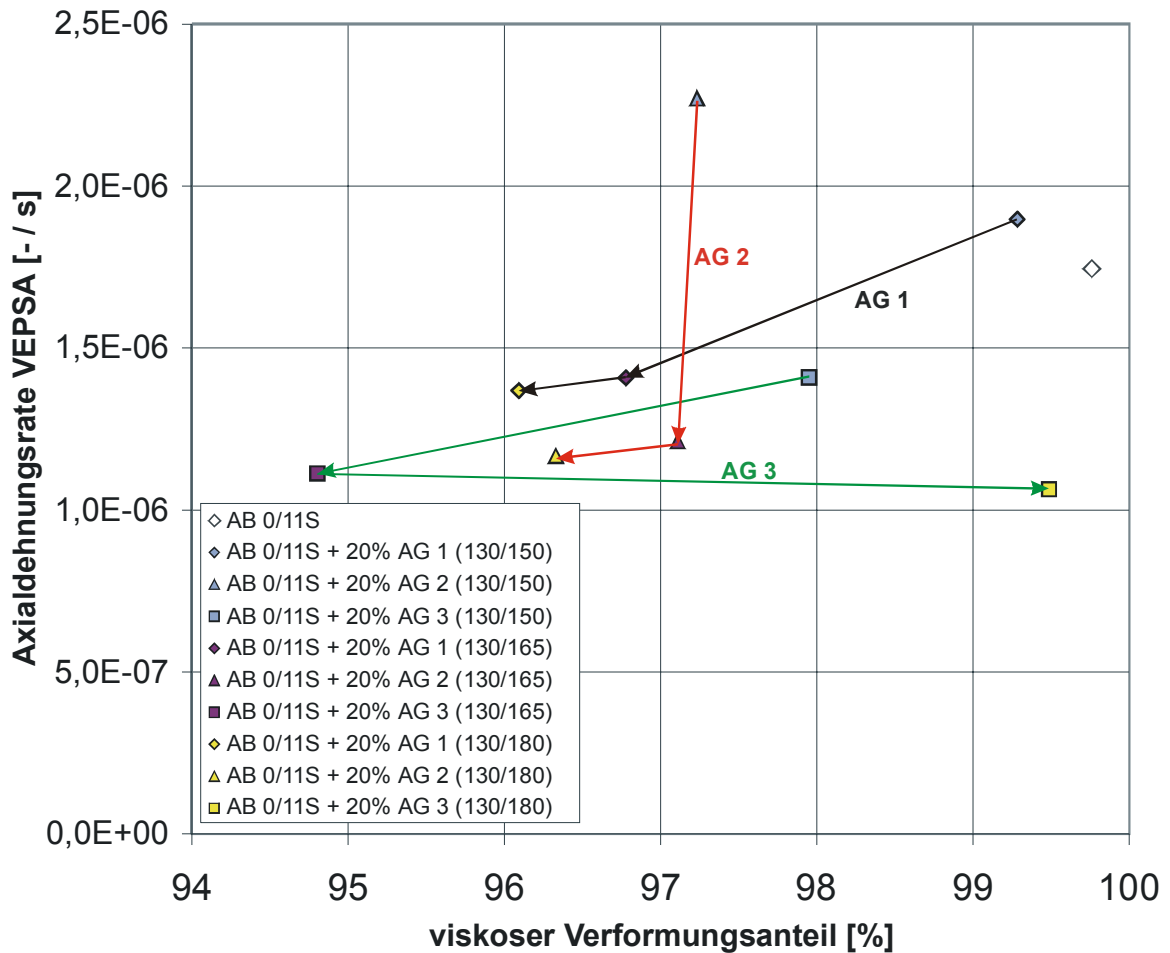


Abb. 7-14: Asphaltbetonvarianten 0/11S - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den viskosen Verformungsanteilen der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 50°C in den Serien 1 bis 3

Es wurde deshalb von Beiträgen der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB aus den Asphaltgranulaten zu den Differenzen zwischen den Axialdehnungsraten der Asphaltbetonvarianten ausgegangen. Aus der Reihung der Prüfergebnisse in den Serien 2 und 3 war ersichtlich, dass die größten positiven Auswirkungen auf den Widerstand gegen Verformungen durch die PmB-Anteile entstanden, gefolgt von den Auswirkungen der Kieselsäure- und Cellulosefaseranteile.

Der Cellulosefaseranteil lieferte vergleichsweise den geringsten Beitrag zur Wärmestandfestigkeit, was nach den Forschungsergebnissen von HINTERWÄLLER (1994) zu erwarten war.

Die im Schubkriechversuch an den rückgewonnenen Bitumen gemessenen viskosen Anteile der Bindemittelverformung bestätigten die Ergebnisse der Druckschwellversuche (vergl. Abb. 7-14).

Der viskose Verformungsanteil nahm bei den Bitumen der Asphaltbetone mit AG1 und AG2 mit zunehmender Mineralstofftemperatur von Serie 2 zu 3 ab, wie auch die Axialdehnungsraten der Asphaltbetone geringer wurden.

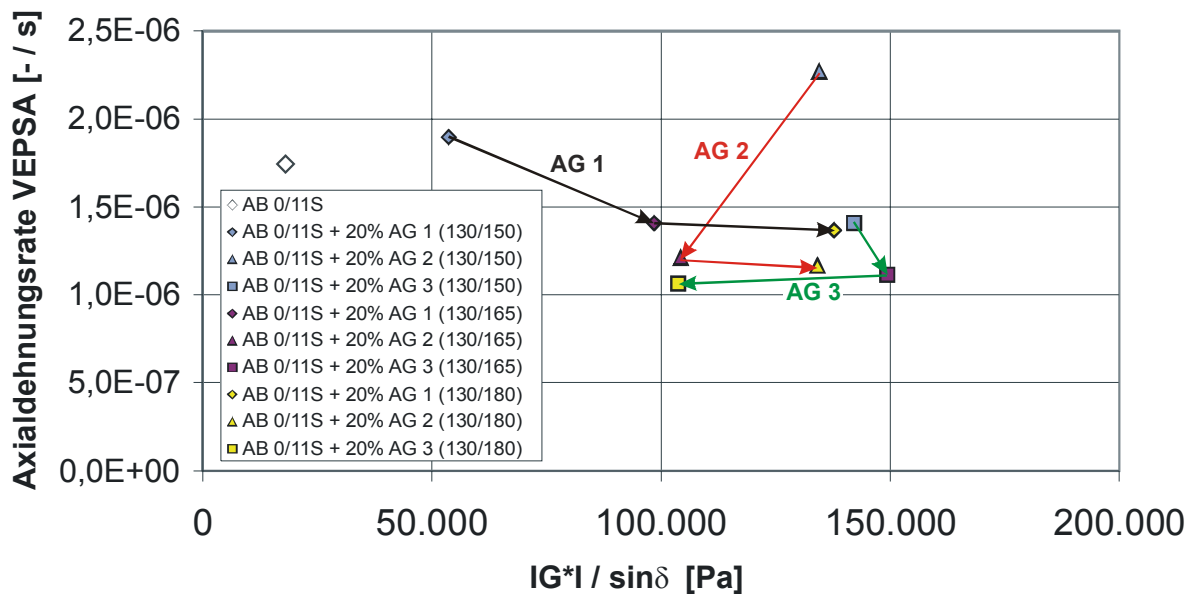


Abb. 7-15: Asphaltbetonvarianten 0/11S - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Kennwerten $IG \cdot I / \sin \delta$ der rückgewonnenen Bindemittel im Schubwechselfersuch bei 50°C in den Serien 1 bis 3

Die ermittelten Kennwerte $IG \cdot I / \sin \delta$ bestätigten dagegen die Ergebnisse der Druckschwellversuche nur beschränkt (vergl. Abb. 7-15). Höhere Kennwerte ergaben nicht immer auch geringere Axialdehnungsraten. Die ansteigenden Mineralstofftemperaturen von Serie 1 zu Serie 3 führten nur bei dem Asphaltgranulat AG1 jeweils zu höheren Kennwerten und auch geringeren Axialdehnungsraten.

Das Bindemittel aus den Asphaltbetonen mit AG3 zeigte nur bis zu einer Mineralstofftemperatur von 165°C geringere Axialdehnungsraten und größere Kennwerte $IG \cdot I / \sin \delta$ bzw. kleinere viskose Verformungsanteile bei ansteigenden Mineralstofftemperaturen. Die den Ergebnissen der Druckschwellversuche des Asphaltbetons mit AG3 in der Serie 3 widersprechenden Ergebnisse der Schubkriechversuche konnten auf Auswirkungen des PmB aus dem Asphaltgranulat AG3 zurückgeführt werden, die sich aber nicht ausschlaggebend an den Asphalteeigenschaften abzeichneten. Das Lösen von vernetzten Polymermolekülen durch die höhere Mineralstoff-

temperatur in der Serie 3 könnte ursächlich für den ansteigenden viskosen Verformungsanteil im Schubkriechversuch gewesen sein.

Asphaltbindervarianten

Die Reihung der Axialdehnungsraten ließ auf Auswirkungen der unterschiedlichen Mischverfahren schließen, denn jeweils in der ersten Serie ergaben sich signifikant die größten Axialdehnungsraten unter den Asphaltbindervarianten mit Asphaltgranulat (Abb. 7-16, Anlage 10.2).

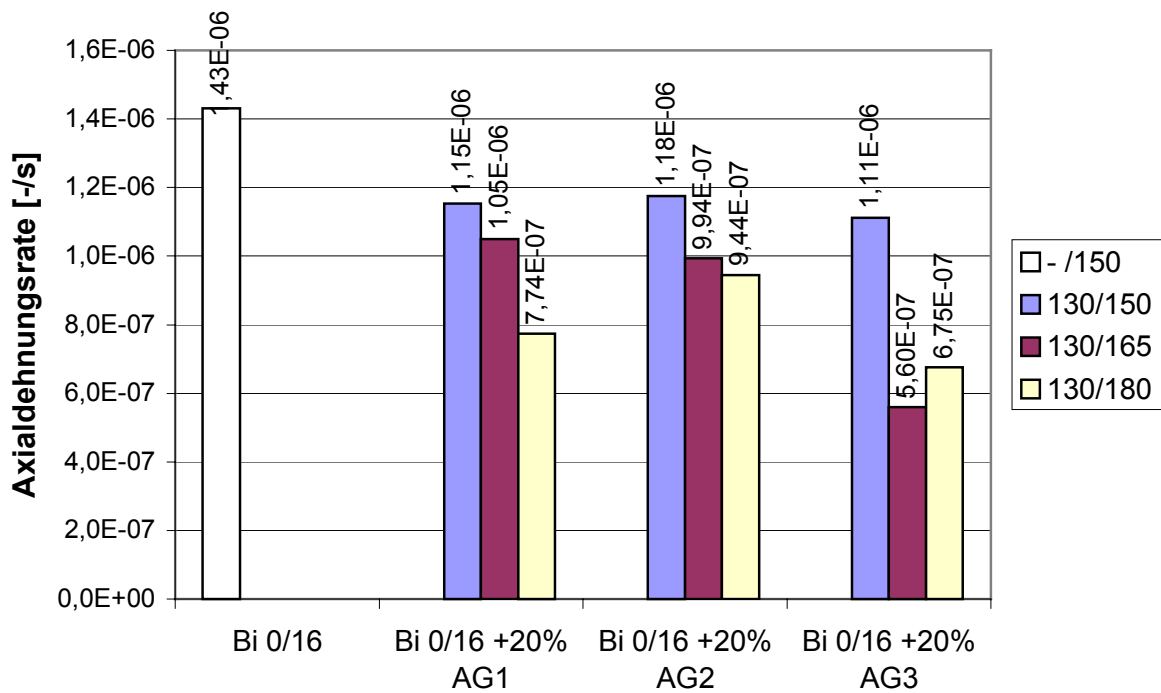


Abb. 7-16: Axialdehnungsraten der Asphaltbindervarianten 0/16 nach 4.500 Lastwechseln

Es wurden größere Differenzen zwischen den Axialdehnungsraten der Asphaltbinder in den Serien 2 und 3 als zwischen denen der Asphaltbetonvarianten ermittelt. Demnach ließen die Asphaltbinder 0/16 mit 20% Asphaltgranulat, analog zu den Verdichtungsergebnissen, auch jeweils ein empfindlicheres Verformungsverhalten bezüglich der Mineralstofftemperatur im Bereich von 165 bis 180°C erkennen. Das Mischgut mit AG3 reagierte auf die um 15°C höhere Mineralstofftemperatur von Serie 2 zu 3 unerwartet mit einer höheren Axialdehnungsrate. Die von Serie 1 bis 3 ansteigenden Mineralstofftemperaturen führten nach den Erweichungspunkten Ring und Kugel (vergl. Abb. 7-17) und den Nadelpenetrationen (Anlage 12.1) erwartungsgemäß zu einer Verhärtung des Bitumengemischs und infolgedessen zu geringeren Axialdehnungsraten. Die größeren Differenzen der Axialdehnungsraten der Asphaltbinder und Asphaltbetone ließen, analog zu den Verdichtungsverhalten, größere Auswirkungen von Doppelumhüllungen

erkennen, die durch einen dünneren Bindemittelfilm um die neuen Mineralstoffe aufgrund eines geringeren Bindemittelgehalts im Asphaltbinder und damit aufgrund eines geringeren Anteils an neuem Bitumen entstanden.

Asphaltgranulat	Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52 011 in °C			
	rückgewonnenes Bindemittel aus			
	Asphaltbindervarianten			Asphaltgranulat
	Serie 1 130/150°C	Serie 2 130/165°C	Serie 3 130/180°C	
AG1	50,5	54,5	57,0	58,0
AG2	52,0	57,0	58,5	61,0
AG3	52,0	59,0	58,0	63,5

Abb. 7-17: Erweichungspunkte Ring und Kugel nach DIN 52 011 der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltbindervarianten in den Serien 1 bis 3 und aus den Asphaltgranulaten

Nach den Erweichungspunkten Ring und Kugel wiesen die Härten der rückgewonnenen Bitumen aber nur geringe Unterschiede auf, so dass die deutlichen Differenzen der Axialdehnungsraten, analog zu den Asphaltbetonvarianten, auch auf Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB aus den Asphaltgranulaten in den Asphaltbindern 0/16 zurückgeführt werden konnten.

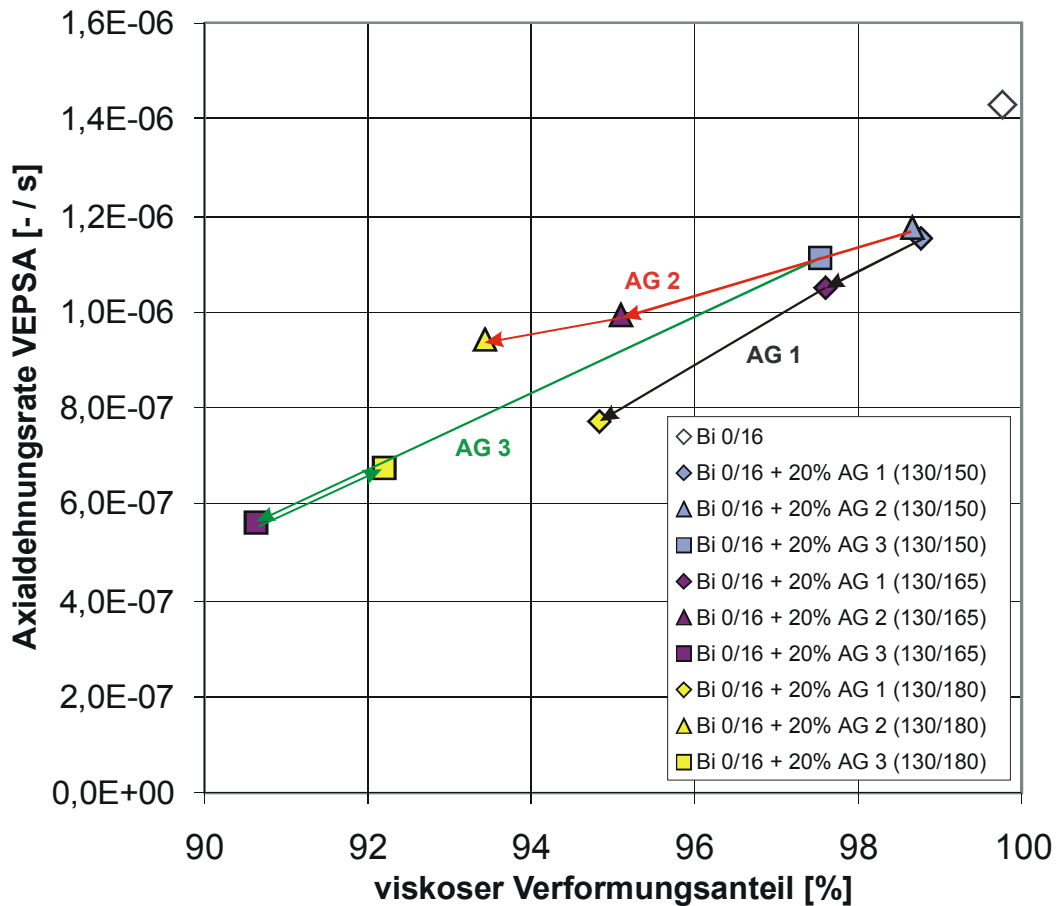


Abb. 7-18: Asphaltbindervarianten 0/16 - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den viskosen Verformungsanteilen der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 50°C

Bei geringeren viskosen Verformungsanteilen (vergl. Abb. 7-18) bzw. höheren Kennwerten $IG^*I/\sin\delta$ (vergl. Anlage 12.2) infolge höherer Mineralstofftemperaturen in den Serien 2 und 3 wurden mit den Asphaltgranulaten AG1 und AG2 jeweils geringere Axialdehnungsraten gemessen. Auch bei den Asphaltbindern mit Asphaltgranulat AG3 verringerten sich die Axialdehnungsraten mit ansteigenden Mineralstofftemperaturen, aber die viskosen Verformungsanteile wurden größer. Mit zunehmender Mineralstofftemperatur war wiederum ein negativ zu beurteilender Einfluss auf das PmB entstanden, der aber offenbar auf die Axialdehnungsrate des Asphaltbinders keinen negativen Effekt ausübte.

Asphalttragschichtvarianten

Auch das Verformungsverhalten der Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat wurde im Vergleich zum Referenzmischgut aufgrund der geringeren Axialdehnungsraten als besser eingestuft.

In der ersten Serie wurden, mit Ausnahme bei der Tragschicht mit 40% AG1, die größten Axialdehnungsraten unter den Asphalttragschichtvarianten mit 25% und 40% Asphaltgranulat ermittelt (Abb. 7-19).

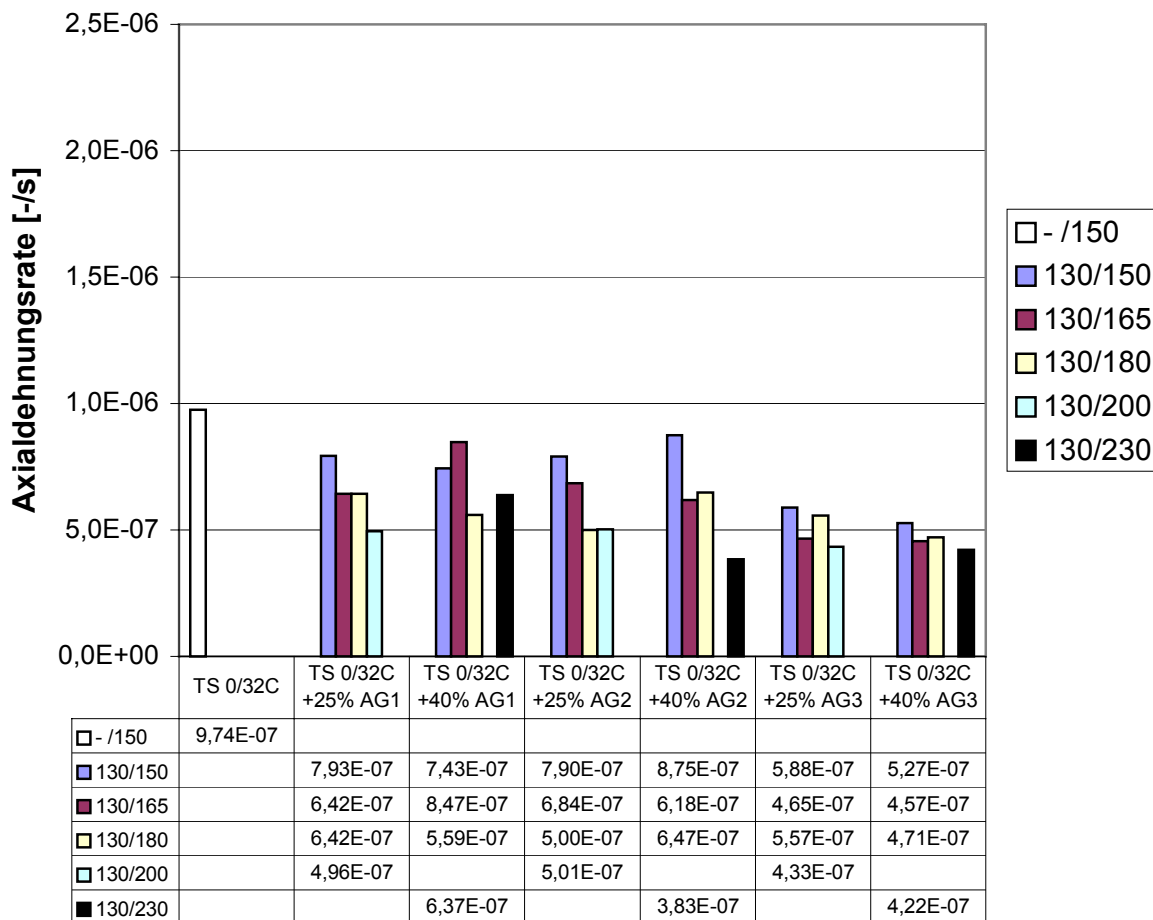


Abb. 7-19: Axialdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten 0/32C nach 4.500 Lastwechseln

Die Auswirkungen der Unterschiede im Herstellungsverfahren in der Serie 1 gegenüber den Serien 2 und 3 schlugen sich, analog zu den Ergebnissen der Asphaltbeton- und Asphaltbindervarianten, in höheren Axialdehnungsraten in der Serie 1 nieder. Für diese Differenzen konnte aber im betrachteten Umfang keine statistische Signifikanz festgestellt werden (vergl. Anlage 10.3).

Die in den Serien 2 bis 4 bzw. 5 gemessenen Axialdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten ließen keinen einheitlichen Zusammenhang zwischen deren Größe und der Höhe der Mineralstofftemperatur bei der Mischgutherstellung erkennen. Auch die Erhöhung der Asphaltgranulatzugabe von 25% auf 40% bewirkte jeweils unterschiedliche Veränderungen der Axialdehnungsraten. Tendenziell war festzustellen, dass sich bei den vergleichsweise hohen Mineralstofftemperaturen in den Serien 4 und 5 überwiegend geringere Axialdehnungsraten ergaben.

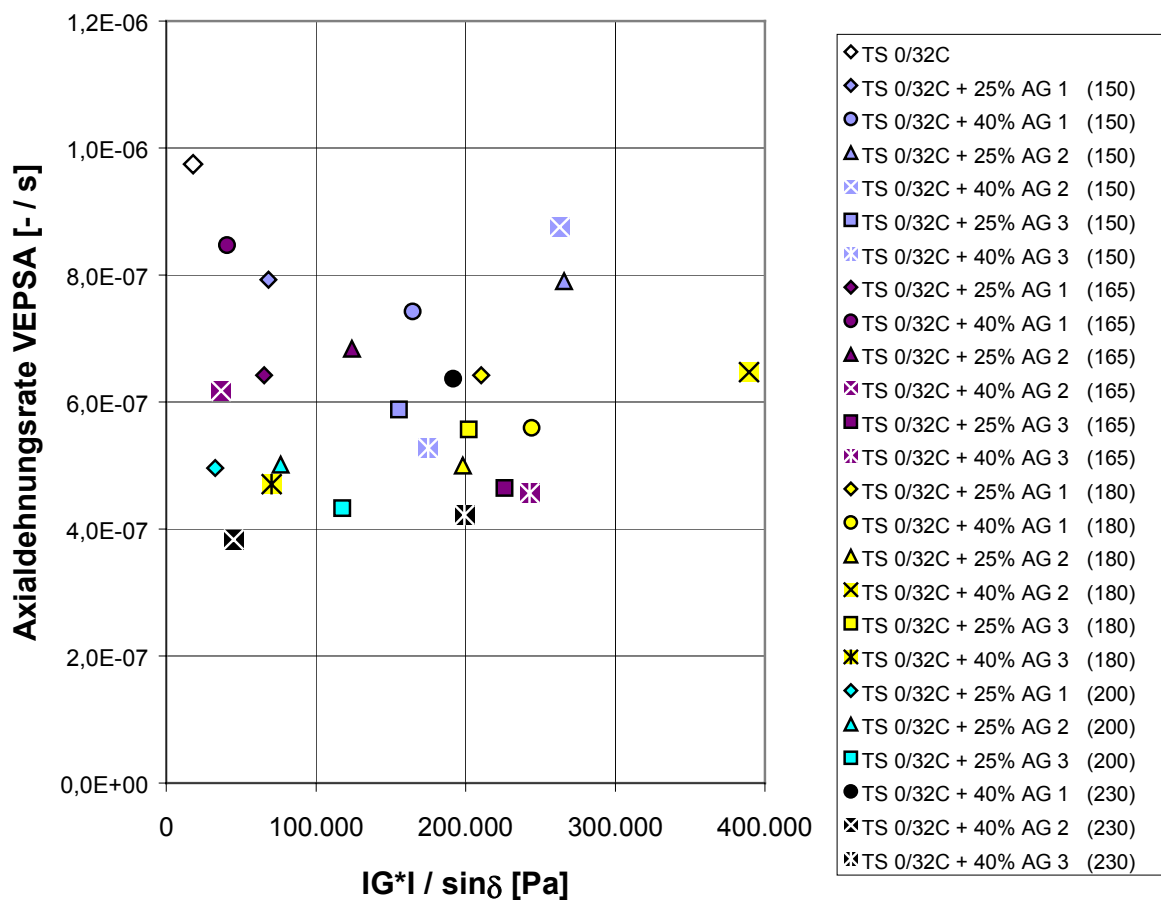


Abb. 7-20: Asphalttragschichtvarianten 0/32C - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Kennwerten $IG^*I / \sin\delta$ der rückgewonnenen Bindemittel im Schubwechselversuch bei 50°C in den Serien 1 bis 5

Der bei ansteigendem Asphaltgranulatanteil jeweils ansteigende Bindemittelanteil aus dem Asphaltgranulat im Mischgut (vergl. Abb. 7-3) ließ keine Auswirkungen auf die Axialdehnungsraten erkennen. Zudem zeigten die Axialdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten keine

Abhängigkeiten von den Konsistenzen der rückgewonnenen Bitumen nach dem Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie der Nadelpenetration.

Da die Axialdehnungsraten der Asphalttragschichten mit AG3 durchschnittlich die kleinsten Werte erreichten, konnte davon ausgegangen werden, dass der Beitrag des PmB zum Widerstand gegen bleibende Verformungen im Vergleich zu Cellulosefasern und Kieselsäure größer war.

Zwischen den viskosen Verformungsanteilen der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch und den Axialdehnungsraten der Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat bestand kein einheitlicher Zusammenhang. Der zu erwartende Zusammenhang war nur bei dem Referenzmischgut festzustellen. Denn das Referenzmischgut wies unter den Asphalttragschichten sowohl die höchste Axialdehnungsrate als auch den höchsten viskosen Verformungsanteil auf. Die gemessenen viskosen Verformungsanteile ließen anhand ihrer Größe nicht auf einheitliche Einflüsse der Mineralstofftemperaturen auf das Verformungsverhalten der Bindemittel schließen. Auch die Asphaltgranulatmenge hatte keine einheitliche Wirkung auf die viskosen Verformungsanteile der Bindemittel aus den Asphalttragschichtvarianten. Die viskosen Verformungsanteile und die Kennwerte $IG^*/\sin\delta$ (vergl. Abb. 7-20) der rückgewonnenen Bindemittel standen in keinem erkennbaren Zusammenhang zu den Axialdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten. Es konnten keine Auswirkungen der Zusätze und des PmB in den Asphaltgranulaten auf den Widerstand der Asphalttragschichtvarianten gegen bleibende Verformungen festgestellt werden.

7.3 Rissverhalten

7.3.1 Spaltzugschwellversuche bei 20°C

Asphaltbetonvarianten 0/11S

Die Asphaltbetone mit Asphaltgranulat zeigten im Vergleich zum Referenzmischgut größere Querdehnungsraten (vergl. Abb. 7-21, Anlagen 11). Die Querdehnungsraten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat lagen aber überwiegend, wie auch die Querdehnungsrate der Referenzmischung, unter dem von GRÄTZ (1998) ermittelten Grenzwert von $1,5 \cdot 10^{-5}$ [-/s] (vergl. Kap. 5.5.2.2). Die Lastspielzahlen in den Asymptoten und die Querdehnungsraten in den Wendepunkten deuten nach GRÄTZ auf nicht ausreichende Widerstände der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat gegen Rissbildung hin. Das Referenzmischgut erreichte eine deutlich höhere Lastspielzahl im Bruchzustand als die Asphaltbetone mit Asphaltgranulat. Die Neigung zur Rissbildung war im Falle einer weichen bzw. verformbareren Unterlage, z.B. im Frost-Tau-Wechsel, bei dem Referenzmischgut aufgrund der geringeren Dehnungsraten größer als bei den Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat. Einheitliche Abhängigkeiten zwischen den Bindemittel-

anteilen aus den Asphaltgranulaten in den Mischgütern und den Querdehnungsraten traten nicht auf.

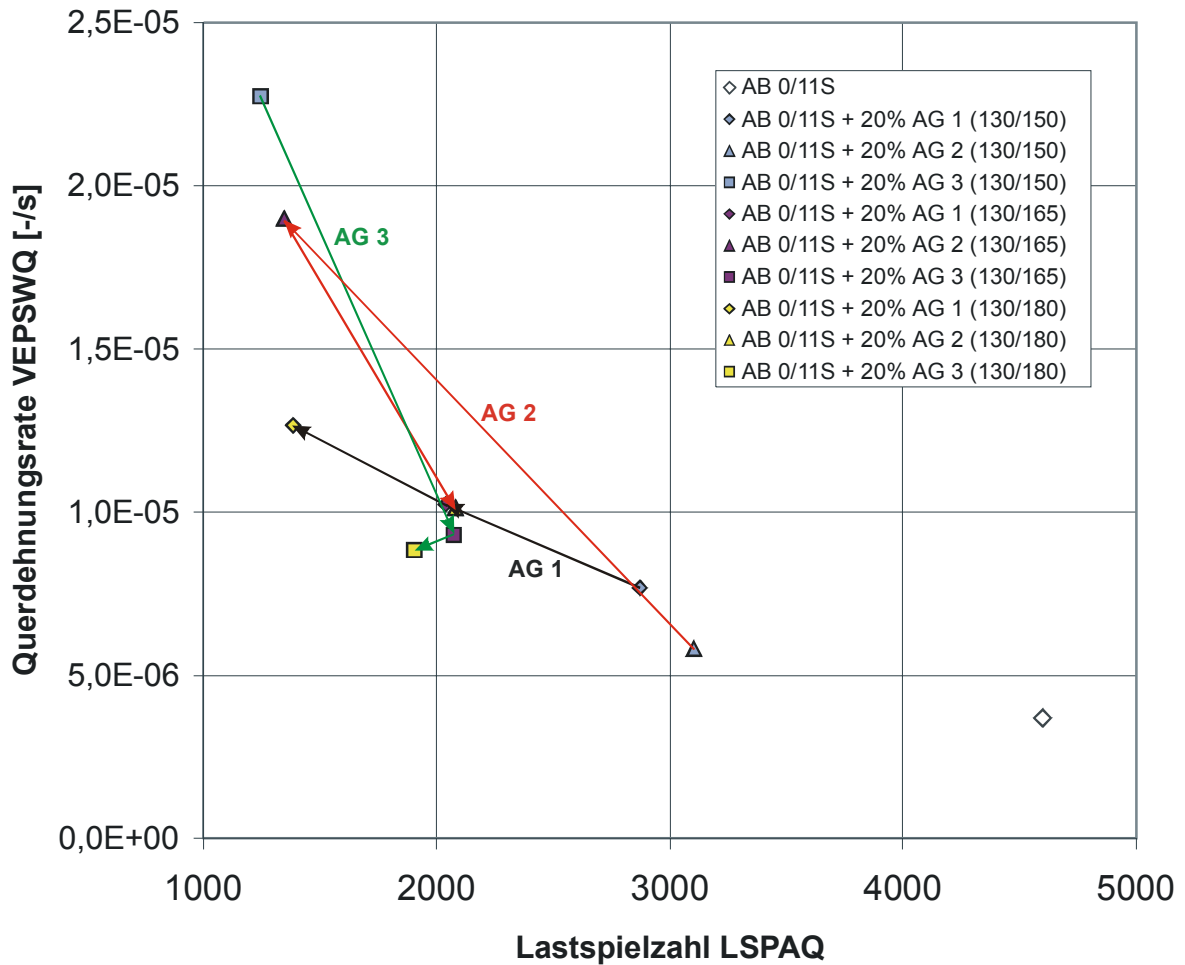


Abb. 7-21: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in den Serien 1 bis 3

Der Bruchzustand trat jeweils bei Lastspielzahlen auf, die keinen Zusammenhang mit den unterschiedlichen Herstellungsverfahren und den Mineralstofftemperaturen in der Spanne von 150°C bis 180°C erkennen ließen. Nach ARAND et al. (1985) wurden die Zugfestigkeiten von Asphalten mit Kieselsäure bei Temperaturen von -10°C und darunter um rund 30% höher gemessen als die von Asphalten ohne Kieselsäure. Die gegenüber der Referenzmischung höheren Dehnungsraten der Asphalte mit Asphaltgranulat dokumentierten ein günstigeres Rissverhalten bei tiefen Temperaturen. Denn höhere Bruchdehnungen sind nach ARAND et al. bei tiefen Temperaturen dann von besonderem Vorteil, wenn bei dickeren Schichtaufbauten in Asphalt-

deckschichten durch den Verkehr nur geringere Dehnungen verursacht werden, weil die Lasten dann durch das dicke Schichtenpaket abgetragen werden. Somit besteht zwischen den vorhandenen Dehnungen und den Bruchdehnungen eine relativ große Differenz. Damit wird die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel bis zum Bruchzustand bei tiefen Temperaturen deutlich erhöht.

Bei der Prüftemperatur von 20°C wurde allerdings im Spaltzugschwellversuch eine Erhöhung der Lastspielzahl in der Asymptote der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat AG1, AG2 und AG3 gegenüber der Referenzmischung nicht festgestellt. Die Versuchsergebnisse bei -5°C (vergl. Kap. 7.3.2) bestätigten aber die Zunahme der Lastspielzahlen bei höheren Querdehnungsraten im Wendepunkt bei tiefen Temperaturen. Das bedeutet, dass größere Querdehnungsraten bei niedrigeren Lastspielzahlen in der Asymptote bei einer Prüftemperatur von 20°C auf sowohl größere Querdehnungsraten als auch auf größere Lastspielzahlen bei tiefen Temperaturen schließen ließen. Damit wurde die Höhe der Querdehnungsrate bei 20°C als maßgebendes Beurteilungskriterium für den Widerstand gegen Rissbildung nach DURTH und GRÄTZ (1996) bestätigt.

Die unterschiedlichen Reihungen der ermittelten Querdehnungsraten im Wendepunkt und der Lastspielzahlen in den Asymptoten ließen keine differenzierte Beurteilung der Auswirkungen der unterschiedlichen stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB aus den Asphaltgranulaten auf die Widerstände der Asphaltbetonvarianten gegen Rissbildung zu. Da die Asphaltbetone mit Asphaltgranulat gegenüber der Referenzmischung höhere Widerstände gegen Rissbildung erkennen ließen, kann insgesamt von positiven Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB auf den Widerstand der Mischgüter gegen Rissbildung ausgegangen werden.

Schlüssige Zusammenhänge zwischen den Duktilitäten der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten und den Lastspielzahlen in den Asymptoten sowie den Querdehnungsraten in den Wendepunkten konnten nicht festgestellt werden, so dass Rückschlüsse von den Duktilitäten der Bitumen auf das Rissverhalten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat nicht möglich sind.

Höhere Querdehnungsraten im Wendepunkt gingen nicht einher mit niedrigeren Brechpunkten nach Fraaß. Die Eigenschaften der rückgewonnenen Bitumengemische konnten anhand des Brechpunktes nach Fraaß offensichtlich nicht ausreichend differenziert werden, so dass ebenfalls keine Rückschlüsse auf unterschiedliches Rissverhalten der Asphaltbetone gezogen werden können.

Die Asphaltbetonvarianten zeigten jeweils unterschiedliche Zusammenhänge zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt und den elastischen Verformungsanteilen ihrer Bindemittel (vergl. Abb. 7-22). Während bei den Asphaltbetonen mit AG1 und AG2 überraschend ein Anstieg der Querdehnungsraten und ein Anstieg des elastischen Verformungsanteils des

Bindemittels mit steigenden Mineralstofftemperaturen in den Serien 1 und 2 gemessen wurde, verringerte sich die Querdehnungsrate des Asphaltbetons mit AG3 erwartungsgemäß mit ansteigendem elastischem Verformungsanteil von Serie 1 zu Serie 2. Demnach war anzunehmen, dass sich auch die stabilisierenden Zusätze aus AG1 und AG2 auf die Querdehnungsraten der Asphalte auswirkten. Da aber die stabilisierenden Zusätze aus AG1 und AG2 in den rückgewonnenen Bindemitteln nicht mehr vorhanden waren, ergaben die rheologischen Untersuchungen der Bitumen aus den Asphalten mit AG1 und AG2 Prüfergebnisse, die in nicht schlüssigen Zusammenhängen mit den gemessenen Querdehnungsraten der Asphaltbetone standen.

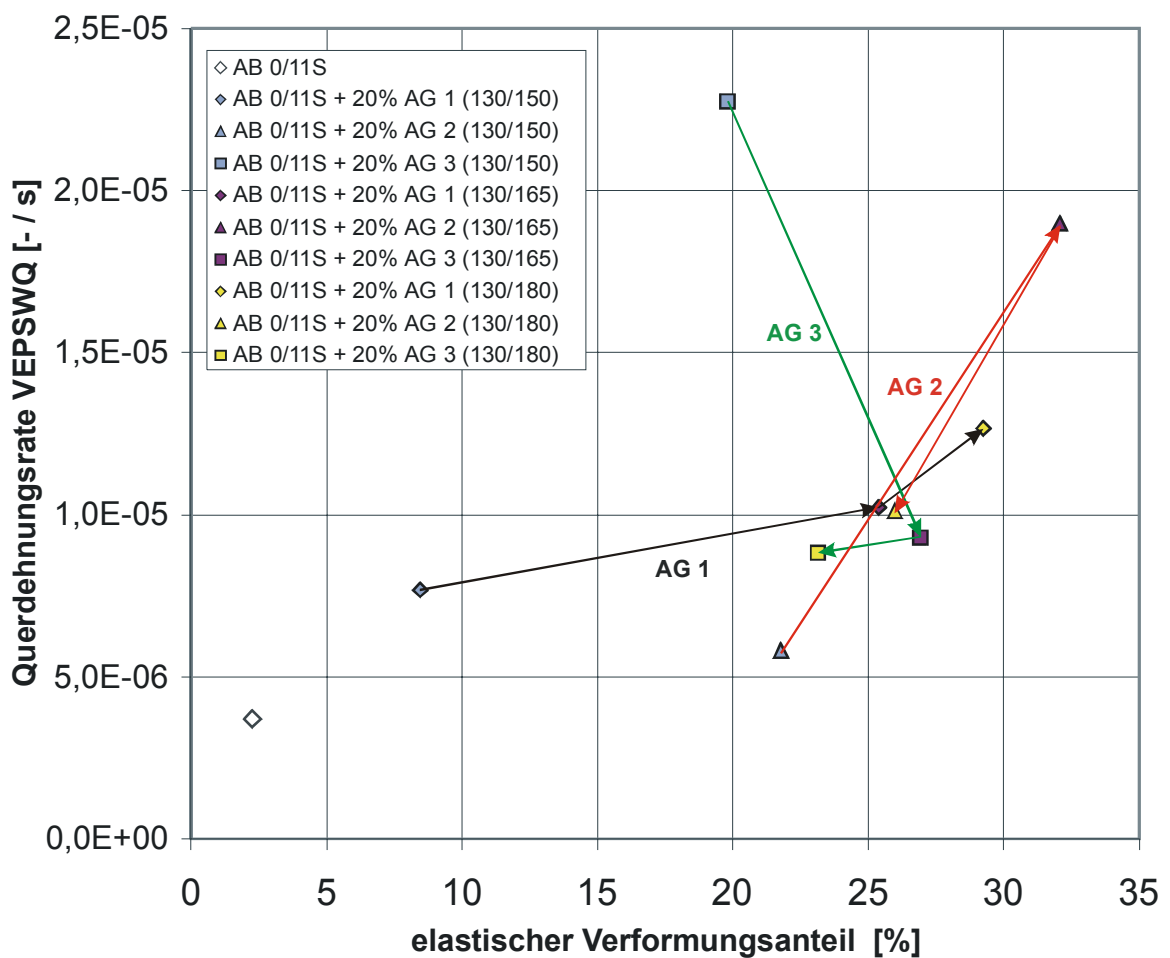


Abb. 7-22: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in den Serien 1 bis 3

Asphaltbindervarianten 0/16

Die Querdehnungsraten im Wendepunkt und die Lastspielzahlen in den Asymptoten der Asphaltbindervarianten 0/16 lagen in der Größenordnung von Prüfergebnissen, die auch von DURTH und GRÄTZ (1996) an Bohrkernen aus verschiedenen Asphaltbinderschichten 0/16 ermittelt wurden. Die Querdehnungsraten der Asphaltbinder 0/16 mit Asphaltgranulat waren kleiner, die Lastspielzahlen größer als die der Referenzmischung (vergl. Abb. 7-23). Der Widerstand gegen Rissbildung war demzufolge bei den Asphaltbindern mit Asphaltgranulat jeweils kleiner als bei dem Referenzmischgut. Die Querdehnungsraten der Asphaltbinder mit Asphaltgranulat lagen aber größtenteils über dem Grenzwert von $1,5 \text{ E-}05 \text{ [-/s]}$ und wiesen daher durchschnittlich ausreichende und unerwartet auch größere Widerstände gegen Rissbildung auf als die Varianten des Asphaltbetons 0/11S.

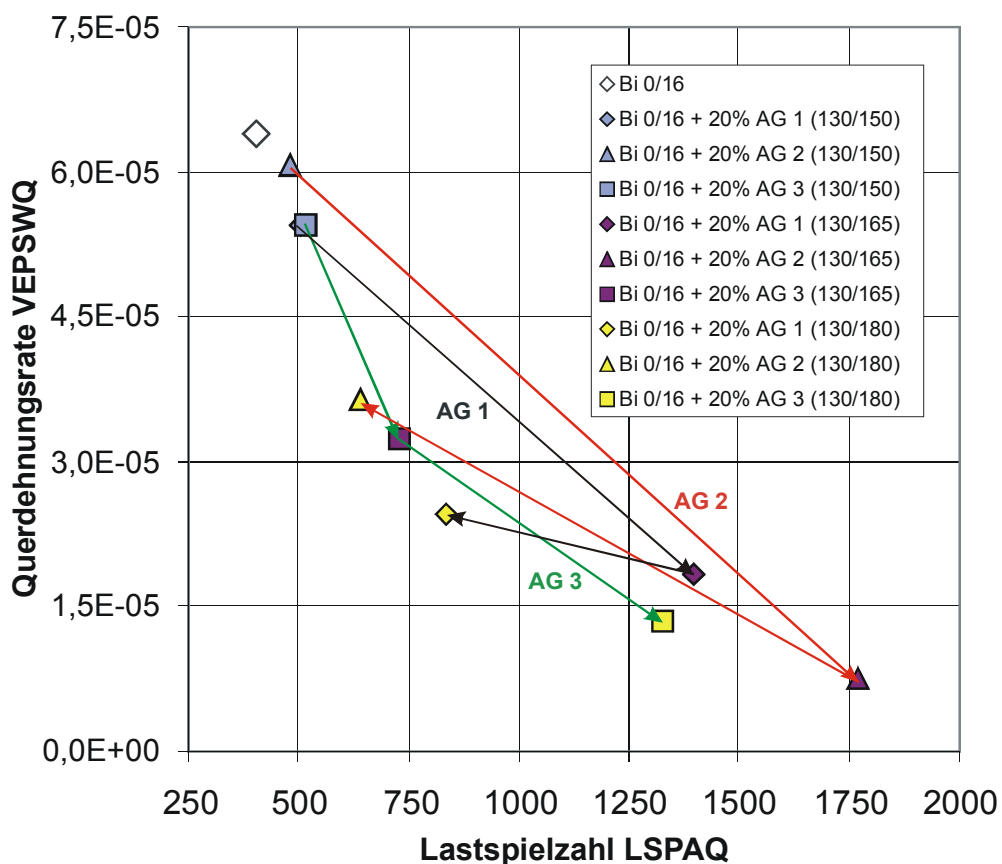


Abb. 7-23: Asphaltbindervarianten 0/16 im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in den Serien 1 bis 3

Die Querdehnungsraten in den Wendepunkten und die Lastspielzahlen in den Asymptoten der Asphaltbinder 0/16 mit Asphaltgranulat lagen in der ersten Serie eng beieinander und zeigten nur geringe Differenzen zu den Werten der Referenzmischung. In der zweiten und dritten Serie ergeben sich im Vergleich zu den Versuchen der Serie 1 signifikant geringere Querdehnungsraten mit höheren Lastspielzahlen in den Asymptoten (vergl. Anlage 11.7). Mögliche Gründe waren in den höheren Mineralstofftemperaturen in den Serien 2 und 3 und in den Differenzen im Herstellungsprozess (vergl. Kap. 5.4.7) zu sehen, die eine bessere Vermischung des Asphaltgranulatbitumens und des neuen Bitumens ergaben, wie es schon aus den Ergebnissen der Verdichtungsversuche hervorging. Eine Verhärtung der Bindemittel von Serie 1 zu Serie 3 konnte ebenfalls ursächlich sein. Nur für den Asphaltbinder 0/16 mit dem PmB-Anteil aus 20% AG3 wurden mit jeweils höheren Mineralstofftemperaturen von Serie 1 zu Serie 3 sowohl niedrigere Querdehnungsraten im Wendepunkt als auch höhere Lastspielzahlen in der Asymptote ermittelt. Diese Reihung trat in den Ergebnissen der Asphaltbinder 0/16 mit AG1 und AG2 nicht auf.

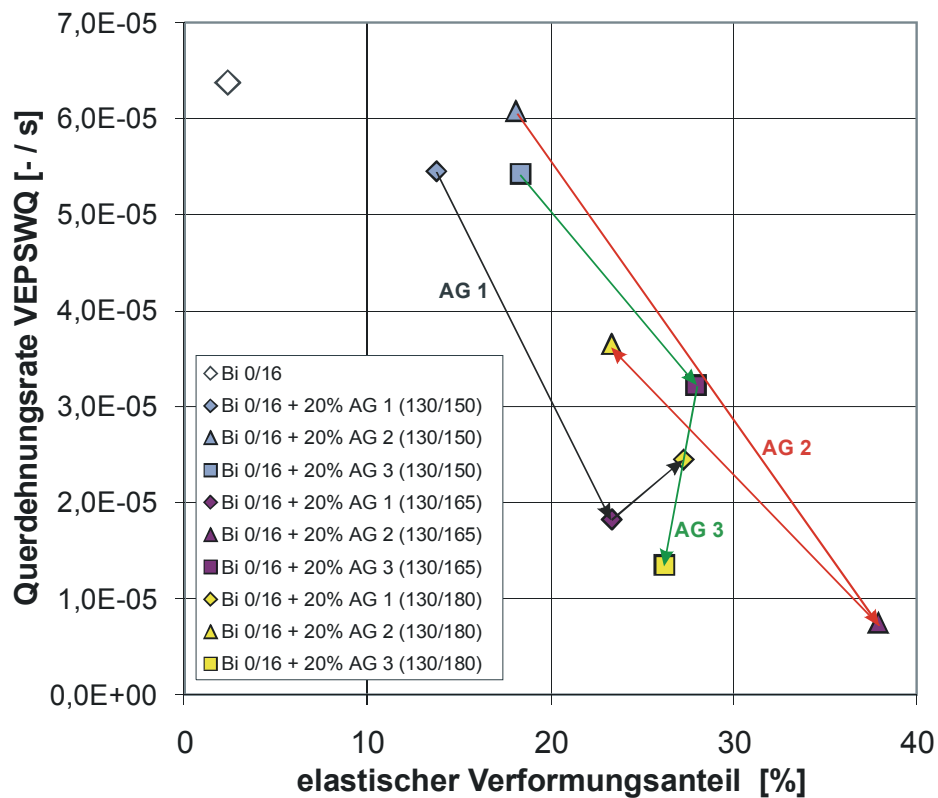


Abb. 7-24: Asphaltbindervarianten 0/16 im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in den Serien 1 bis 3

Wie schon bei den Asphaltbetonvarianten festgestellt wurde, zeichneten sich auch bei den Asphaltbindern keine schlüssigen Zusammenhänge zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt und den Lastspielzahlen in der Asymptote einerseits und den Duktilitäten andererseits ab.

Der Zusammenhang zwischen Querdehnungsrate im Wendepunkt bzw. der Lastspielzahl in der Asymptote und dem Brechpunkt nach Fraaß deutete bei den Asphaltbindervarianten zwar im Vergleich zu den Asphaltbetonvarianten auf eine größere Übereinstimmung hinsichtlich der Beurteilung des Rissverhaltens hin, aber bei geringeren Querdehnungsraten der Asphaltbinder wiesen die Bindemittel nicht alle höhere Brechpunkte nach Fraaß auf (vergl. Anlage 12.3).

Zwischen den Querdehnungsraten der Asphaltbindervarianten 0/16 und den elastischen Verformungsanteilen ihrer Bindemittel ließ sich der Zusammenhang erkennen, dass mit zunehmenden elastischen Verformungsanteilen der Bindemittel die Querdehnungsraten der Asphaltbinder abnahmen (vergl. Abb. 7-24). Der Zusammenhang zwischen den Querdehnungsraten und den elastischen Verformungsanteilen war wiederum bei dem aus dem Asphaltbinder mit AG3 rückgewonnenen Bindemittel mit PmB-Anteil annähernd auch in den drei Serien mit ansteigenden Mineralstofftemperaturen gegeben. Offensichtlich wirkten sich die Erhöhung der Mineralstofftemperaturen von 150°C bis 180°C und die unterschiedlichen Mischverfahren in der Serie 1 gegenüber den Serien 2 und 3 (vergl. Kap. 5.4.7) gleichermaßen deutlich bei allen Varianten auf die Querdehnungsraten und die elastischen Verformungsanteile aus.

Es konnten keine Auswirkungen der Zusätze und des PmB in den Asphaltgranulaten auf das Rissverhalten der Asphaltbinder festgestellt werden.

Asphalttragschichtvarianten 0/32C

Die Ergebnisse der Spaltzugschwellversuche aller Asphalttragschichtvarianten 0/32C deuteten auf einen Zusammenhang zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt und den Lastspielzahlen in der Asymptote in Form eines potenziellen Trends hin, wie er auch von GRÄTZ (1998) bei der Auswertung von Spaltzugschwellversuchen an verschiedenen Mischgutsorten festgestellt wurde (vergl. Abb. 7-25). Danach können hohe Lastspielzahlen von den Asphalten nur bei geringen Querdehnungsraten schadlos aufgenommen werden. Da es sich aber bezüglich der Asphaltgranulate um unterschiedlich zusammengesetzte Asphalttragschichten aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren (Serie 1 bis 5) handelte, war die Berechnung von Regressionsparametern nicht sinnvoll.

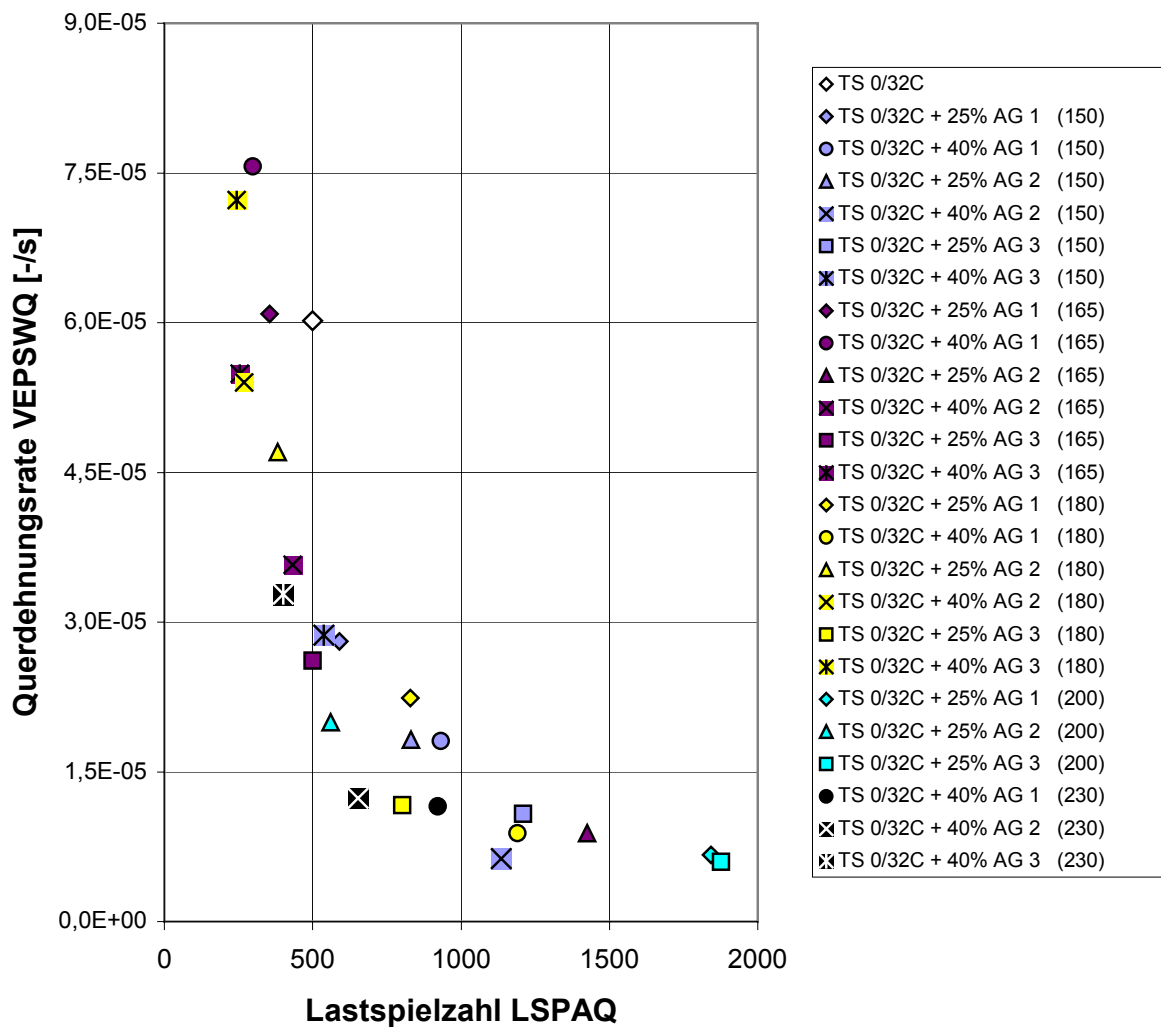


Abb. 7-25: Asphalttragschichtvarianten 0/32C im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in den Serien 1 bis 5

Die gemessenen Querdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten 0/32C mit Asphaltgranulat waren überwiegend signifikant geringer als die der Referenzmischung. Im Vergleich zu Querdehnungsraten, die von DURTH und GRÄTZ (1996) an Bohrkernen aus Asphalttragschichten 0/32 gemessen wurden, lagen die Querdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten 0/32C mit Asphaltgranulat zu etwa zwei Dritteln im Bereich gleicher Größenordnung oberhalb des Grenzwertes von 1,5 E-05 [-/s]. Die Lastspielzahlen in den Asymptoten bewegten sich bezüglich der Ergebnisse von DURTH und GRÄTZ ebenfalls im Bereich zwischen 250 und 2.000 Lastspielen in gleicher Abhängigkeit von den Querdehnungsraten.

Die Reihung der Querdehnungsraten ließ keine einheitlichen Abhängigkeiten von den Mineralstofftemperaturen in der Spanne von 150°C bis 230°C erkennen.

Die Asphalttragschichten mit 25% Asphaltgranulat AG1 und AG3 ergaben, analog zu den Asphaltbindern mit AG3, in den Serien 2 bis 4 (165 bis 200°C) mit zunehmenden Mineralstofftemperaturen jeweils eine geringere Querdehnungsrate im Wendepunkt und eine höhere Lastspielzahl in der Asymptote. Die Asphalttragschicht mit 25% Asphaltgranulat AG2 wies diese Reihung der Querdehnungsraten allerdings nicht auf.

Die Asphalttragschichten 0/32C mit 40% Asphaltgranulat reagierten auf die Änderungen bezüglich der Mischverfahren (vergl. Kap. 5.4.7) und der Mineralstofftemperaturen von Serie 1 zu Serie 2 mit deutlichen Anstiegen der Querdehnungsraten in den Wendepunkten und mit geringeren Lastspielzahlen in den Asymptoten. Eine Erhöhung der Mineralstofftemperaturen von Serie 2 zu 3 führte bei den Asphalttragschichten mit 40% AG2 und AG3 wiederum zu höheren Querdehnungsraten. Eine weitere Erhöhung der Mineralstofftemperaturen um 50°C in der Serie 5 führte zu deutlich geringeren Querdehnungsraten der Asphalttragschichten mit 40% AG2 und AG3.

Für einen hohen Widerstand gegen Rissbildung war demnach bei den praxisnahen Herstellungsverfahren in den Serien 2 bis 3 bei einer Zugabe von 40% AG2 und AG3 eine Mineralstofftemperatur von ca. 180°C günstig. Für die Asphalttragschicht mit 40% AG1 war schon eine Mineralstofftemperatur von 165°C zum Erreichen eines hohen Widerstandes gegen Rissbildung ausreichend.

Ein Zusammenhang zwischen der Duktilität und der Querdehnungsrate bzw. der Lastspielzahl der Asphalttragschichtvarianten war nicht festzustellen. Folglich nahm mit den der Reihenfolge nach sinkenden Bindemittelgehalten in den Mischgütern Asphaltbeton, Asphaltbinder und Asphalttragschicht auch die Möglichkeit ab, anhand der Bitumeneigenschaft Duktilität Rückschlüsse auf das Rissverhalten der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat ziehen zu können.

Auch die Brechpunkte der Bindemittel aus den Asphalttragschichtvarianten 0/32C mit Asphaltgranulat standen, analog zu den Bindemitteln aus den Asphaltbetonvarianten, in keinem Zusammenhang mit den Querdehnungsraten bzw. den Lastspielzahlen der Mischgüter.

Zwischen den Querdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten wurden nur geringe Unterschiede gemessen, wie auch zwischen den elastischen Verformungsanteilen der rückgewonnenen Bindemittel (vergl. Abb. 7-26). Eine qualitative Differenzierung der Widerstände gegen Rissbildung der Asphalttragschichten auf der Grundlage der elastischen Verformungsanteile der Bitumen war daher nicht praktikabel.

Es konnten ebenfalls keine Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze und des PmB auf das Rissverhalten der Asphalttragschichten festgestellt werden.

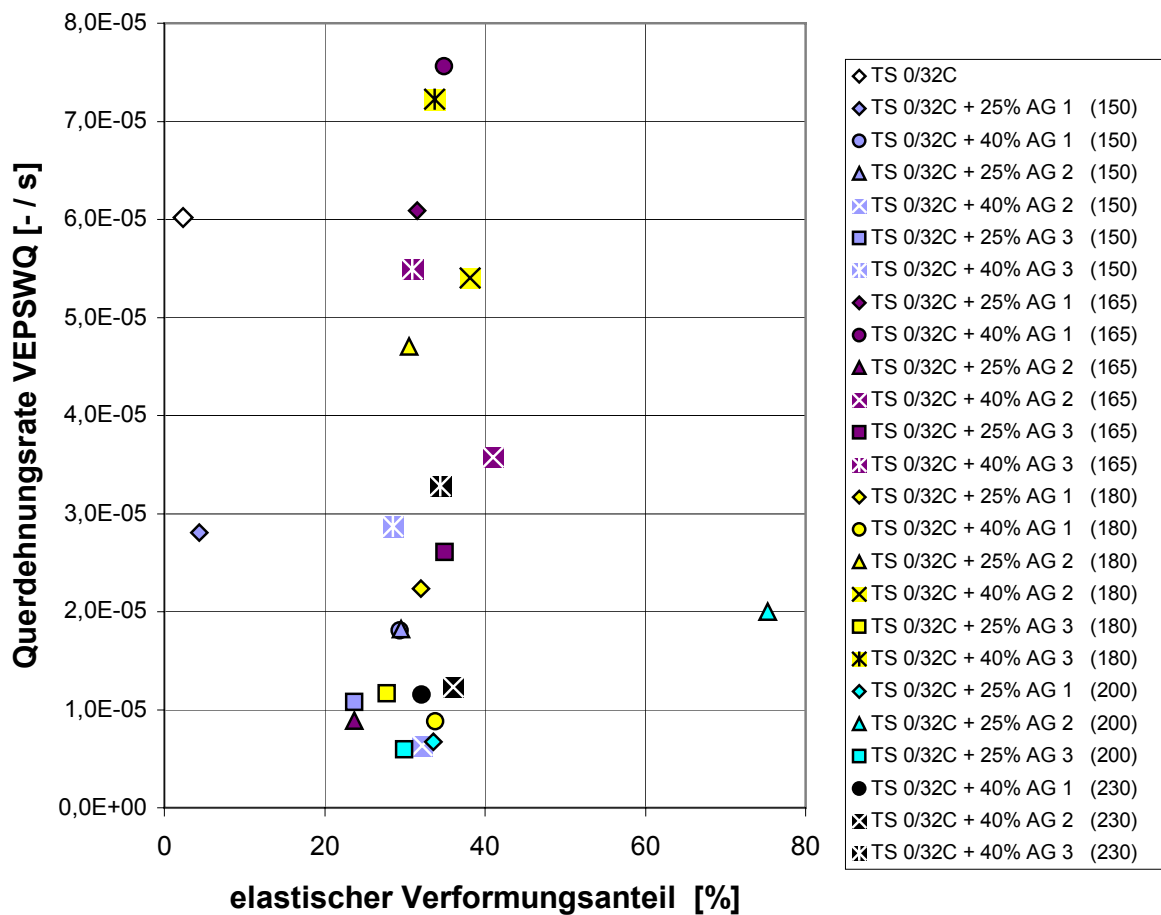


Abb. 7-26: Asphalttragschichtvarianten 0/32C im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in den Serien 1 bis 5

7.3.2 Spaltzugschwellversuche bei -5°C

Deutlich größere Lastspielzahlen in der Asymptote wurden bei einer Prüftemperatur von -5°C (vergl. Abb. 7-27) gegenüber 20°C (vergl. Abb. 7-21) gemessen. Die Versuchsdauern bei -5°C stiegen entsprechend den Lastspielzahlen in der Asymptote um bis zu 6 Stunden gegenüber denen bei 20°C an.

Die Querdehnungsraten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat waren größer als die Querdehnungsrate des Referenzmischguts bei ebenfalls größeren Lastspielzahlen in den Asymptoten. Die sowohl höheren Querdehnungsraten als auch die höheren Lastspielzahlen bei -5°C kennzeichneten, analog zu den Ergebnissen der Spaltzugschwellversuche bei 20°C (vergl.

Kap. 7.3.1), ein besseres Rissverhalten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat im Vergleich zum Referenzmischgut. Der Asphaltbeton mit dem PmB aus 20% AG3 zeigte dabei deutlich die höchste Lastspielzahl in der Asymptote.

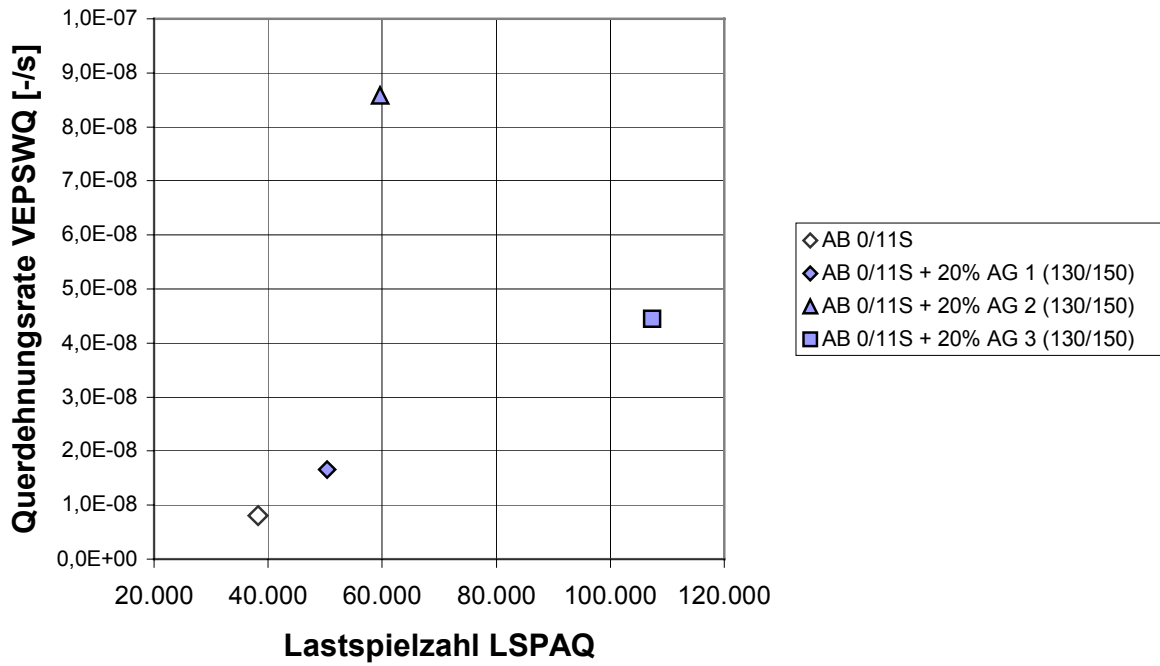


Abb. 7-27: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei -5°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in der Serie 1

Die Spaltzugschwellversuche der Asphaltbetonvarianten bei -5 und 20°C führten zu tendenziell gleichen Beurteilungen des Rissverhaltens. Deshalb wurde die Ansprache der Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB auf das Rissverhalten bei den übrigen Asphaltvarianten nicht zusätzlich mittels Spaltzugschwellprüfungen bei -5°C vorgenommen.

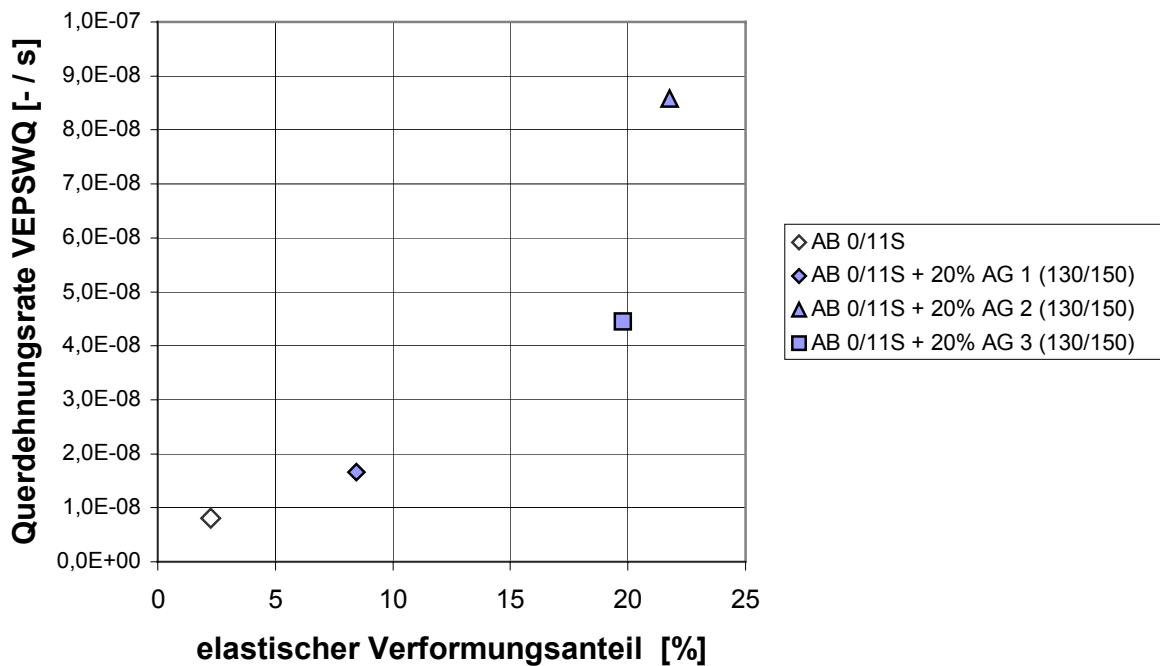


Abb. 7-28: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei -5°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in der Serie 1

Im Schubkriechversuch waren die elastischen Verformungsanteile der Bindemittel bei geringeren Querdehnungsraten der Asphaltbetone erwartungsgemäß jeweils größer (vergl. Abb. 7-28). Aus den elastischen Verformungsanteilen der Bindemittel bei einer Prüftemperatur von 20°C im Schubkriechversuch konnte offensichtlich auf die Widerstände der Asphalte gegen Rissbildung im Spaltzugschwellversuch bei 20°C (vergl. Abb. 7-21) und bei -5°C geschlossen werden. Die tatsächliche Verteilung der viskosen und elastischen Verformungsanteile der Bitumen im Asphalt unter dem Einfluss der jeweiligen stabilisierenden Zusätze und des PmB bei der Prüftemperatur von -5°C im Spaltzugschwellversuch war aber nicht erkennbar.

8. Zusammenfassende Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Verdichtungsverhalten

Größere Verdichtungswiderstände der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat im Vergleich zu konventionellen Asphalten konnten auf Doppelumhüllungen von Asphaltgranulatmineralstoffen zurückgeführt werden. Dabei war festzustellen, dass härteres Bindemittel im Asphaltgranulat offenbar zu mehr Doppelumhüllungen führte und damit größere Verdichtungswiderstände verursachte. Zudem führten geringere Gesamtbindemittelgehalte von Asphaltbindern im Vergleich zu Asphaltbetonen unter Variation der Mineralstofftemperatur aufgrund der größeren Auswirkungen von Doppelumhüllungen zu größeren Schwankungen bei den Verdichtungswiderständen.

Auch die Verdichtungsarbeiten stiegen bei höheren Mineralstofftemperaturen, ansteigendem Bindemittelgehalt im Asphaltgranulat und härterem Asphaltgranulatbindemittel und bestätigten Doppelumhüllungen als Ursache.

Die Erhöhung des Asphaltgranulatanteils in den Asphalttragschichten von 25 auf 40% hatte keine Auswirkungen auf die Verdichtungswiderstände.

Es konnten keine wesentlichen Auswirkungen der Zusätze oder des PmB im Asphaltgranulat auf die Verdichtungswiderstände der Asphaltvarianten festgestellt werden, obwohl Einflüsse auf die Verdichtungsarbeiten zu erkennen waren.

Aufgrund der Zusätze und des PmB in den Asphaltgranulaten ist demnach nicht mit negativen Auswirkungen auf die Verdichtungseigenschaften der untersuchten Asphaltvarianten zu rechnen.

Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat war nach den Axialdehnungsraten besser als das der konventionellen Referenzasphalte. Es entstanden geringe positive Einflüsse der Zusätze und des PmB in den Asphaltgranulaten auf den Widerstand der Asphaltvarianten gegen bleibende Verformung. Die größeren Differenzen der Axialdehnungsraten der Asphaltbinder und Asphalttragschichten im Vergleich zu den Asphaltbetonen ließen sich, analog zu den Verdichtungswiderständen, auf negative Auswirkungen von Doppelumhüllungen zurückführen.

Die Wiederverwendung von Asphaltgranulat mit Zusätzen und PmB wirkt sich demnach trotz auftretender Doppelumhüllungen positiv auf den Widerstand gegen bleibende Verformungen aus.

Rissverhalten

Die Querdehnungsraten der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat ließen im Vergleich zu den Referenzmischungen auf kleinere bis größere Widerstände gegen Rissbildung schließen. Auswirkungen der Zusätze und des PmB im Asphaltgranulat auf das Rissverhalten der Asphaltvarianten konnten nicht festgestellt werden.

Es sind keine negativen Auswirkungen der Wiederverwendung von Asphaltgranulat auf den Widerstand gegen Rissbildung zu erwarten, im Gegenteil, es sind sogar Verbesserungen gegenüber konventionellen Asphalten möglich.

9. Empfehlungen für die Praxis

Verdichtungsverhalten

Aus den kompositorischen Größen der Mischgüter und aus dem Herstellungsprozess selbst gingen keine quantitativ belegbaren und allgemein verwendbaren Parameter zur Abschätzung der Höhe des Verdichtungswiderstandes hervor. Deshalb reicht es, die Verdichtungswiderstände von Asphalten mit Anteilen von Fräsasphalt in der Praxis vor dem Einbau im Labor mit dem gewählten Erwärmungsverfahren unter Variation der Mineralstofftemperatur von Fall zu Fall empirisch zu ermitteln.

Die Verdichtungswiderstände von Referenzasphalten ohne Asphaltgranulat eignen sich nicht zur Abschätzung solcher von Asphalten mit Asphaltgranulat, im Einzelfall können große Abweichungen auftreten.

Energieeinsparung

Die relativ geringen Verdichtungswiderstände in der Serie 1 lassen die Möglichkeit erkennen, dass mit einer Füllererwärmung bei - im Vergleich zur bisherigen Praxis - geringeren Temperaturen der übrigen Mineralstoffe insgesamt Energie bei der Asphaltproduktion eingespart werden kann.

Verteilung und Vermischung der Bitumen

Für die Asphaltproduktion unter Verwendung von Asphaltgranulat ist die Zugabe von heißem Füller zu empfehlen, da sie zu homogenerem Mischgut führt, in dem sich die Eigenschaften der Bitumenmischung und damit auch die Eigenschaften der stabilisierenden Zusätze bzw. des PmB aus dem Asphaltgranulat auf die Asphalteeigenschaften auswirken.

Verformungsverhalten

Für vergleichsweise gute Verformungseigenschaften von Asphaltbetonen 0/11S und Asphaltbindern 0/16 der untersuchten Zusammensetzungen mit 20% Asphaltgranulatanteil sind nach den Laboruntersuchungen für die Herstellung in gesonderten Behältnissen Mineralstofftemperaturen von ca. 180°C zu empfehlen, für Asphalttragschichten mit 25 bis 40% Asphaltgranulat sind danach Mineralstofftemperaturen von 200 bis 230°C günstig.

Rissverhalten

Die Auswirkungen der Mischverfahren und des Asphaltgranulats bzw. der enthaltenen Zusätze müssen jeweils geprüft werden, da sie sich nicht aus definierbaren Parametern ergeben und sich damit nicht einstellen lassen.

Für gutes Rissverhalten von Asphaltbeton und Asphaltbinder mit 20% Asphaltgranulat und von Asphalttragschicht mit bis zu 40% Asphaltgranulat können nach den Laboruntersuchungen Mineralstofftemperaturen von bis zu 180°C bei separater Erwärmung empfohlen werden.

10. Vorschläge zur weiteren Forschung

Großversuche

In dieser Forschungsarbeit wurden Asphalte mit Asphaltgranulat im Labor hergestellt und untersucht. Die Versuchsergebnisse und die daraus gezogenen Erkenntnisse für die Praxis der Mischgutproduktion in einer Mischanlage und für die Verdichtungs- und Gebrauchseigenschaften auf der Strecke sollten nunmehr in langfristigen Feldversuchen überprüft werden.

Doppelumhüllung

Aufgrund der Hinweise auf entstandene Doppelumhüllungen und der zugeordneten deutlichen Einflüsse auf das Verdichtungs-, Verformungs- und Rissverhalten sollten systematische Untersuchungen zur Entstehung und zu den Auswirkungen vorgenommen werden, mit dem Ziel, die Entstehung von Doppelumhüllungen bei der Wiederverwendung zu minimieren und sie eventuell zur Verbesserung von Asphalteigenschaften nutzen zu können.

Energieeinsparung

Die Temperatur des Füllers stellt nach den vorliegenden Ergebnissen eine wesentliche Einflussgröße auf das Entstehen von Doppelumhüllungen dar, d.h. auf die Homogenität der Vermischung des neuen und des Asphaltgranulatbitumens bzw. auf die Verteilung des Asphaltgranulatbindemittels im Mischgut. Durch das Temperieren des Füllers konnten leichtere Ver-

dichtbarkeiten bei geringeren Temperaturen der übrigen Mineralstoffe und des neuen Bitumens festgestellt werden. Bezüglich des Verdichtungsprozesses ergeben sich offenbar auch hier Möglichkeiten der Energieeinsparungen im Produktionsprozess durch erwärmten Füller und durch tiefere Temperaturen der neuen Mineralstoffe und des neuen Bitumens. Eine Untersuchung im großtechnischen Maßstab könnte weitere Erkenntnisse liefern.

Verdichtung

Für die deutlichen Differenzen der Verdichtungswiderstände aus den Serien 1 und 3 zu denen aus der Serie 2 bestehen offenbar neben den unterschiedlichen Produktionsparametern auch bisher nicht erkannte Ursachen. Zur Klärung weiterer Ursachen werden weitergehende Forschungen zum Verdichtungsverhalten von Asphalten mit Asphaltgranulat unter Variation der Produktionsparameter, speziell der Mineralstoff- und Füllertemperaturen, vorgeschlagen.

Verformung

Das bessere Verformungsverhalten der Asphalte mit Asphaltgranulat gegenüber den Referenzmischungen lässt die Möglichkeit erkennen, dass auch die Verformungseigenschaften von konventionellen Asphalten durch gezielte separate Umhüllungen der Mineralstoffe verbessert werden könnten. Zudem wären Energieeinsparungen durch geringere Mineralstoff- und Bitumentemperaturen möglich. Beispielsweise könnten die Splittfraktionen mit Bindemitteln wählbarer Konsistenzen separat vorgemischt werden und der Mörtel mit einem Bindemittel einer eventuell anderen Sorte separat vor- und dann eingemischt bzw. direkt in den Mischer eingebracht werden.

Rissbildung

Das festgestellte leicht günstigere Rissverhalten der Asphaltbetone mit Asphaltgranulat gegenüber der Referenzmischung bedarf einer näheren Forschung, da die Gründe bisher nicht erkennbar sind. Die Ergebnisse solcher Forschungen könnten für die Optimierung der Gebrauchseigenschaften auch von konventionellen Asphalten angewendet werden.

11. Zusammenfassung

Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt im Asphaltoberbau hat sich nach dem derzeitigen Kenntnisstand bewährt. Die Auswirkungen der in Ausbauasphalten enthaltenen stabilisierenden Zusätze und der polymermodifizierten Bitumen auf die Asphalteigenschaften sind aber bisher kaum bekannt. Da aufgrund der Zunahme von Instandsetzungsmaßnahmen gegenüber dem Neubau von Straßen vermehrt Ausbauasphalte aus Deckschichten mit stabilisierenden Zusätzen und polymermodifiziertem Bitumen im Asphaltoberbau wiederverwendet werden, wurde in dieser Arbeit die Wiederverwendung von drei Fräsasphalten aus Deckschichten mit den stabilisierenden Zusätzen Cellulosefasern und Kieselsäure sowie mit elastomermodifiziertem Bitumen untersucht. Die Zugabeanteile der Asphaltgranulate am Mischgut betragen jeweils 20% bei den Asphaltbetonen der Sorte 0/11S und den Asphaltbindern der Sorte 0/16 sowie 25% und 40% bei den Asphalttragschichten der Sorte 0/32C. Zudem wurden jeweils Referenzmischungen ohne Asphaltgranulat für diese Asphaltarten hergestellt, die den Asphalten mit Asphaltgranulat in der Korngrößenverteilung, dem Brechsand-Natursand-Verhältnis sowie dem Bindemittelgehalt entsprachen.

Im Labor wurde die Mischgutproduktion in einer Mischanlage mit drei verschiedenen Erwärmungsverfahren für die Asphaltgranulate simuliert. Zur Anwendung kamen:

- die Erwärmung des Asphaltgranulats durch die heißen Mineralstoffe,
- die gemeinsame Erwärmung von Mineralstoffen und Asphaltgranulat und
- die getrennte bzw. parallele Erwärmung.

Durch Vorversuche wurde festgestellt, dass die geringsten Änderungen der Bindemiteleigenschaften durch die getrennte Erwärmung der Mineralstoffe und des Asphaltgranulats im Vergleich zu den zwei anderen Erwärmungsverfahren auftraten. Für die Herstellung des Asphalts zur Untersuchung der Asphalteigenschaften wurde daher die getrennte Erwärmung gewählt. Die Mineralstofftemperaturen betragen bei der Produktion der Asphaltbeton-, Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvarianten jeweils 150, 165 und 180°C sowie bei der Herstellung der Asphalttragschichten mit 25% Asphaltgranulat 200°C und mit 40% Asphaltgranulat 230°C.

Die Auswirkungen der Zusätze und des PmB im Asphaltgranulat auf das Verdichtungs-, Verformungs- und Rissverhalten der Asphaltvarianten wurden analysiert.

Das Verdichtungsverhalten wurde im Marshall-Gerät anhand der Verdichtungswiderstände D und im Gyrator-Verdichter mittels der Verdichtungsarbeiten bei einer Prüftemperatur von jeweils 135°C untersucht. Das Verformungsverhalten der Asphaltvarianten wurde mit Druckschwellversuchen bei einer Prüftemperatur von 50°C mit den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln beurteilt. Auf das Rissverhalten der Asphaltvarianten wurde mit den Querdehnungsraten im Wendepunkt der Impulskriechkurve und den Lastspielen in der Asymptote aus Spalt-

zugschwellversuchen bei einer Prüftemperatur von 20°C und für die Asphaltbetonvarianten zusätzlich bei -5°C geschlossen.

Die Bitumeneigenschaften der Asphaltvarianten wurden mit den konventionellen Bitumenprüfungen nach DIN 52000 ff. untersucht. Zudem wurden die Bitumeneigenschaften mit einem dynamischen Scherrheometer mittels der elastischen und viskosen Verformungsanteile in Schubkriechversuchen bei 20°C bis 50°C sowie anhand der Quotienten aus komplexem Schubmodul und Phasenverschiebungswinkel in Schubwechselversuchen bei 35°C und 50°C, in Verbindung mit den Ergebnissen der Asphaltprüfungen, hinsichtlich der Auswirkungen der stabilisierenden Zusätze und des PmB auf die Asphalteigenschaften analysiert.

Zwischen den Verdichtungswiderständen der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat und den Anteilen an Zusätzen bzw. dem PmB in den Asphaltgranulaten bestand kein quantitativ belegbarer Zusammenhang, obwohl Einflüsse auf die Verdichtungsarbeiten festgestellt wurden. Höhere Verdichtungswiderstände der Asphalte mit Asphaltgranulat gegenüber konventionellen Referenzasphalten konnten auf Auswirkungen von Doppelumhüllungen zurückgeführt werden. Die Erhöhung des Asphaltgranulatanteils von 25 auf 40% in den Asphalttragschichten hatte keine wesentlichen Auswirkungen auf das Verdichtungsverhalten.

Die Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat wiesen nach den Axialdehnungsraten besseres Verformungsverhalten als die konventionellen Referenzasphalte auf, wobei auf geringe positive Einflüsse durch die Zusätze und das PmB in den Asphaltgranulaten geschlossen werden konnte, obwohl auch negative Wirkungen von Doppelumhüllungen auftraten.

Die Widerstände der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat gegen Rissbildung waren, ohne erkennbare Auswirkungen der Zusätze und des PmB in den Asphaltgranulaten, nach den Querdehnungsraten kleiner bis größer im Vergleich zu denen der konventionellen Referenzasphalte. Nach den Ergebnissen der Laborversuche waren keine bis geringe positive Auswirkungen durch die Zusätze Cellulosefasern, Kieselsäure und PmB in den wiederverwendeten Fräsasphalten auf das Verdichtungs-, Verformungs- und Rissverhalten der Asphaltbetone, Asphaltbinder und der Asphalttragschichten festzustellen. Die Eignung bzw. Qualität der untersuchten Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat entsprach danach weitgehend der von konventionellen Referenzasphalten.

Es wird abschließend vorgeschlagen, die ermittelten Auswirkungen der Wiederverwendung von Asphaltgranulaten mit Zusätzen bzw. PmB unter der Variation der Produktionsparameter im großtechnischen Maßstab an Mischanlagen und in Feldversuchen über mehrere Jahre in der Praxis zu erproben.

12. Verzeichnisse

12.1 Abbildungen

- Abb. 4-1: Zusammenfassung von Untersuchungen zur Wiederverwendung von Asphalt und deren Ergebnisse, Teil 1 bis 4
- Abb. 5-1: Varianten der Erwärmung zur Auswahl des Erwärmungsverfahrens
- Abb. 5-2: Raster-Foto von Cellulosefasern, RETTENMAIER (2001)
- Abb. 5-3: REM-Aufnahme einer sprühgetrockneten Fällungskieselsäure, DEGUSSA (1985)
- Abb. 5-4: Mittlere Bindemittelgehalte der Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3 nach der Siebung auf 0/11 mm und die Erweichungspunkte Ring und Kugel der rückgewonnenen Bindemittel
- Abb. 5-5: Eigenschaften der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltgranulaten AG1, AG2 und AG3
- Abb. 5-6: Eigenschaften der neuen Bitumen der Sorten B80 und 70/100
- Abb. 5-7: Gewählte Bindemittelgehalte B und ermittelte Hohlraumgehalte H_{bit} , Raumdichten ρ_A , Rohdichten $\rho_{R,bit}$, Marshall-Stabilitäten $S_{Marshall}$ und Marshall-Fließwerte $f_{Marshall}$ der Vergleichsmischungen bzw. Referenzasphalte
- Abb. 5-8: Anteile der Asphaltgranulate und der neuen Mineralstoffe am Mischgut der Asphaltvarianten
- Abb. 5-9: Zusammensetzung der Varianten des Asphaltbetons 0/11S, des Asphaltbinders 0/16 und der Asphalttragschicht 0/32C
- Abb. 5-10: Eigenschaften des neuen Bitumens der Sorte B80 und der rückgewonnenen Bindemittel aus AG1 und aus den Asphaltbetonvarianten mit AG1 nach den Erwärmungsverfahren A, B und C
- Abb. 5-11: Bindemittelanteile des neuen Bitumens und des rückgewonnenen Bindemittels aus dem Asphaltgranulat AG1 im Asphaltbeton 0/11S infolge der Asphaltgranulatzugabe zum Mischgut
- Abb. 5-12: Komplexer Schubmodul IG^*I und Phasenverschiebungswinkel δ in Abhängigkeit von der Frequenz f im Schubwechselversuch bei 35°C des neuen Bitumens der Sorte B80 und der rückgewonnenen Bindemittel aus AG1 und aus den Asphaltbetonvarianten mit AG1 nach den Verfahren A, B und C
- Abb. 5-13: Temperaturen der neuen Mineralstoffe, des neuen Bitumens und der Asphaltgranulate AG1, AG2 und AG3 bei der Herstellung der Asphaltvarianten mit dem Erwärmungsverfahren C

- Abb. 5-14: Erreichbare Mischguttemperatur bei der Erwärmung von 20 Gew.-% Asphaltgranulat mit 180°C heißen Mineralstoffen nach BLUMER (1985)
- Abb. 5-15: Mittlere Mischguttemperaturen in °C nach einer Mischdauer von drei Minuten
- Abb. 5-16: Verdichtungsmechanismus des Gyrator-Verdichters und kreiselnde Bewegung des Probekörpers während der Verdichtung im Gyrator-Verdichter, PAULMANN und MOTZ (1984)
- Abb. 5-17: Geometrische Bedingungen am Gyrator-Verdichter nach LOEWENSTEIN (1976)
- Abb. 5-18: Typischer Verlauf des Nachlaufwinkels in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit im Gyrator-Verdichter
- Abb. 5-19: Typischer Verlauf einer Impulskriechkurve aus der Dehnung in Abhängigkeit der Lastimpulsanzahl mit zugehöriger Kurve der Dehnungsrate nach TP A-StB (1999)
- Abb. 5-20: Spannungsverlauf der Schwellbelastung bei lastgeregeltem Spaltzugschwellversuch, PAULMANN und GRÄTZ (1987)
- Abb. 5-21: Spannungsverteilung im Spaltzug-Probekörper entlang der horizontalen und vertikalen Achse
- Abb. 5-22: Probekörper mit Lastverteilungstreifen und Belastungsschema in der Lastachse des Spaltzug-Probekörpers infolge einer Flächenbelastung nach DURTH und GRÄTZ (1996)
- Abb. 5-23: Qualitativer Verlauf der Verformung, PAULMANN und GRÄTZ (1987)
- Abb. 5-24: Funktionsprinzip eines dynamischen Scherrheometers, ASPHALT INSTITUTE (1994)
- Abb. 5-25: Ansprache der Verformung und der Spannung eines viskoelastischen Burger-Fluid im Schubwechselfersuch im Bereich zwischen Hooke'schem Festkörper und Newtonscher Flüssigkeit, SCHRAMM (1995)
- Abb. 5-26: Dynamische Schwingversuche mit programmiert gesteigerter Frequenz, SCHRAMM (1995)
- Abb. 5-27: Zusammenhang zwischen komplexem Schubmodul G^* und Phasenverschiebungswinkel δ zweier Substanzen mit gleichem Widerstand gegen Scherung ($G_1^* = G_2^*$), aber unterschiedlich großen elastischen bzw. viskosen Anteilen in der Gauß'schen Zahlenebene nach LITZKA et al. (1998)
- Abb. 5-28: Kriech- und Rückholversuch an einem Burger-Fluid in Abhängigkeit der Versuchszeit, SCHRAMM (1995)
- Abb. 6-1: Verdichtungswiderstände D der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 5
- Abb. 6-2: Zusammensetzung der durch die fette Markierung u.a. in Abb. 6-3 herausgehobenen

durchschnittlich zusammengesetzten Asphaltbetone und Asphaltbinder, Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, FGSV (1993)

- Abb. 6-3: Variationsbereiche des Verdichtungswiderstandes D verschiedener Asphaltmischgutarten und -sorten, die fette Markierung gibt den Verdichtungswiderstand D eines durchschnittlich zusammengesetzten Asphaltmischguts an, Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, FGSV (1993)
- Abb. 6-4: Spezifische Verdichtungsarbeiten für das Durchlaufen des viskoelastischen Bereiches der Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3
- Abb. 6-5: Spezifische Verdichtungsarbeiten bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3
- Abb. 6-6: Axialdehnungsraten der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 nach 4.500 Lastwechseln in den Serien 1 bis 5 im Druckschwellversuch
- Abb. 6-7: Spaltzugschwellversuch bei 20°C: Querdehnungsraten im Wendepunkt der Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 5
- Abb. 6-8: Spaltzugschwellversuch bei -5°C: Querdehnungsraten im Wendepunkt der Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 1
- Abb. 7-1: Verdichtungswiderstand D von Asphaltbeton 0/11 in Abhängigkeit von Füllergehalt, Splittgehalt, Brechsandanteil und Bindemittelgehalt B nach dem Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, Theorie der Verdichtung, FGSV (1993), mit Werten des untersuchten AB 0/11S
- Abb. 7-2: Verdichtungswiderstände D der Asphaltbetonvarianten 0/11S unter Variation der Mineralstofftemperatur bei gleich bleibender Asphaltgranulattemperatur von 130°C
- Abb. 7-3: Bindemittelanteile des neuen Bitumens und der Bindemittel aus den Asphaltgranulaten infolge der Asphaltgranulatgehalte an den Mischgütern
- Abb. 7-4: Verdichtungswiderstand D der Asphaltbinder 0/16 in Abhängigkeit von Füllergehalt, Splittgehalt und Bindemittelgehalt (Bestimmtheitsmaß $B = 88,9$) nach dem Merkblatt für das Verdichten von Asphalt, Teil 2, Theorie der Verdichtung, FGSV (1993)
- Abb. 7-5: Verdichtungswiderstände D der Asphaltbindervarianten 0/16 bei Variation der Mineralstofftemperatur bei gleich bleibender Asphaltgranulattemperatur von 130°C
- Abb. 7-6: Verdichtungswiderstände D der Asphalttragschichtenvarianten 0/32C unter Variation der Mineralstofftemperatur bei gleich bleibender Asphaltgranulattemperatur von 130°C
- Abb. 7-7: Spezifische Verdichtungsarbeiten für das Durchlaufen des viskoelastischen Bereiches der Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-8: Erweichungspunkte Ring und Kugel nach DIN 52 011 der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltbetonvarianten in den Serien 1 bis 3 und aus den Asphaltgranulaten

- Abb. 7-9: Zusammenhang zwischen der spezifischen Verdichtungsarbeit für das Durchlaufen des viskoelastischen Bereiches und dem Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels der Asphaltbetonvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-10: Spezifische Verdichtungsarbeit bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels Φ für die Asphaltbetonvarianten 0/11S mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-11: Verdichtungsarbeit bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels Φ für die Asphaltbindervarianten 0/16 mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-12: Verdichtungsarbeit bis zum Erreichen des minimalen Nachlaufwinkels Φ für die Asphalttragschichtvarianten 0/32C mit AG1, AG2 und AG3 in den Serien 1 bis 5
- Abb. 7-13: Axialdehnungsraten der Asphaltbetonvarianten 0/11S nach 4.500 Lastwechseln
- Abb. 7-14: Asphaltbetonvarianten 0/11S - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den viskosen Verformungsanteilen der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 50°C in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-15: Asphaltbetonvarianten 0/11S - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Kennwerten $IG^*I/\sin \delta$ der rückgewonnenen Bindemittel im Schubwechselfersuch bei 50°C in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-16: Axialdehnungsraten der Asphaltbindervarianten 0/16 nach 4.500 Lastwechseln
- Abb. 7-17: Erweichungspunkte Ring und Kugel nach DIN 52 011 der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltbindervarianten in den Serien 1 bis 3 und aus den Asphaltgranulaten
- Abb. 7-18: Asphaltbindervarianten 0/16 - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den viskosen Verformungsanteilen der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 50°C in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-19: Axialdehnungsraten der Asphalttragschichtvarianten 0/32C nach 4.500 Lastwechseln
- Abb. 7-20: Asphalttragschichtvarianten 0/32C - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Kennwerten $IG^*I/\sin \delta$ der rückgewonnenen Bindemittel im Schubwechselfersuch bei 50°C in den Serien 1 bis 5
- Abb. 7-21: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei 20°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-22: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei 20°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in den Serien 1 bis 3

- Abb. 7-23: Asphaltbindervarianten 0/16 im Spaltzugschwellversuch bei 20°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-24: Asphaltbindervarianten 0/16 im Spaltzugschwellversuch bei 20°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in den Serien 1 bis 3
- Abb. 7-25: Asphalttragschichtvarianten 0/32C im Spaltzugschwellversuch bei 20°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in den Serien 1 bis 5
- Abb. 7-26: Asphalttragschichtvarianten 0/32C im Spaltzugschwellversuch bei 20°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in den Serien 1 bis 5
- Abb. 7-27: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei -5°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und der Lastspielzahl LSPAQ in der Asymptote (Bruchzustand) in der Serie 1
- Abb. 7-28: Asphaltbetonvarianten 0/11S im Spaltzugschwellversuch bei -5°C
Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem elastischen Verformungsanteil der rückgewonnenen Bindemittel im Schubkriechversuch bei 20°C in der Serie 1

12.2 Abkürzungen

k	Verdichtungsgrad [%]
ERuK	Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN 52 011 [°C]
PmB	Polymermodifiziertes Bitumen
AG	Asphaltgranulat
B	Bindemittelgehalt [Gew.-%]
ρ_A	Raumdicke von verdichteten Asphaltmischungen [g/cm ³]
$\rho_{R,bit}$	Rohdicke von Asphaltmischungen [g/cm ³]

Hbit	Hohlraumgehalt der verdichteten Asphaltmischung [Vol.-%]
D	Verdichtungswiderstand im Marshall-Verdichter [21 Nm]
Dg	Verdichtungswiderstand im Gyrator-Verdichter ($D_{Gyrator}$) [s]
G'	Speichermodul [Pa]
G''	Verlustmodul [Pa]
IG*I	komplexer Schubmodul [Pa]
δ	Phasenverschiebungswinkel [°]
VEPSWQ	Querdehnungsrate im Wendepunkt [-/s]
LSPAQ	Lastspielzahl in der Asymptote der Querdehnung [-]
VEPSA	Axialdehnungsrate [-/s]
$S_{Marshall}$	Marshall-Stabilität [kN]
$f_{Marshall}$	Marshall-Fließwert [mm]
S(k)	Verdichtungsarbeit [21 Nm]
α_V	Vorgabewinkel [°]
α_G	Gyratorwinkel [°]
Φ	Nachlaufwinkel [°]
d(S)	Probekörperdicke [mm] in Abhängigkeit von der aufgewendeten Verdichtungsarbeit
S	Verdichtungsarbeit [21 Nm], Anzahl der Verdichtungsschläge
d_∞	rechnerisch minimal erreichbare Probekörperdicke [mm]
d_0	rechnerische Anfangsdicke [mm] zu Beginn des Verdichtungsprozesses
P_V	senkrechter Stempeldruck = 0,7 N/mm ²
F	Querschnittsfläche = 8107,3 mm ²
Δh	Höhenabnahme des Probekörpers nach Umdrehungen U
k	Gerätekonstante = $0,0278 = \frac{4 * \pi^2}{180} * l$ (l ist der Abstand des Rollenlagers bzw. der Rollenlagerkraft zur Achse der schwenkbaren Form, vergl. Abb. 5-23)
P	Rollenlagerkraft
U	Umdrehungen
d(t)	Probekörperdicke in Abhängigkeit von der aufgewendeten Verdichtungsarbeit [mm]
t	Verdichtungsarbeit, Zeit [s]
$K_{(t)}$	Rollenlagerkraft [kN]
t	Verdichtungszeit [s]
b_0 bis b_3	Regressionskoeffizienten

c_0 bis c_4	Regressionskoeffizienten
P_0	Oberlast [N]
σ_0	Oberspannung [N/m ²]
P_U	Unterlast [N]
σ_U	Unterspannung [MN/m ²]

12.3 Literatur

AIPCR/PIARC	Les Liants Modifiés, Les Liants Avec Additifs Et Les Bitumes Spéciaux, Association mondiale de la Route, Routes, N° 303 III, Paris, 1999
Antoine, W.; Alvarez, C.	RAFTED - Recyclage á fort taux des enrobés drainants, Une expérimentation réussie de recyclage en centrale des enrobés drainants, Revue générale des routes et des aérodro- mes, RGRA.-Paris, Heft 12, 2001
Arand, W.	Hohe Granulatanteile in Asphaltdeckschichten, Teil 1: Unter- suchungen im Labormaßstab, Asphalt, Heft 1, 1996a
Arand, W.	Hohe Granulatanteile in Asphaltdeckschichten, Teil 2: Unter- suchungen im halbtechnischen Maßstab, Asphalt, Heft 2, 1996b
Arand, W.	Zur Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten, Forschungs- ergebnisse und Schlussfolgerungen, Asphalt, Heft 1, 2000
Arand, W.; Renken, P.	Grundlegende Untersuchungen über den Einfluss der Zusam- mensetzung auf die Verdichtbarkeit von Walzasphalten mittels Variation kompositioneller Merkmale zur Schaffung quantitati- ver Bewertungsmaßstäbe, Schlussbericht zum Forschungsauf- trag 8167 der AIF, Braunschweig, 1992
Arand, W.; Steinhoff, G.; Eulitz, J.	Untersuchungen über den Einfluss synthetischer Kieselsäure auf das Verhalten von Walzasphalten bei Kälte, Die Asphalt- straße, Heft 2, 1985
Asphalt Institute	Performance Graded Asphalt, Binder Specification and Testing Superpave Series No. 1 (SP-1), USA, Lexington, 1994

Augustin, H.; et al.	Prüfung von Asphalt mit dem Gyrator (CEN 227/WG1), Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - Straßenforschung, Heft 501, Wien, Österreich, 2000
Barthel, W.; et al.	Einfluss von synthetischer Kieselsäure auf die Standfestigkeit und Verformungsstabilität von Straßendecken, Das stationäre Mischwerk, Heft 6, 1981
Bellin, P.	Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program SHRP, Teil 1, Bindemittel-Spezifikationen, Bitumen, Heft 2, 1995
Bellin, P.; Tappert, A.	Randbedingungen für den Einsatz von Fräsasphalt in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten, Straße und Autobahn, Heft 5, 1992
Betz, V.; et al.	Optimierung von Recyclingasphalten im Heißverfahren, Schriftenreihe Straßenforschung, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 1997
Blumer, M.	Wiederverwendung von Belagsmaterial, Die Asphaltstraße, Heft 4, 1985
Charif, K.	Wiederverwendung von Ausbauasphalt in Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten - Untersuchungen zum Langzeitverhalten Bitumen, Heft 3, 1992
DAV	Asphaltproduktion in Deutschland, Tabelle, Deutscher Asphaltverband e.V., DAV, Stand 8/2000
Degussa	Sipernat-Asphalt, Schriftenreihe Pigmente, Nummer 46, Degussa AG, Frankfurt, 1985
DIN 1996 Teil 6	Prüfung von Asphalt, Bestimmung des Bindemittelgehaltes und Rückgewinnung des Bindemittels, Deutsches Institut für Normung e.V., 1988
DIN 1996 Teil 20	Prüfung von Asphalt, Herstellung von Asphaltmischgut im Laboratorium, Deutsches Institut für Normung e.V., 1992
DIN 4226	Zuschlag für Beton, Deutsches Institut für Normung e.V., 1983
DIN 52000	Bitumen und Steinkohleteerpech, Prüfung der Bindemittel, Deutsches Institut für Normung e.V., 1989
DIN EN 12591	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Anforderungen an Straßenbaubitumen, Deutsches Institut für Normung e.V., 1999
DIN EN 12697-31	Entwurf, Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 31: Herstellung von Probekörpern - Gyrator-Verdichter, Deutsche

- Fassung prEN 12697-31 : 2000, Deutsches Institut für Normung e.V., 2000
- Dröge, C. Ausbauasphalt in Deckschichten - Ergebnisse von Erprobungsstrecken, Straße und Autobahn, Heft 5, 2001
- Drüschner, L. Praktische Bedeutung der Wiederverwendung von Asphalt, Asphaltstraßentagung 2001, Vorträge der Tagung der Arbeitsgruppe Asphaltstraßen am 29. und 30. Mai in Neu-Ulm, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 35, 2001
- Durth, W. Zur Entwicklung der Asphaltwiederverwendung, Das stationäre Mischwerk, Heft 2, 1979
- Durth, W.; et al. Wiederverwendung einer bituminösen Fahrbahnbefestigung auf der BAB 48 - Erprobungsstrecke Gießen, Straße und Autobahn, Heft 4, 1979
- Durth, W.; Grätz, B. Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Heft 723, 1996
- Erhardt, H. Wiederverwendung von Asphalt, Ein Bericht zum Asphalt-Seminar 1985, Die Asphaltstraße, Heft 5, 1985
- Freund, H.-J. Auswirkungen der Wiederverwendung von Ausbauasphalt auf das Langzeitverhalten von Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten, Bitumen, Heft 3, 1990
- Fromm, H. J.; Bean, D. C.; Miller, L. Sulphur-Asphalt Pavements Performance and Recycling Kurzfassung des Berichts anlässlich der Jahrestagung der Association of Asphalt Paving Technologists, San Diego, USA, in: Bitumen, Heft 2, 1981
- Gauer, P. K. Kälteverhalten von Asphalten mit synthetischer Kieselsäure, Bitumen, Heft 2, 1984
- Gauer, P. K. Eine Analyse der Verdichtungswilligkeit und des Verformungswiderstandes von bituminösem Mischgut bei der Verdichtung im Gyrator, Dissertation, Darmstadt, 1975
- Gerardu, J.J.A.; Vizi, L. Recycling von Asphalt in konventionellen Aufbereitungsanlagen in den Niederlanden, Bitumen, Heft 3, 1982

- Gragger, F. Wiederverwendung von bituminösem Mischgut in stationären Mischanlagen, Die Asphaltstraße, Heft 6, 1982
- Grätz, B. Widerstand von Asphalt gegen Rissbildung - prüftechnische Ansprache mit dem Spaltzugschwellversuch - Kolloquium „Prüfung und Bewertung von Konstruktionsschichten im Straßenbau“, Schriftenreihe des Lehrstuhls Straßenbau der TU Dresden, Heft 7, 1998
- Haak, G.; et al. Wiederverwendung von ausgebautem Asphaltmaterial und dessen Gebrauchsverhalten auf zwei Untersuchungsstrecken. Teil 1: BAB A 48, Teil 2: Stadtstraße in Köln-Deutz, Bundesanstalt für Straßenwesen, 1997
- Hadipour, K.; Anderson, K. O. An Evaluation of Permanent Deformation and Low Temperature Characteristics of some Recycled Asphalt Concrete Mixtures Kurzfassung in Bitumen, Heft 1, 1988
- Hartmann, R. Ausbauasphalt in Deckschichten, Straßen- und Tiefbau, 1989
- Hartner, O. Polymermodifizierte Bitumen, Die Asphaltstraße, Heft 2, 1993
- Herr, B. Einfluss des Lösungsmittels auf die Eigenschaften von polymermodifiziertem Bitumen, Asphalt, Heft 6, 1999
- Hinterwäller, U. Ein Beitrag zur Beurteilung stabilisierender Zusätze in Splittmastixasphalt durch Untersuchungen im Laboratorium, Dissertation, Darmstadt 1994
- Hou, X. Analyse der bleibenden Verformungen des Asphalts unter statischer und dynamischer Belastung zur Vorhersage von Spurrinnen, Dissertation, Darmstadt, 1996
- Hou, X.; Grätz, B. Datenverarbeitungsverfahren der Messergebnisse des Gyrator-Versuchs, Versuchsanstalt für Straßenwesen der TU Darmstadt, unveröffentlicht, 1997
- Huschek, S. Der Mischprozess von Asphalt bei der Mitverwendung von Asphaltgranulat, Untersuchungen mit Hilfe eines Modellmischers, Bitumen, Heft 2, 1992
- Kandhal, S. P.; et al. Performance of recycled Hot Mix Asphalt Mixtures, National Center for Asphalt Technology of Auburn University and Georgia Department of Transportation, NCAT Report No. 95-1, USA, 1995
- Kiuntke, M. Bewährung von Asphaltbefestigungen mit hohen Anteilen von Ausbauasphalt, Veröffentlichungen des Institutes für Straßen-

- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 46, 1996
- Kolb, K. H. Die Beurteilung von polymermodifiziertem Bitumen und polymermodifiziertem Asphalt im Laboratorium, Dissertation, Darmstadt, 1984
- Krass, K. Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen im Straßenbau (RuA-StB), Straße und Autobahn, Heft 5, 2001
- Krass, K.; Jungfeld, I.; Trogisch, H. Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1999, Teil 1: Recycling-Baustoffe, Straße und Autobahn, Heft 1, 2002
- Krass, K.; Jungfeld, I.; Trogisch, H. Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1999, Teil 2: Industrielle Nebenprodukte, Straße und Autobahn, Heft 2, 2002
- Krass, K.; Kellermann, C.; Rohleder, M. Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1997, Teil 1: Recycling-Baustoffe, Straße und Autobahn, Heft 8, 1999
- Krass, K.; Kellermann, C.; Rohleder, M. Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1997, Teil 2: Industrielle Nebenprodukte, Straße und Autobahn, Heft 9, 1999
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG vom 27.09.1994, BGBl, Teil 1, S. 22705 ff., 1994
- Lehné, R. Erprobungsstrecke Heerstraße (B2/B5), mit einer neuen Asphaltbinder-Variante (Wiederverwendung von Ausbauasphalt bis zu max. 40 Masse-%), Bitumen, Heft 2, 2001
- Leykauf, G. Ausbauasphalt für Asphaltoberbau und Foundationsschichten, Bitumen, Heft 2, 1988
- Litzka, J.; Strobl, R.; Pass, F.; Augustin, H. Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung, Mitteilungen, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, 1998
- Loewenstein, H.-H. Granulometrische Veränderungen von korngestuftem Mineralstoffgemischen bei mechanischer Beanspruchung im Laboratorium, Dissertation, Darmstadt, 1976

- McDaniel, R.; Anderson, R. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement: Superpave Mix Design Method: Guidelines, National Cooperative Highway Research Program, Research Results Digest Number 253, Transportation Research Board, USA, 2001
- Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1998
- Merkblatt für die Verdichtung von Asphalt, Teil 2, Theorie der Verdichtung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1993
- Merkblatt für die Lieferung von Asphaltgranulat, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1990
- Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat MVAG, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2000
- Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2, Behandlung von abweichenden Messwerten (Ausreißern), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1978
- Müller, K. H.; Barthel, W. Synthetische Kieselsäure - ein hochwertiger Verstärkerfüllstoff für Asphalt, Die Asphaltstraße, Heft 6, 1990
- NCHRP REPORT 452 Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Superpave Mix Design Method: Technician's Manual, McDaniel, R., Anderson, R. M., National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, USA, 2001
- Pätzold, H. Wiederverwenden von Asphalt, DAV-Schriftenreihe: Asphalt - der Baustoff zum Wiederverwenden, Deutscher Asphaltverband, Bonn, Oktober 1997
- Paulmann, G.; Grätz, B. Verformungs- und Zeitfestigkeitsverhalten von Tragschichtmischgut mit und ohne Zusatz von Asphaltgranulat bei Biegeschwellbeanspruchung im DYN-System VA, Bitumen, Heft 3, 1987
- Paulmann, G.; Grätz, B.; Suß, G. Vergleichende Untersuchungen über die Verdichtbarkeit und den Verformungswiderstand von Asphalt mit synthetischer Kieselsäure, Straße und Autobahn, Heft 11, 1983
- Paulmann, G.; Kolb, K. H. Einfluss von Polymerzusätzen auf den Verformungswiderstand bituminöser Deckschichten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Heft

- 441, 1985
- Paulmann, G.; Motz, H. Verdichtungs- und Verformungsverhalten von Asphaltbeton, Bitumen, Heft 4, 1984
- Paulmann, G.; Motz, H. Weiterführung und Erprobung von Untersuchungsverfahren zur Ermittlung der Einflüsse auf den Verformungswiderstand bituminöser Massen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Heft 441, 1985
- Potts, C. F.; et al. Asphalt Emulsion Hot-Mix Recycling Project: Analysis and Development of Guidelines, Kurzfassung des Berichts anlässlich der Jahrestagung der Association of Asphalt Paving Technologists, San Diego, USA, in: Bitumen, Heft 2, 1981
- RAL-RG 544/4 RAL Kalksteinmehl als Füller für den Straßenbau, Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung, 1982
- Reinboth, K. Die Wiederverwendung von Asphalt - Technologie, Ökonomie und Ökologie - Teil 1, Straße und Autobahn, Heft 1, 2001
- Reinboth, K. Die Wiederverwendung von Asphalt - Technologie, Ökonomie und Ökologie - Teil 2, Straße und Autobahn, Heft 11, 2002
- Renken, P. Einfluss des Verfahrens zur Wiedererwärmung von Asphalten auf die Eigenschaften des Bindemittels, Asphalt, Heft 8, 1996
- Rettenmaier, J.; & Söhne VIATOP, Fasergranulate für den Straßenbau, Produktinformation der J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co., Holzmühle b. Ellwangen, 2001
- RG Min-StB 83 Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1983
- RStO 01 Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001
- RuA-StB 01 Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001
- Sachs, L. Angewandte Statistik, Anwendung statistischer Methoden, 7. Auflage, Springer-Verlag, 1992
- Schneider, U. Polymermodifizierte Asphalte - Internationale Forschungsergebnisse über Modifizierungsmöglichkeiten und Eigen-

- schaften nach Vorträgen anlässlich der Gestrata-Tagungen in Wien im September und in Salzburg im November 1990, Bitumen 1/92
- Schramm, G. Einführung in Rheologie und Rheometrie, Gebrüder Haake GmbH, Karlsruhe, 1995
- Stuart, K. D.; Mogawer, W. S.; Romero, P. FHWA-RD-99-204, Validation of Asphalt Binder and Mixture Tests That Measure Rutting Susceptibility, Appendix A: Descriptions of the Accelerated Loading Facility (ALF), Selected Laboratory Mixture Tests used to measure rutting Potential and linear kneading Compactor, Federal Highway Administration, McLean, USA, 2000
- TL Min-StB 2000 Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (Gesteinskörnungen und Werksteine im Straßenbau) TL Min-StB 2000, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2000
- TL-PmB Teil 1 Technischen Lieferbedingungen für polymermodifizierte Bitumen in Asphaltsschichten im Heißeinbau, Teil 1: Gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen, TL-PmB Teil 1, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1991
- TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1999
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Comparison of Rehabilitation Strategies for AC Pavements, Techbrief: Publication No. FHWA-RD-00-166, McLean, USA, 2000
- Whitcomb, W.; Hicks, R. G.; Escobar, S. J. Evaluation of a unified Design for Asphalt Recycling by means of Dynamic and Fatigue Testing
Kurzfassung des Berichts anlässlich der Jahrestagung der Association of Asphalt Paving Technologists, San Diego, USA, in: Bitumen, Heft 2, 1981
- Zenke, G. Polymer-modifizierte Straßenbaubitumen im Spiegel von Literaturergebnissen - Versuch eines Resümees (Teil III), Die Asphaltstraße, Heft 6, 1985

ZTV Asphalt-StB 01	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt ZTV Asphalt-StB 01, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001
ZTVT-StB 95	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau ZTVT-StB 95, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1995

13. Anlagen

A 1 Rezepturen und Sieblinien der Referenzmischungen

- A 1.1: Rezeptur für Asphaltbeton 0/11S
- A 1.2: Rezeptur für Asphaltbinder 0/16
- A 1.3: Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32C
- A 1.4: Sieblinie der Asphaltbetone 0/11S im Sieblinienband nach den ZTV Asphalt-StB 01
- A 1.5: Sieblinie der Asphaltbinder 0/16 im Sieblinienband nach den ZTV Asphalt-StB 01
- A 1.6: Sieblinie der Asphalttragschichten 0/32C im Sieblinienband nach den ZTVT-StB 95

A 2 Stück- und Korngrößenverteilungen der Asphaltgranulate

- A 2.1: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats AG1 nach der Absiebung der Stücke größer 11 mm
- A 2.2: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats AG2 nach der Absiebung der Stücke größer 11 mm
- A 2.3: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats AG3 nach der Absiebung der Stücke größer 11 mm
- A 2.4: Mittlere Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats AG1
- A 2.5: Mittlere Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats AG2
- A 2.6: Mittlere Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats AG3

A 3 Rezepturen der Asphalte mit Asphaltgranulat

- A 3.1: Rezeptur für Asphaltbeton 0/11 S mit 20% Asphaltgranulat AG1

- A 3.2: Rezeptur für Asphaltbeton 0/11 S mit 20% Asphaltgranulat AG2
- A 3.3: Rezeptur für Asphaltbeton 0/11 S mit 20% Asphaltgranulat AG3
- A 3.4: Rezeptur für Asphaltbinder 0/16 mit 20% Asphaltgranulat AG1
- A 3.5: Rezeptur für Asphaltbinder 0/16 mit 20% Asphaltgranulat AG2
- A 3.6: Rezeptur für Asphaltbinder 0/16 mit 20% Asphaltgranulat AG3
- A 3.7: Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 25% Asphaltgranulat AG1
- A 3.8: Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 25% Asphaltgranulat AG2
- A 3.9: Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 25% Asphaltgranulat AG3
- A 3.10: Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 40% Asphaltgranulat AG1
- A 3.11: Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 40% Asphaltgranulat AG2
- A 3.12: Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 40% Asphaltgranulat AG3

A 4 Konventionelle Bindemittleigenschaften

- A 4.1: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG1 der Verfahren A, B und C (Serie 1) nach DIN 52 000
- A 4.2: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG2 im Verfahren C (Serie 1) nach DIN 52 000
- A 4.3: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG3 im Verfahren C (Serie 1) nach DIN 52 000
- A 4.4: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG1 im Verfahren C (Serie 2) nach DIN 52 000
- A 4.5: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG2 im Verfahren C (Serie 2) nach DIN 52 000
- A 4.6: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG3 im Verfahren C (Serie 2) nach DIN 52 000
- A 4.7: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG1 im Verfahren C (Serie 3) nach DIN 52 000
- A 4.8: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG2 im Verfahren C (Serie 3) nach DIN 52 000
- A 4.9: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG3 im Verfahren C (Serie 3) nach DIN 52 000
- A 4.10: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphalttragschichtvarianten 0/32C mit 25% Asphaltgranulat im Verfahren C (Serie 4) nach DIN 52 000
- A 4.11: Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphalttragschichtvarianten 0/32C mit 40% Asphaltgranulat im Verfahren C (Serie 5) nach DIN 52 000

A 5 Schubkriech- und Schubwechselversuche mit dem dynamischen Scherrheometer

- A 5.1: Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ des Bitumens B80, der rückgewonnenen Bindemittel aus AG1 und aus den Asphaltvarianten mit AG1 nach den Verfahren A, B und C in der Serie 1 im Schubkriechversuch bei 20°C
- A 5.2: Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ des Bitumen B80, des Bitumens 70/100 und der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in der Serie 1 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
- A 5.3: Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in der Serie 2 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
- A 5.4: Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in der Serie 3 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
- A 5.5: Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in den Serien 4 und 5 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
- A 5.6: Komplexer Schubmodul IG^*I , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*I/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' des Bitumens B80 und der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 1 im Schubwechselversuch bei 35°C
- A 5.7: Komplexer Schubmodul IG^*I , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*I/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' des Bitumens B80 und der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 1 im Schubwechselversuch bei 50°C
- A 5.8: Komplexer Schubmodul IG^*I , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*I/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 2 im Schubwechselversuch bei 35°C
- A 5.9: Komplexer Schubmodul IG^*I , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*I/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 2 im Schubwechselversuch bei 50°C
- A 5.10: Komplexer Schubmodul IG^*I , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert

$IG^*/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 3 im Schub-Wechselversuch bei 35°C

- A 5.11: Komplexer Schubmodul IG^* , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 3 im Schub-wechselversuch bei 50°C
- A 5.12: Komplexer Schubmodul IG^* , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 4 im Schub-wechselversuch bei 35°C
- A 5.13: Komplexer Schubmodul IG^* , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 4 im Schub-wechselversuch bei 50°C
- A 5.14: Komplexer Schubmodul IG^* , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 5 im Schub-wechselversuch bei 35°C
- A 5.15: Komplexer Schubmodul IG^* , Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $IG^*/\sin \delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 5 im Schub-wechselversuch bei 50°C

A 6 Verdichtungswiderstände D (Marshall-Gerät)

- A 6.1: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Verdichtungswiderständen D der Asphaltbetonvarianten 0/11S
- A 6.2: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Verdichtungswiderständen D der Asphaltbindervarianten 0/16
- A 6.3: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Verdichtungswiderständen D der Asphalttragschichtvarianten 0/32C

A 7 Nachlaufwinkel (Gyrator-Verdichter)

- A 7.1: Nachlaufwinkel der AB 0/11S und AB 0/11S + 20% AG1, Serien 1 bis 3
- A 7.2: Nachlaufwinkel der AB 0/11S und AB 0/11S + 20% AG2, Serien 1 bis 3

- A 7.3: Nachlaufwinkel der AB 0/11S und AB 0/11S + 20% AG3, Serien 1 bis 3
- A 7.4: Nachlaufwinkel der Bi 0/16 und Bi 0/16 + 20% AG1, Serien 1 bis 3
- A 7.5: Nachlaufwinkel der Bi 0/16 und Bi 0/16 + 20% AG2, Serien 1 bis 3
- A 7.6: Nachlaufwinkel der Bi 0/16 und Bi 0/16 + 20% AG3, Serien 1 bis 3
- A 7.7: Nachlaufwinkel der TS 0/32C und TS 0/32C + 25% AG1, Serien 1 bis 4
- A 7.8: Nachlaufwinkel der TS 0/32C und TS 0/32C + 25% AG2, Serien 1 bis 4
- A 7.9: Nachlaufwinkel der TS 0/32C und TS 0/32C + 25% AG3, Serien 1 bis 4
- A 7.10: Nachlaufwinkel der TS 0/32C und TS 0/32C + 40% AG1, Serien 1 bis 3 und 5
- A 7.11: Nachlaufwinkel der TS 0/32C und TS 0/32C + 40% AG2, Serien 1 bis 3 und 5
- A 7.12: Nachlaufwinkel der TS 0/32C und TS 0/32C + 40% AG3, Serien 1 bis 3 und 5

A 8 Verdichtungsarbeiten (Durchlauf des viskoelastischen Bereiches)

- A 8.1: Verdichtungsarbeit (Durchlauf des viskoelastischen Bereiches), Asphaltbetonvarianten 0/11S, Serien 1 und 2
- A 8.2: Verdichtungsarbeit (Durchlauf des viskoelastischen Bereiches), Asphaltbetonvarianten 0/11S, Serie 3

A 9 Verdichtungsarbeiten (minimaler Nachlaufwinkel)

- A 9.1: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphaltbetonvarianten 0/11S, Serien 1 und 2
- A 9.2: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphaltbetonvarianten 0/11S, Serie 3
- A 9.3: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphaltbindervarianten 0/16, Serien 1 und 2
- A 9.4: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphaltbindervarianten 0/16, Serie 3
- A 9.5: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschichtvarianten 0/32C + 25 AG, Serien 1 und 2
- A 9.6: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschichtvarianten 0/32C + 25 AG, Serien 3 und 4
- A 9.7: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschichtvarianten 0/32C + 40 AG, Serien 1 und 2
- A 9.8: Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschichtvarianten

A 10 Druckschwellversuche

- A 10.1: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Axialdehnungsraten VEPSWA nach 4.500 Lastwechsel der Asphaltbetonvarianten 0/11S
- A 10.2: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Axialdehnungsraten VEPSWA nach 4.500 Lastwechsel der Asphaltbindervarianten 0/16
- A 10.3: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Axialdehnungsraten VEPSWA nach 4.500 Lastwechsel der Asphalttragschichtvarianten 0/32C

A 11 Spaltzugschwellversuche

- A 11.1: Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serie 1
- A 11.2: Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serie 2
- A 11.3: Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serie 3
- A 11.4: Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serien 4 und 5
- A 11.5: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt VEPSWQ der Asphaltbetonvarianten 0/11S
- A 11.6: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Lastspielzahlen in der Asymptote der Querverformung LSPAQ der Asphaltbetonvarianten 0/11S
- A 11.7: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt VEPSWQ der Asphaltbindervarianten 0/16
- A 11.8: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Lastspielzahlen in der Asymptote der Querverformung LSPAQ der Asphaltbindervarianten 0/16
- A 11.9: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt VEPSWQ der Asphalttragschichtvarianten 0/32C
- A 11.10: Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Lastspielzahlen in der Asymptote der Querverformung LSPAQ der Asphalttragschichtvarianten 0/32C

A 12 Zusammenhänge zwischen Bindemittel- und Asphalteigenschaften

- A 12.1: Asphaltbindervarianten 0/16 - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Nadelpenetrationen der rückgewonnenen Bindemittel in den Serien 1 bis 3
- A 12.2: Asphaltbindervarianten 0/16 - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Kennwerten $IG^*/\sin\delta$ der rückgewonnenen Bindemittel im Schubwechselversuch bei 50°C in den Serien

1 bis 3

A 12.3: Asphaltbindervarianten 0/16 im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem Brechpunkt nach Fraaß der rückgewonnenen Bindemittel in den Serien 1 bis 3

A 1.1
Rezeptur für Asphaltbeton 0/11S

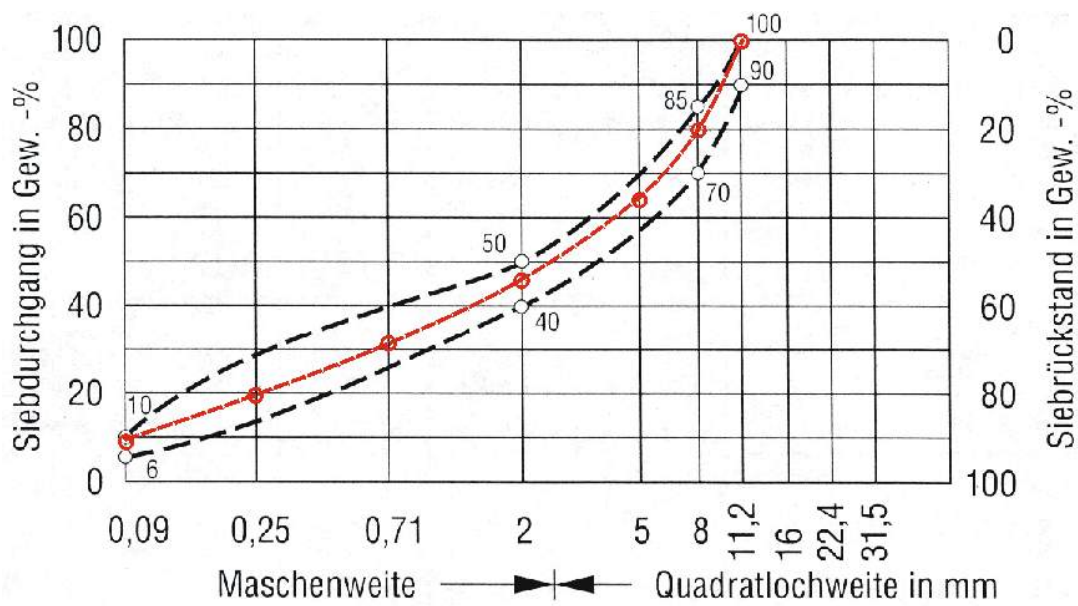
Mineral- stoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natursand			gebrochene Mineralstoffe						Sieb- durch- gang	ZTV Asphalt- StB 01
					Brechsand			Splitt				
Prüfkorn- größe/ Korn- klasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11		
11,2										100,0	100,0	≥ 90
8,0									100,0	0,0	79,0	≤ 85
5,0								100,0	0,0		64,0	
2,0				100,0			100,0	0,0			45,0	40 - 50
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0				31,0	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0					20,0	
0,09	100,0	0,0			0,0						9,0	6 -10
0,063	0,0										0,0	
Gew.-%	9,0	4,0	4,0	4,0	7,0	7,0	10,0	19,0	15,0	21,0		

A 1.2
Rezeptur für Asphaltbinder 0/16

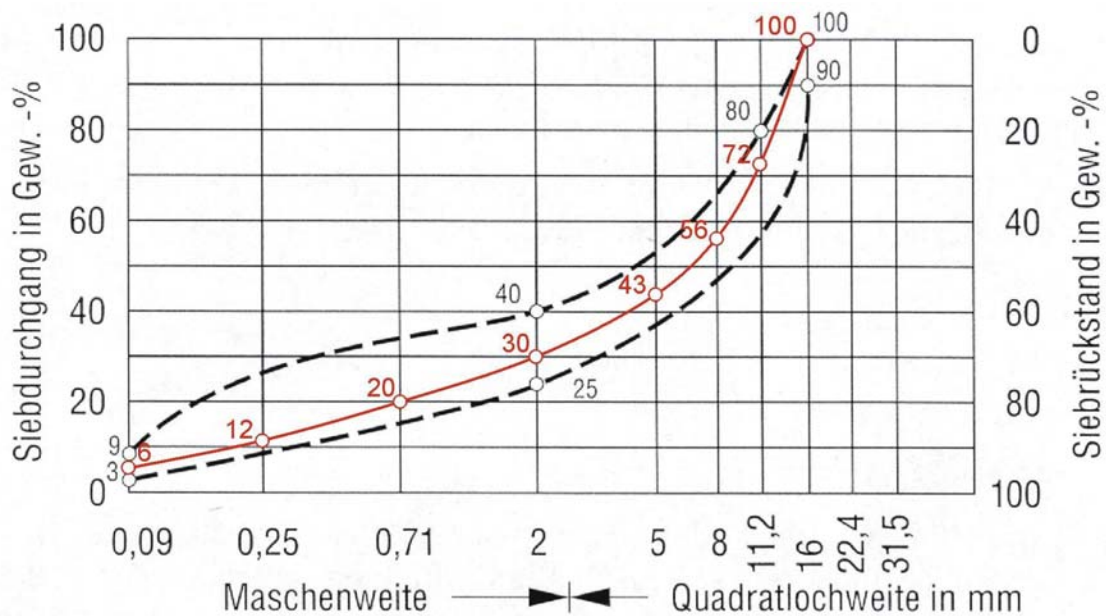
Mineral- stoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natursand			gebrochene Mineralstoffe								Sieb- durch- gang	ZTV Asphalt- StB 01
					Brechsand			Splitt						
Prüfkorn- größe/ Korn- klasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16			
16,0											100,0	100,00	≥ 90	
11,2										100,0	0,0	72,00	≤ 80	
8,0									100,0	0,0		56,00		
5,0							100,0	0,0				43,00		
2,0				100,0			100,0	0,0				30,00	25 - 40	
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0					20,00		
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0						12,00		
0,09	100,0	0,0			0,0							6,00	3 - 9	
0,063	0,0											0,00		
Gew.-%	6,0	2,0	2,0	4,0	4,0	6,0	6,0	13,0	13,0	16,0	28,0			

A 1.3
Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32C

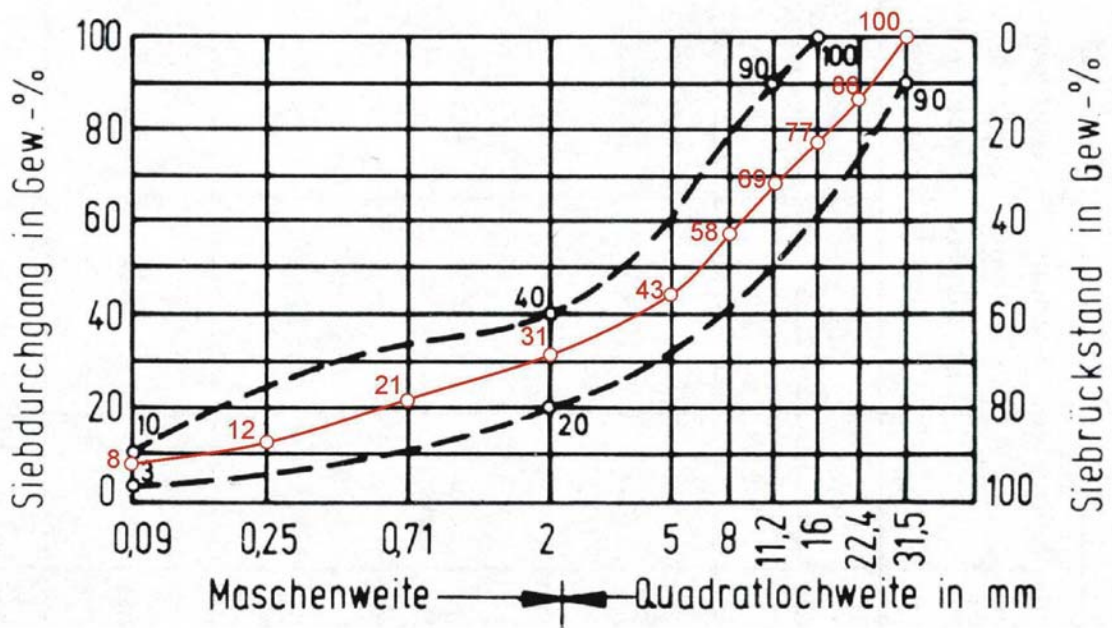
Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natursand			gebrochene Mineralstoffe										Siebdurchgang	ZTVT-StB 95
		0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt								
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]	0/0,09	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	22/32			
31,5													100,0	100,0	≥ 90	
22,4												100,0	0,0	86,0	≤ 90	
16,0											100,0	0,0		77,0		
11,2										100,0	0,0			69,0		
8,0									100,0	0,0				58,0		
5,0								100,0	0,0					43,0		
2,0				100,0			100,0	0,0						31,0	20 - 40	
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0							21,0		
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0								12,0		
0,09	100,0	0,0			0,0									8,0	3 - 10	
0,063	0,0													0,00		
Gew.-%	8,0	1,0	1,0	1,0	3,0	8,0	9,0	12,0	15,0	11,0	8,0	9,0	14,0			



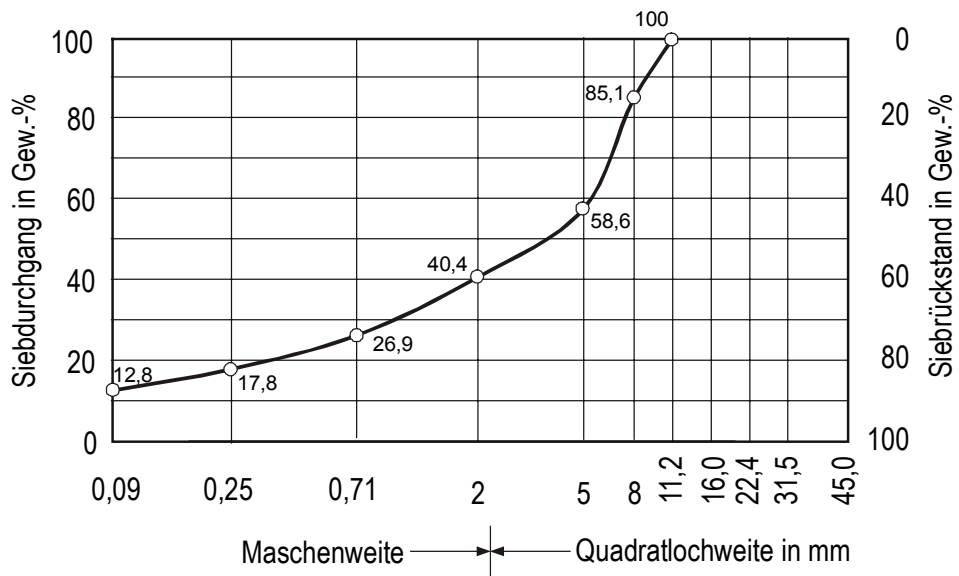
A 1.4	Sieblinie der Asphaltbetone 0/11S im Sieblinienband nach den ZTV Asphalt-StB 01
-------	---



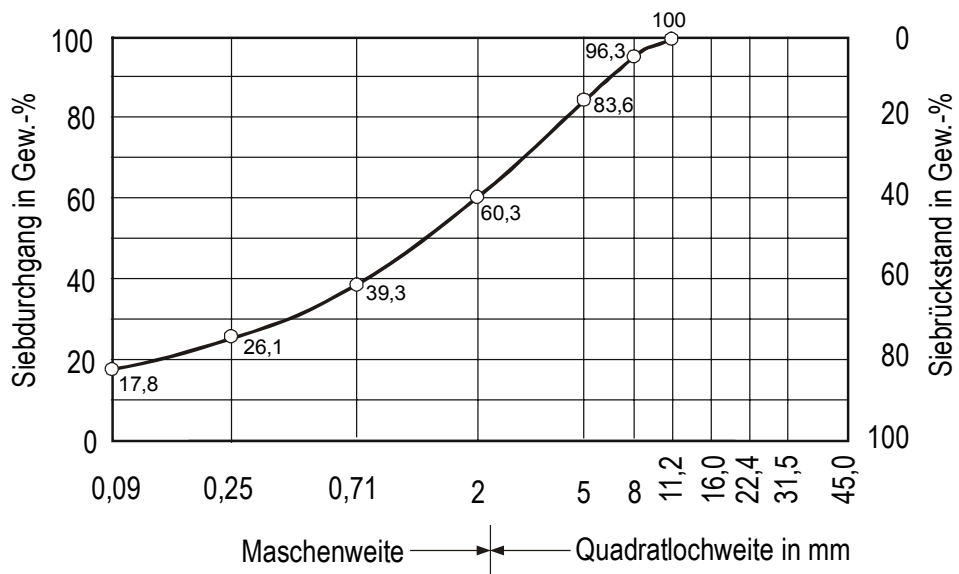
A 1.5	Sieblinie der Asphaltbinder 0/16 im Sieblinienband nach den ZTV Asphalt-StB 01
-------	--



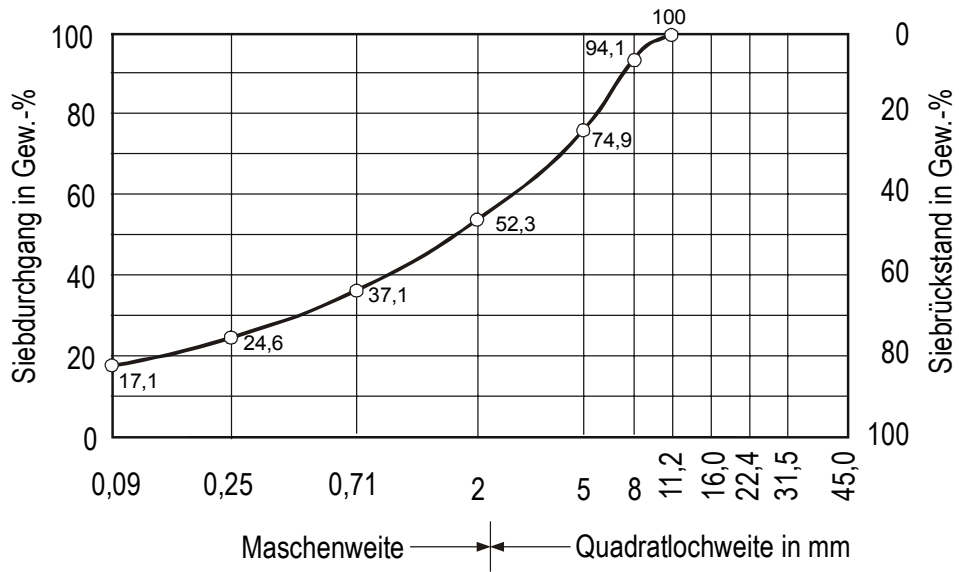
A 1.6	Sieblinie der Asphalttragschichten 0/32C im Sieblinienband nach den ZTVT-StB 95
-------	---



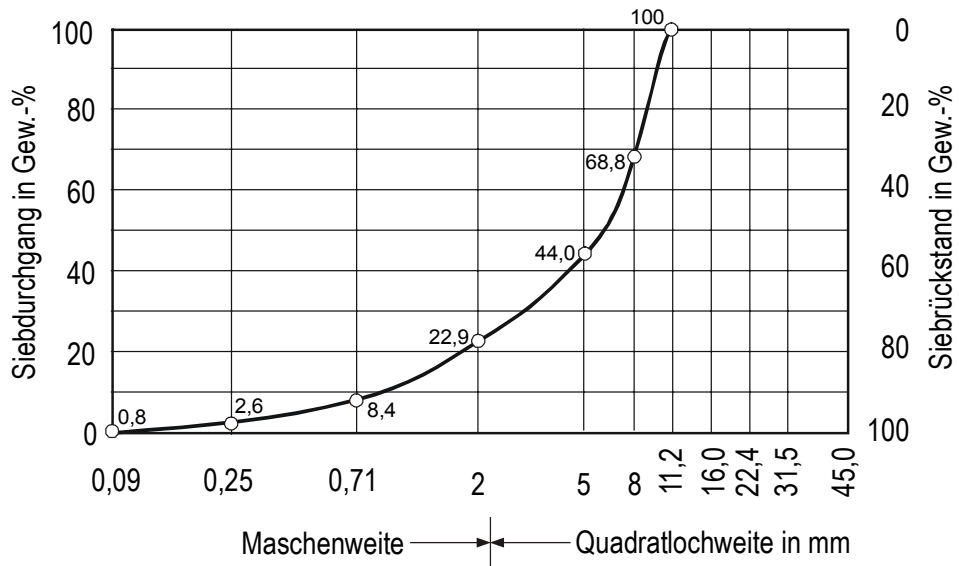
A 2.1	Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats AG1 nach der Absiebung der Stücke größer 11 mm
-------	---



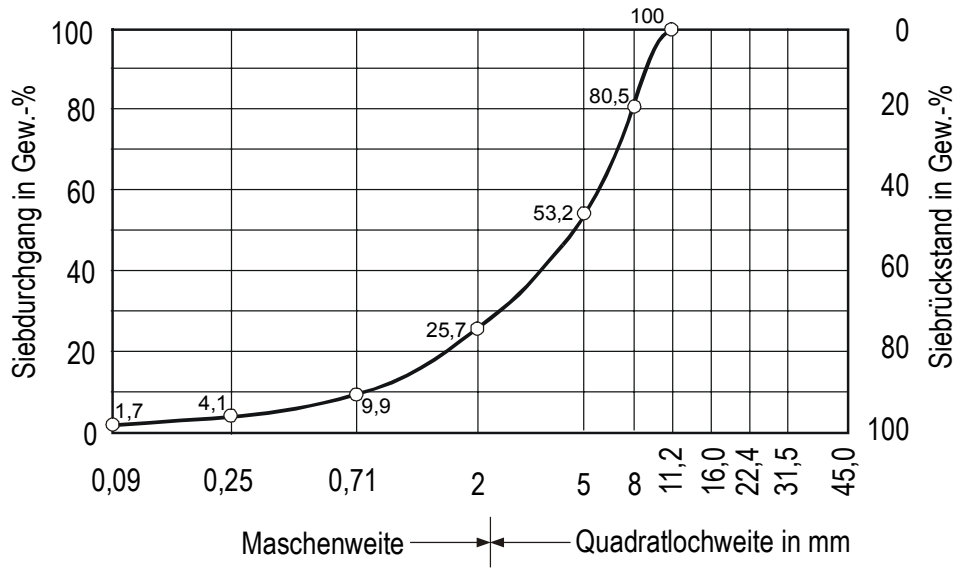
A 2.2	Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats AG2 nach der Absiebung der Stücke größer 11 mm
-------	---



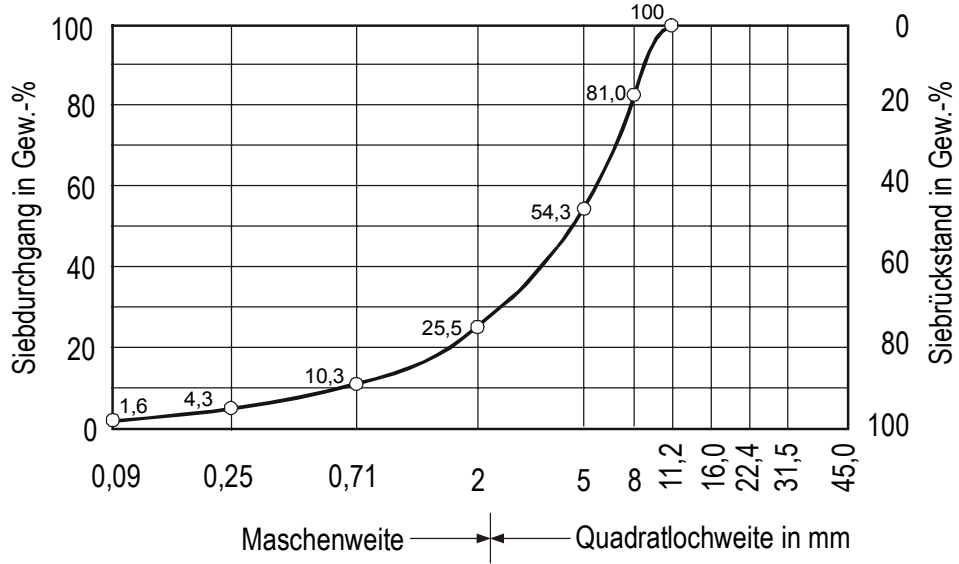
A 2.3	Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats AG3 nach der Absiebung der Stücke größer 11 mm
-------	---



A 2.4	Mittlere Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats AG1
-------	--



A 2.5	Mittlere Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats AG2
-------	--



A 2.6	Mittlere Korngrößenverteilung des Asphaltgranulats AG3
-------	--

A 3.1
 Rezeptur für Asphaltbeton 0/11S mit 20% Asphaltgranulat AG1

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natursand			gebrochene Mineralstoffe						Asphaltgranulat AG1	Siebdurchgang	ZTV Asphalt- StB 01
		0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	Brechsand		Splitt						
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/ 0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	0/11		
11,2										100,0	100,0	100,0	≥ 90
8,0									100,0	0,0	85,1	79,0	≤ 85
5,0								100,0	0,0		58,6	64,0	
2,0				100,0			100,0	0,0			40,4	45,0	40 - 50
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0				26,9	31,0	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0					17,8	20,0	
0,09	100,0	0,0			0,0						12,8	9,0	6 - 10
0,063	0,0										0,0	0,0	
Gew.-%	6,57	4,00	4,00	4,00	6,05	5,27	7,44	15,55	9,97	18,17	18,98		

A 3.2

Rezeptur für Asphaltbeton 0/11 S mit 20% Asphaltgranulat AG2

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoffe						Asphaltgranulat AG2	Siebdurchgang	ZTV Asphalt-StB 01
		Brechsand	Splitt										
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	0/11		
11,2										100,0	100,0	100,0	≥ 90
8,0									100,0	0,0	96,3	79,0	≤ 85
5,0								100,0	0,0		83,6	64,0	
2,0				100,0			100,0	0,0			60,3	45,0	40 - 50
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0				39,3	31,0	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0					26,1	20,0	
0,09	100,0	0,0			0,0						17,8	9,0	6 - 10
0,063	0,0										0,0	0,0	
Gew.-%	5,64	3,40	3,40	3,40	6,04	5,11	6,64	14,60	12,61	20,30	18,86		

A 3.3
Rezeptur für Asphaltbeton 0/11 S mit 20% Asphaltgranulat AG3

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoffe						Asphaltgranulat AG3	Sieb- durch- gang	ZTV Asphalt- StB 01
		Brechsand	Splitt										
Prüfkorn- größe/ Korn- klasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	0/11		
11,2										100,0	100,0	100,0	≥ 90
8,0									100,0	0,0	94,1	79,0	≤ 85
5,0								100,0	0,0		74,9	64,0	
2,0				100,0			100,0	0,0			52,3	45,0	40 - 50
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0				37,1	31,0	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0					24,6	20,0	
0,09	100,0	0,0			0,0						17,1	9,0	6 - 10
0,063	0,0										0,0	0,0	
Gew.-%	5,79	4,00	4,00	4,00	5,59	4,66	7,14	14,76	11,40	19,89	18,77		

A 3.4

Rezeptur für Asphaltbinder 0/16 mit 20% Asphaltgranulat AG1

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoffe							Asphaltgranulat AG1	Siebdurchgang	ZTV Asphalt- StB 01
		0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt						
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]	0/0,09	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16	0/11		
16,0											100,0		100,0	≥ 90
11,2										100,0	0,0	100,0	72,0	≤ 80
8,0									100,0	0,0		85,1	56,0	
5,0							100,0	0,0				58,6	43,0	
2,0			100,0			100,0	0,0					40,4	30,0	25 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0					26,9	20,0	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0						17,8	12,0	
0,09	100,0	0,0			0,0							12,8	6,0	3 - 9
0,063	0,0											0,0	0,0	
Gew.-%	3,57	2,00	2,00	4,00	3,05	4,27	3,44	9,55	7,97	13,17	28,00	18,98		

A 3.5
 Rezeptur für Asphaltbinder 0/16 mit 20% Asphaltgranulat AG2

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natursand			gebrochene Mineralstoffe								Asphaltgranulat AG2	Siebdurchgang	ZTV Asphalt-StB 01
		0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt						
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]					0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16	0/11			
16,0											100,0		100,0	≥ 90	
11,2										100,0	0,0	100,0	72,0	≤ 80	
8,0									100,0	0,0		96,3	56,0		
5,0							100,0	0,0				83,6	43,0		
2,0				100,0			100,0	0,0				60,3	30,0	25 - 40	
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0					39,3	20,0		
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0						26,1	12,0		
0,09	100,0	0,0			0,0							17,8	6,0	3 - 9	
0,063	0,0											0,0	0,0		
Gew.-%	2,64	1,75	1,40	3,00	2,69	4,11	3,04	8,60	10,61	15,30	28,00	18,86			

A 3.6
 Rezeptur für Asphaltbinder 0/16 mit 20% Asphaltgranulat AG3

Mineral- stoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natursand			gebrochene Mineralstoffe							Asphalt- granulat AG3	Sieb- durch- gang	ZTV Asphalt- StB 01
					Brechsand	Splitt								
Prüfkorn- größe/ Korn- klasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16	0/11		
16,0											100,0		100,0	≥ 90
11,2										100,0	0,0	100,0	72,0	≤ 80
8,0									100,0	0,0		94,1	56,0	
5,0							100,0	0,0				74,9	43,0	
2,0				100,0			100,0	0,0				52,3	30,0	25 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0					37,1	20,0	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0						24,6	12,0	
0,09	100,0	0,0			0,0							17,1	6,0	3 - 9
0,063	0,0											0,0	0,0	
Gew.-%	2,79	2,00	2,00	4,00	2,59	3,66	3,14	8,76	9,40	14,89	28,00	18,77		

A 3.7
AG1
Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 25% Asphaltgranulat

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natursand			gebrochene Mineralstoff									Asphaltgranulat AG1	Siebdurchgang	ZTVT-StB 95
		0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt			0/11					
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	22/32	0/11		
31,5													100,0		100,00	≥ 90
22,4												100,0	0,0		86,00	≤ 90
16,0											100,0	0,0			77,00	
11,2										100,0	0,0			100,0	69,00	
8,0									100,0	0,0				85,1	58,00	
5,0								100,0	0,0					58,6	43,00	
2,0				100,0			100,0	0,0						40,4	31,00	20 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0							26,9	21,00	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0								17,8	12,00	
0,09	100,0	0,0			0,0									12,8	8,00	3 - 10
0,063	0,0													0,0	0,00	
Gew.-%	4,95	1,00	1,00	1,00	1,81	5,84	5,78	7,67	8,70	7,45	8,00	9,00	14,00	23,80		

A 3.8
AG2
Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 25% Asphaltgranulat

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoff									Asphaltgranulat AG2	Siebdurchgang	ZTVT-StB 95	
		0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt									
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	22/32	0/11			
31,5													100,0		100,00	≥ 90	
22,4												100,0	0,0		86,00	≤ 90	
16,0											100,0	0,0			77,00		
11,2										100,0	0,0			100,0	69,00		
8,0									100,0	0,0					96,3	58,00	
5,0								100,0	0,0						83,6	43,00	
2,0				100,0			100,0	0,0							60,3	31,00	20 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0								39,3	21,00	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0									26,1	12,00	
0,09	100,0	0,0			0,0										17,8	8,00	3 - 10
0,063	0,0														0,0	0,00	
Gew.-%	3,79	0,33	0,33	0,33	1,70	5,55	4,70	6,49	12,00	10,12	8,00	9,00	14,00	23,66			

A 3.9
AG3
Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 25% Asphaltgranulat

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoff									Asphaltgranulat AG3	Sieb- durch- gang	ZTVT- StB 95
		0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt			0/11					
Prüfkorn- größe/ Korn- klasse [mm]	0/0,09	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/ 16	16/ 22	22/ 32	0/11		
31,5													100,0		100,00	≥ 90
22,4												100,0	0,0		86,00	≤ 90
16,0											100,0	0,0			77,00	
11,2										100,0	0,0			100,0	69,00	
8,0									100,0	0,0				94,1	58,00	
5,0							100,0	0,0						74,9	43,00	
2,0				100,0			100,0	0,0						52,3	31,00	20 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0							37,1	21,00	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0								24,6	12,00	
0,09	100,0	0,0			0,0									17,1	8,00	3 - 10
0,063	0,0													0,0	0,00	
Gew.-%	3,97	1,00	1,00	1,00	1,24	5,05	5,42	6,68	10,48	9,61	8,00	9,00	14,00	23,55		

A 3.10
AG1
Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 40% Asphaltgranulat

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoff									Asphaltgranulat AG1	Sieb- durch- gang	ZTVT- StB 95
		0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt			0/11					
Prüfkorn- größe/ Korn- klasse [mm]	0/0,09	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/ 16	16/ 22	22/ 32	0/11		
31,5													100,0		100,00	≥ 90
22,4												100,0	0,0		86,00	≤ 90
16,0											100,0	0,0			77,00	
11,2										100,0	0,0			100,0	69,00	
8,0									100,0	0,0				85,1	58,00	
5,0								100,0	0,0					58,6	43,00	
2,0				100,0			100,0	0,0						40,4	31,00	20 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0							26,9	21,00	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0								17,8	12,00	
0,09	100,0	0,0			0,0									12,8	8,00	3 - 10
0,063	0,0													0,0	0,00	
Gew.-%	3,08	1,00	1,00	1,00	1,08	4,50	3,81	5,00	4,81	5,27	8,00	9,00	14,00	38,45		

A 3.11
 AG2
 Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 40% Asphaltgranulat

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoff									Asphaltgranulat AG2	Sieb- durch- gang	ZTVT- StB 95
		0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt			0/11					
Prüfkorn- größe/ Korn- klasse [mm]	0/0,09	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	0,09/ 0,25	0,25/ 0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/ 16	16/ 22	22/ 32	0/11		
31,5													100,0		100,00	≥ 90
22,4												100,0	0,0		86,00	≤ 90
16,0											100,0	0,0			77,00	
11,2										100,0	0,0			100,0	69,00	
8,0									100,0	0,0				96,3	58,00	
5,0								100,0	0,0					83,6	43,00	
2,0				100,0			100,0	0,0						60,3	31,00	20 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0							39,3	21,00	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0								26,1	12,00	
0,09	100,0	0,0			0,0									17,8	8,00	3 - 10
0,063	0,0													0,0	0,00	
Gew.-%	1,19	0,00	0,00	0,00	0,82	3,95	1,96	3,09	10,14	9,58	8,00	9,00	14,00	38,27		

A 3.12
AG3
Rezeptur für Asphalttragschicht 0/32 C mit 40% Asphaltgranulat

Mineralstoffe	Füller	ungebrochene Mineralstoffe Natarsand			gebrochene Mineralstoff									Asphaltgranulat AG3	Siebdurchgang	ZTVT-StB 95	
		0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	Brechsand			Splitt			0/11						
Prüfkorngröße/ Kornklasse [mm]	0/0,09	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	0,09/0,25	0,25/0,7	0,7/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	22/32	0/11			
31,5													100,0		100,00	≥ 90	
22,4												100,0	0,0		86,00	≤ 90	
16,0											100,0	0,0			77,00		
11,2										100,0	0,0			100,0	69,00		
8,0									100,0	0,0					94,1	58,00	
5,0							100,0	0,0							74,9	43,00	
2,0				100,0			100,0	0,0							52,3	31,00	20 - 40
0,71			100,0	0,0		100,0	0,0								37,1	21,00	
0,25		100,0	0,0		100,0	0,0									24,6	12,00	
0,09	100,0	0,0			0,0										17,1	8,00	3 - 10
0,063	0,0														0,0	0,00	
Gew.-%	1,48	1,00	1,00	1,00	0,14	3,24	3,20	3,39	7,68	8,75	8,00	9,00	14,00	38,12			

A 4.1
Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG1
der Verfahren A, B und C (Serie 1) nach DIN 52 000

		Bindemittel																		
		B80	aus AG1	aus Asphaltbeton 0/11S			aus Asphaltbinder 0/16			aus Asphalttragschicht 0/32C										
				Asphaltgranulat AG1 in %																
				20			20			25			40							
				Mischverfahren																
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C						
Duktilität	cm	11	5	6	6	6	6	6	6	5	4	5	5	1	4					
Brechpunkt	°C	-12	-14	-14	-9	-14	-12	-9	-12	-11	-9	-9	-11	+2	-8					
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	46,0	58,0	51,5	53,5	50,0	50,5	57,0	50,5	54,0	61,5	55,0	56,5	80,0	61,0					
Penetration	1/10 mm	80	32	53	56	57	53	40	53	43	28	38	38	16	29					

A 4.2

Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG2 im
Verfahren C (Serie 1) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		B80	aus AG2	aus Asphaltbeton 0/11S	aus Asphaltbinder 0/16	aus Asphalttragschicht 0/32C	
				Asphaltgranulat AG2 in %			
				20	20	25	40
		Mischverfahren C					
Duktilität	cm	11	7	7	6	6	6
Brechpunkt	°C	-12	-15	-8	-7	-4	-5
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	46,0	61,0	51,0	52,0	59,0	63,0
Penetration	1/10 mm	80	33	46	46	32	34

A 4.3
Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG3 im
Verfahren C (Serie 1) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		B80	aus AG3	aus Asphaltbeton 0/11S	aus Asphaltbinder 0/16	aus Asphalttragschicht 0/32C	
				Asphaltgranulat AG3 in %			
				20	20	25	40
				Mischverfahren C			
Duktilität	cm	11	7	7	6	5	5
Elastische Rückstellung	%	---	61,0	29,0	27,5	25,0	---
Brechpunkt	°C	-12	-23	-7	-6	-5	-7
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	46,0	63,5	51,5	52,0	58,5	63,5
Penetration	1/10 mm	80	33	45	45	35	33

A 4.4

Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG1 im
Verfahren C (Serie 2) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		70/ 100	aus AG1	aus Asphaltbeton 0/11S	aus Asphaltbinder 0/16	aus Asphalttragschicht 0/32C	
				Asphaltgranulat AG1 in %			
				20	20	25	40
				Mischverfahren C			
Duktilität	cm	6	5	4	3	1	4
Brechpunkt	°C	-14	-14	-7	-5	-7	-7
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	58,0	54,0	54,5	57,0	58,5
Penetration	1/10 mm	60	32	44	41	29	33

A 4.5

Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG2 im
Verfahren C (Serie 2) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		B70/ 100	aus AG2	aus	aus	aus	
				Asphaltbeton 0/11S	Asphaltbinder 0/16	Asphalttragschicht 0/32C	
				Asphaltgranulat AG2 in %			
				20	20	25	40
Mischverfahren C							
Duktilität	cm	6	7	4	1	1	1
Brechpunkt	°C	-14	-15	-7	-4	-4	-3
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	61,0	55,0	57,0	57,0	64,5
Penetration	1/10 mm	60	33	41	38	32	24

A 4.6

Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG3 im
Verfahren C (Serie 2) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		B70/ 100	aus AG3	aus Asphaltbeton 0/11	aus Asphaltbinder 0/16	aus Asphalttragschicht 0/32	
				Asphaltgranulat AG3 in %			
				20	20	25	40
		Mischverfahren C					
Duktilität	cm	6	7	4	1	2	5
Elastische Rückstellung	%	---	61,0	24,0	28,0	30,0	29,0
Brechpunkt	°C	-14	-23	-11	-10	-7	-7
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	63,5	56,0	59,0	64,0	65,5
Penetration	1/10mm	60	33	39	35	26	26

A 4.7
Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG1 im
Verfahren C (Serie 3) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		B70/ 100	aus AG1	aus Asphaltbeton 0/11S	aus Asphaltbinder 0/16	aus Asphalttragschicht 0/32C	
				Asphaltgranulat AG1 in %			
				20	20	25	40
		Mischverfahren C					
Duktilität	cm	6	5	4	4	1	1
Brechkpunkt	°C	-14	-14	-11	-9	-5	-5
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	58,0	55,5	57,0	60,5	63,0
Penetration	1/10 mm	60	32	43	39	31	28

A 4.8

Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG 2
im Verfahren C (Serie 3) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		B70/ 100	aus AG2	aus Asphaltbeton 0/11S	aus Asphaltbinder 0/16	aus Asphalttragschicht 0/32C	
				Asphaltgranulat AG2 in %			
				20	20	25	40
				Mischverfahren C			
Duktilität	cm	6	7	4	1	1	1
Brechkpunkt	°C	-14	-15	-6	-6	-6	-5
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	61,0	55,5	58,5	61,0	65,0
Penetration	1/10 mm	60	33	43	36	30	23

A 4.9

Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphaltvarianten mit AG 3
im Verfahren C (Serie 3) nach DIN 52 000

		Bindemittel					
		B70/ 100	aus AG3	aus Asphaltbeton 0/11S	aus Asphaltbinder 0/16	aus Asphalttragschicht 0/32C	
				Asphaltgranulat AG3 in %			
				20	20	25	40
				Mischverfahren C			
Duktilität	cm	6	7	4	4	3	1
Elastische Rückstellung	%	---	61,0	25,0	23,0	23,0	23,0
Brechkpunkt	°C	-14	-23	-12	-4	-6	-9
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	63,5	55,0	58,0	62,5	63,5
Penetration	1/10 mm	60	33	42	37	26	26

A 4.10
 Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphalttragschichtvarianten
 0/32C mit 25% Asphaltgranulat im Verfahren C (Serie 4) nach DIN
 52 000

		Bindemittel						
		B70/ 100	aus AG1	aus AG2	aus AG3	aus Asphalttragschicht 0/32C mit 25 %		
						AG 1	AG 2	AG 3
						Mischverfahren C		
Duktilität	cm	6	5	7	7	5	2	5
Elastische Rückstellung	%	---	---	---	61,0	---	---	20,0
Brechpunkt	°C	-14	-14	-15	-23	-6	-4	-4
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	58,0	61,0	63,5	57,0	62,0	59,5
Penetration	1/10 mm	60	32	33	33	34	21	28

A 4.11
 Eigenschaften der Bindemittel aus den Asphalttragschichtvarianten
 0/32C mit 40% Asphaltgranulat im Verfahren C (Serie 5) nach DIN
 52 000

		Bindemittel						
		B70/ 100	aus AG1	aus AG2	aus AG3	aus Asphalttragschicht 0/32C mit 25 %		
						AG 1	AG 2	AG 3
						Mischverfahren C		
Duktilität	cm	6	5	7	7	4	2	5
Elastische Rückstellung	%	---	---	---	61,0	---	---	20,0
Brechpunkt	°C	-14	-14	-15	-23	-7	-4	-8
Erweichungs- punkt Ring und Kugel	°C	49,5	58,0	61,0	63,5	59,5	64,0	62,0
Penetration	1/10 mm	60	32	33	33	30	22	26

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 20°C				
	Elastischer Anteil	Viskoser Anteil	Viskoser Anteil	Elastischer Anteil	Gesamt
	%	%	rad	rad	rad
B 80	3,09	96,91	3,08476792	0,09849	3,18325792
Asphaltgranulat AG1	18,99	81,01	0,32694083	0,07664	0,40358083
AB 0/11 MV A mit 20 % AG1	8,83	91,17	1,18487169	0,1148	1,29967169
AB 0/11 W1 A mit 20 % AG1	11,49	88,51	0,80267554	0,1042	0,90687554
AB 0/11 W2 A mit 20 % AG1	10,57	89,43	0,9298351	0,1099	1,0397351
AB 0/11 MV B mit 20 % AG1	15,03	84,97	0,73041411	0,1292	0,85961411
AB 0/11 W1 B mit 20 % AG1	16,15	83,85	0,42267669	0,08141	0,50408669
AB 0/11 W2 B mit 20 % AG1	16,97	83,03	0,45727659	0,09346	0,55073659
AB 0/11 MV C mit 20 % AG1	8,45	91,55	1,51857899	0,1402	1,65877899
AB 0/11 W1 C mit 20 % AG1	8,84	91,16	1,20756063	0,1171	1,32466063
AB 0/11 W2 C mit 20 % AG1	8,49	91,51	1,28306624	0,1191	1,40216624
ABi 0/16 MV A mit 20 % AG1	10,20	89,80	1,35052157	0,1534	1,50392157
ABi 0/16 MV B mit 20 % AG1	19,03	80,97	0,24980287	0,05871	0,30851287
ABi 0/16 MV C mit 20 % AG1	13,82	86,18	0,77823907	0,1248	0,90303907
TS MV A mit 25% AG1	17,44	82,56	0,47311046	0,09994	0,57305046
TS MV B mit 25% AG1	32,88	67,12	0,10564051	0,05175	0,15739051
TS MV C mit 25% AG1	4,32	95,68	2,48723704	0,1123	2,59953704
TS MV A mit 40% AG1	23,56	76,44	0,32146329	0,09908	0,42054329
TS MV B mit 40% AG1	55,88	44,12	0,0108642	0,01376	0,0246242
TS MV C mit 40% AG1	29,38	70,62	0,22589747	0,09398	0,31987747
A 5.1	Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ des Bitumens B80, der rückgewonnenen Bindemittel aus AG1 und aus den Asphaltvarianten mit AG1 nach den Verfahren A, B und C in der Serie 1 im Schubkriechversuch bei 20°C				

Bitumen (aus)	Versuchstemperatur			
	20 °C		35 °C	
	Elastischer Anteil	Viskoser Anteil	Elastischer Anteil	Viskoser Anteil
	%	%	%	%
B 80	3,09	96,91	0,18	99,82
70/100	11,26	88,74	0,26	99,74
Serie 1				
AB 0/11S mit 20 % AG1	8,45	91,55	0,72	99,28
AB 0/11S mit 20 % AG2	21,76	78,24	2,77	97,23
AB 0/11S mit 20 % AG3	19,79	80,21	2,05	97,95
ABi 0/16 mit 20 % AG1	13,82	86,18	1,25	98,75
ABi 0/16 mit 20 % AG2	18,14	81,86	1,34	98,66
ABi 0/16 mit 20 % AG3	18,42	81,58	2,46	97,54
TS 0/32C mit 25% AG1	4,32	95,68	1,29	98,72
TS 0/32C mit 25% AG2	29,51	70,49	9,35	90,65
TS 0/32C mit 25% AG3	23,66	76,34	14,09	85,91
TS 0/32C mit 40% AG1	29,38	70,62	7,17	92,83
TS 0/32C mit 40% AG2	32,17	67,83	8,15	91,85
TS 0/32C mit 40% AG3	28,48	71,52	2,05	97,95

A 5.2	Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ des Bitumens B80, des Bitumens 70/100 und der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in der Serie 1 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
-------	--

Serie 2	Versuchstemperatur			
	20 °C		35 °C	
	Elastischer Anteil	Viskoser Anteil	Elastischer Anteil	Viskoser Anteil
Bitumen (aus)	%	%	%	%
AB 0/11S mit 20 % AG1	25,39	74,61	3,22	96,78
AB 0/11S mit 20 % AG2	32,06	67,94	2,89	97,11
AB 0/11S mit 20 % AG3	26,92	73,08	5,20	94,80
ABi 0/16 mit 20 % AG1	23,34	76,66	2,40	97,61
ABi 0/16 mit 20 % AG2	37,87	62,13	4,90	95,10
ABi 0/16 mit 20 % AG3	27,89	72,11	9,36	90,65
TS 0/32C mit 25% AG1	31,54	68,46	5,50	94,50
TS 0/32C mit 25% AG2	23,68	76,32	5,50	94,50
TS 0/32C mit 25% AG3	34,98	65,02	14,09	85,91
TS 0/32C mit 40% AG1	34,87	65,13	6,98	93,02
TS 0/32C mit 40% AG2	40,98	59,02	14,11	85,89
TS 0/32C mit 40% AG3	30,90	69,10	19,22	80,78

A 5.3	Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in der Serie 2 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
-------	--

Serie 3 Bitumen (aus)	Versuchstemperatur			
	20 °C		35 °C	
	Elastischer Anteil %	Viskoser Anteil %	Elastischer Anteil %	Viskoser Anteil %
AB 0/11S mit 20 % AG1	29,24	70,76	3,91	96,09
AB 0/11S mit 20 % AG2	25,98	74,02	3,67	96,33
AB 0/11S mit 20 % AG3	23,12	76,88	0,52	99,48
ABi 0/16 mit 20 % AG1	27,27	72,73	5,17	94,83
ABi 0/16 mit 20 % AG2	23,40	76,60	6,58	93,43
ABi 0/16 mit 20 % AG3	26,18	73,82	7,81	92,19
TS 0/32C mit 25% AG1	32,00	68,00	6,03	93,97
TS 0/32C mit 25% AG2	30,55	69,45	10,56	89,44
TS 0/32C mit 25% AG3	27,75	72,25	7,80	92,20
TS 0/32C mit 40% AG1	33,82	66,18	12,21	87,79
TS 0/32C mit 40% AG2	38,14	61,86	15,74	84,26
TS 0/32C mit 40% AG3	33,72	66,28	15,00	85,00

A 5.4	Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in der Serie 3 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
-------	--

Serie 4	Versuchstemperatur			
	20 °C		35 °C	
	Elastischer Anteil	Viskoser Anteil	Elastischer Anteil	Viskoser Anteil
Bitumen (aus)	%	%	%	%
TS 0/32C mit 25% AG1	33,59	66,41	4,40	95,60
TS 0/32C mit 25% AG2	75,29	24,71	9,13	90,87
TS 0/32C mit 25% AG3	29,94	70,06	8,39	91,61
Serie 5				
TS 0/32C mit 40% AG1	32,09	67,91	7,08	92,92
TS 0/32C mit 40% AG2	36,02	63,98	11,04	88,96
TS 0/32C mit 40% AG3	34,39	65,61	14,24	85,76

A 5.5	Elastischer und viskoser Anteil der Verformung γ der rückgewonnenen Bindemittel aus den Asphaltvarianten in den Serien 4 und 5 im Schubkriechversuch bei 20 und 35°C
-------	---

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 35°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
B 80	149340	72,40	0,953190668	0,302369891	156673,7958	45166	142350
AB 0/11S mit 20 % AG1	386990	65,50	0,909961271	0,414693243	425281,836	160450	352160
AB 0/11S mit 20 % AG2	559940	58,29	0,850719384	0,525620138	658195,8873	294350	476330
AB 0/11S mit 20 % AG3	630440	57,88	0,846936377	0,531694248	744377,0481	335200	533950
ABi 0/16 mit 20 % AG1	354070	63,51	0,895012224	0,446041611	395603,5353	157960	316880
ABi 0/16 mit 20 % AG2	441810	62,34	0,885717931	0,464223811	498815,689	205070	391340
ABi 0/16 mit 20 % AG3	414750	62,47	0,886768941	0,462212988	467709,2093	191720	367780
TS 0/32C mit 25% AG1	349760	61,32	0,87731374	0,479917286	398671,5175	167870	306840
TS 0/32C mit 25% AG2	765060	50,96	0,776706424	0,629862788	985005,3724	481880	594230
TS 0/32C mit 25% AG3	1236300	46,18	0,721518581	0,692395074	1713469,387	856100	891960
TS 0/32C mit 40% AG1	557460	52,76	0,796107634	0,60515505	700231,9487	337350	443800
TS 0/32C mit 40% AG2	583220	51,35	0,780975737	0,624561364	746783,7632	364240	455490
TS 0/32C mit 40% AG3	724380	48,69	0,75114893	0,660132778	964362,6863	478150	544150

A 5.6	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' des Bitumens B80 und der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 1 im Schubwechselfersuch bei 35°C
-------	--

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 50°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
B 80	17823	82,61	0,99169363	0,12862252	17972,2845	2292,1	17675
AB 0/11S mit 20 % AG1	52262	76,84	0,97373808	0,22767113	53671,5168	11897	50890
AB 0/11S mit 20 % AG2	124620	67,94	0,92679106	0,37557733	134463,964	46803	115500
AB 0/11S mit 20 % AG3	132940	69,33	0,93562898	0,352985	142086,236	46930	124380
ABi 0/16 mit 20 % AG1	53363	75,55	0,96836577	0,24953504	55106,2436	13320	51674
ABi 0/16 mit 20 % AG2	110660	71,33	0,94737802	0,32011699	116806,594	35416	104840
ABi 0/16 mit 20 % AG3	176470	67,87	0,92633151	0,37670934	190504,153	66466	163470
TS 0/32C mit 25% AG1	64809	71,93	0,95067827	0,3101787	68171,3277	20103	61612
TS 0/32C mit 25% AG2	232040	60,82	0,87309232	0,48755492	265768,001	113130	202590
TS 0/32C mit 25% AG3	140550	64,71	0,90415712	0,42720006	155448,645	60043	127080
TS 0/32C mit 40% AG1	147910	63,92	0,89818109	0,43962567	164677,259	65035	132840
TS 0/32C mit 40% AG2	229320	60,78	0,87275173	0,48816434	262755,137	111940	200150
TS 0/32C mit 40% AG3	155320	62,49	0,88693023	0,46190342	175120,877	71747	137760

A 5.7	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' des Bitumens B80 und der rück-gewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 1 im Schubwechselfersuch bei 50°C
-------	---

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 35°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
AB 0/11S mit 20 % AG1	658400	55,21	0,8212488	0,57057024	801705,885	375620	540740
AB 0/11S mit 20 % AG2	687620	54,65	0,815633	0,57856962	843050,731	397860	560830
AB 0/11S mit 20 % AG3	854520	51,01	0,77725579	0,62918474	1099406,42	537650	664180
ABi 0/16 mit 20 % AG1	659030	57,07	0,83933534	0,543614	785180,804	358250	553160
ABi 0/16 mit 20 % AG2	743780	53,42	0,80302555	0,5959446	926222,088	443210	597300
ABi 0/16 mit 20 % AG3	540060	53,95	0,80850375	0,58849103	667974,641	317830	436630
TS 0/32C mit 25% AG1	825140	51,74	0,78520887	0,619231	1050854,15	510970	647900
TS 0/32C mit 25% AG2	984750	48,85	0,75298944	0,6580326	1307787,27	648040	741470
TS 0/32C mit 25% AG3	1236300	46,18	0,72151858	0,69239507	1713469,39	856100	891960
TS 0/32C mit 40% AG1	314890	50,75	0,77439264	0,63270533	406628,346	199220	243860
TS 0/32C mit 40% AG2	1481500	43,21	0,68467432	0,72884914	2163802,48	1079800	1014300
TS 0/32C mit 40% AG3	1046500	47,56	0,73798441	0,67481776	1418051,64	706140	772340

A 5.8	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 2 im Schubwechselfersuch bei 35°C
-------	---

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 50°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
AB 0/11S mit 20 % AG1	91735	68,63	0,93124674	0,36438923	98507,7277	33424	85429
AB 0/11S mit 20 % AG2	94538	65,06	0,90674985	0,42166895	104260,287	39869	85720
AB 0/11S mit 20 % AG3	136500	66,06	0,91397089	0,40577976	149348,301	55388	124760
ABi 0/16 mit 20 % AG1	113110	69,9	0,93909425	0,34365969	120445,844	38872	106220
ABi 0/16 mit 20 % AG2	127080	67,08	0,92104952	0,38944548	137973,038	49487	117050
ABi 0/16 mit 20 % AG3	152980	64,24	0,9006224	0,43460245	169860,31	66487	137780
TS 0/32C mit 25% AG1	57471	61,41	0,87806651	0,47853861	65451,7618	27501	50463
TS 0/32C mit 25% AG2	115740	68,85	0,93263902	0,36081083	124099,461	41751	107940
TS 0/32C mit 25% AG3	198890	61,67	0,880229	0,47454916	225952,564	94395	175060
TS 0/32C mit 40% AG1	35950	62,2	0,88458098	0,46638664	40640,7113	16768	31799
TS 0/32C mit 40% AG2	26561	46,51	0,7254945	0,68822796	36610,8909	18281	19269
TS 0/32C mit 40% AG3	209650	59,73	0,8636596	0,50407548	242746,1	105700	181060

A 5.9	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 2 im Schubwechselfersuch bei 50°C
-------	---

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 35°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
AB 0/11S mit 20 % AG1	608500	54,49	0,81401415	0,58084504	747529,999	353470	495300
AB 0/11S mit 20 % AG2	552130	55,21	0,8212488	0,57057024	672305,392	315060	453420
AB 0/11S mit 20 % AG3	584810	57,64	0,8447018	0,53523721	692327,164	312980	494010
ABi 0/16 mit 20 % AG1	665420	52,99	0,79853046	0,6019544	833305,719	400600	531330
ABi 0/16 mit 20 % AG2	808370	50,39	0,77040198	0,63755846	1049283,39	515390	622770
ABi 0/16 mit 20 % AG3	768620	50,93	0,77637652	0,63026938	990009,33	484390	596770
TS 0/32C mit 25% AG1	785350	49,66	0,7622166	0,64732206	1030350,17	508400	598590
TS 0/32C mit 25% AG2	1119300	47,52	0,73751312	0,67533281	1517667,92	755900	825530
TS 0/32C mit 25% AG3	973570	50,14	0,76761278	0,64091389	1268308,74	623960	747330
TS 0/32C mit 40% AG1	1270700	45,3	0,71079947	0,7033947	1787705,32	893850	903140
TS 0/32C mit 40% AG2	1183300	46,35	0,72356978	0,69025124	1635364,04	816760	856220
TS 0/32C mit 40% AG3	719900	51,34	0,78086672	0,62469766	921924,296	449710	562150

A 5.10	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 3 im Schubwechsel-versuch bei 35°C
--------	--

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 50°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
AB 0/11S mit 20 % AG1	127310	67,54	0,92414647	0,38203835	137759,548	48640	117650
AB 0/11S mit 20 % AG2	124090	67,66	0,92494458	0,38010199	134159,389	47166	114780
AB 0/11S mit 20 % AG3	97291	69,65	0,93758582	0,34775398	103767,568	33834	91219
ABi 0/16 mit 20 % AG1	138460	65,53	0,91017828	0,41421673	152124,043	57345	126020
ABi 0/16 mit 20 % AG2	165480	64,85	0,90519827	0,42498952	182810,778	70332	149790
ABi 0/16 mit 20 % AG3	154500	64,55	0,90296063	0,42972328	171103,805	66399	139510
TS 0/32C mit 25% AG1	185110	61,62	0,87981454	0,47531712	210396,613	87982	162870
TS 0/32C mit 25% AG2	176870	63,23	0,89282178	0,45041012	198102,247	79670	157920
TS 0/32C mit 25% AG3	181500	63,95	0,89841115	0,43915533	202023,316	79695	163060
TS 0/32C mit 40% AG1	210820	59,69	0,86330748	0,50467831	244200,363	106400	182000
TS 0/32C mit 40% AG2	328540	57,52	0,84357895	0,53700518	389459,696	176430	277150
TS 0/32C mit 40% AG3	63278	64,06	0,89925261	0,43742969	70367,3239	27684	56901

A 5.11	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 3 im Schubwechsel-versuch bei 50°C
--------	--

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 35°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
TS 0/32C mit 25% AG1	663620	51,24	0,77977523	0,62605958	851040,117	415440	517500
TS 0/32C mit 25% AG2	1062700	45,54	0,7137396	0,70041115	1488918,36	744320	758510
TS 0/32C mit 25% AG3	570010	55,06	0,81975224	0,57271831	695344,24	326430	467280

A 5.12	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 4 im Schub-wechselversuch bei 35°C
--------	--

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 50°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
TS 0/32C mit 25% AG1	27469	57,3	0,84151078	0,54024032	32642,4813	14838	23116
TS 0/32C mit 25% AG2	64451	57,53	0,84367266	0,53685794	76393,3728	34598	54377
TS 0/32C mit 25% AG3	106070	64,37	0,90160616	0,43255789	117645,602	45882	95632

A 5.13	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 4 im Schubwechselversuch bei 50°C
--------	---

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 35°C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
TS 0/32C mit 40% AG1	673660	50,07	0,76682918	0,64185123	878500,732	432410	516560
TS 0/32C mit 40% AG2	765230	47,54	0,73774881	0,67507533	1037250,07	516580	564560
TS 0/32C mit 40% AG3	741090	51,95	0,78747319	0,61634891	941098,709	456750	583600

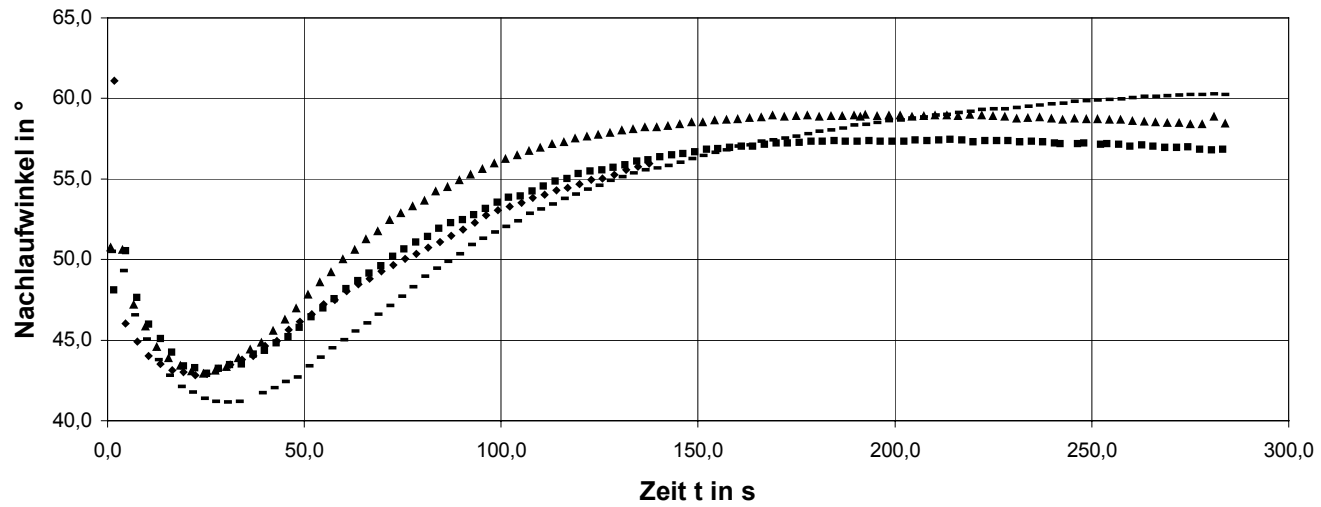
A 5.14	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 5 im Schub-wechselversuch bei 35°C
--------	--

Bindemittel (aus)	Versuchstemperatur 50C						
	$ G^* $	δ	$\sin\delta$	$\cos\delta$	$ G^* /\sin\delta$	G'	G''
	Pa	Grad	-	-	Pa	Pa	Pa
TS 0/32C mit 40% AG1	169730	62,37	0,88596088	0,46375999	191577,308	78717	150370
TS 0/32C mit 40% AG2	36651	54,62	0,81532995	0,5789966	44952,3532	21218	29884
TS 0/32C mit 40% AG3	176770	62,51	0,88709141	0,46159379	199269,205	81596	156810

A 5.15	Komplexer Schubmodul $ G^* $, Phasenverschiebungswinkel δ , Kennwert $ G^* /\sin\delta$, Speichermodul G' , Verlustmodul G'' der rückgewonnenen Bitumen aus den Asphaltvarianten mit AG1, AG2 und AG3 in der Serie 5 im Schubwechselversuch bei 50°C
--------	---

A 7.1

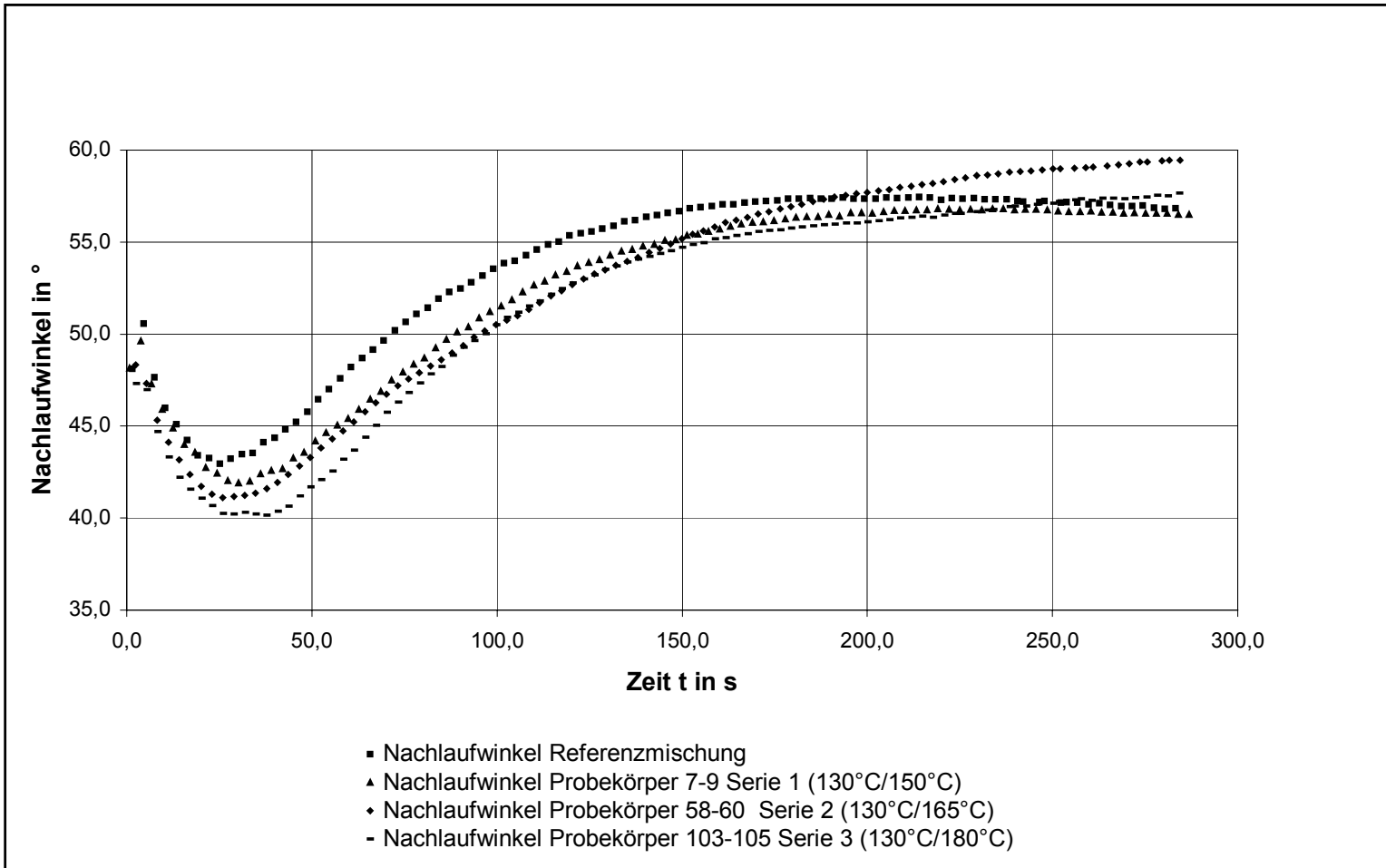
Nachlaufwinkel AB 0/11S und AB 0/11S + 20% AG1, Serien 1 bis 3



- Nachlaufwinkel Referenzmischung
- ▲ Nachlaufwinkel Probekörper 4-6 Serie 1 (130°C/150°C)
- ◆ Nachlaufwinkel Probekörper 55-57 Serie 2 (130°C/165°C)
- Nachlaufwinkel Probekörper 100-102 Serie 3 (130°C/180°C)

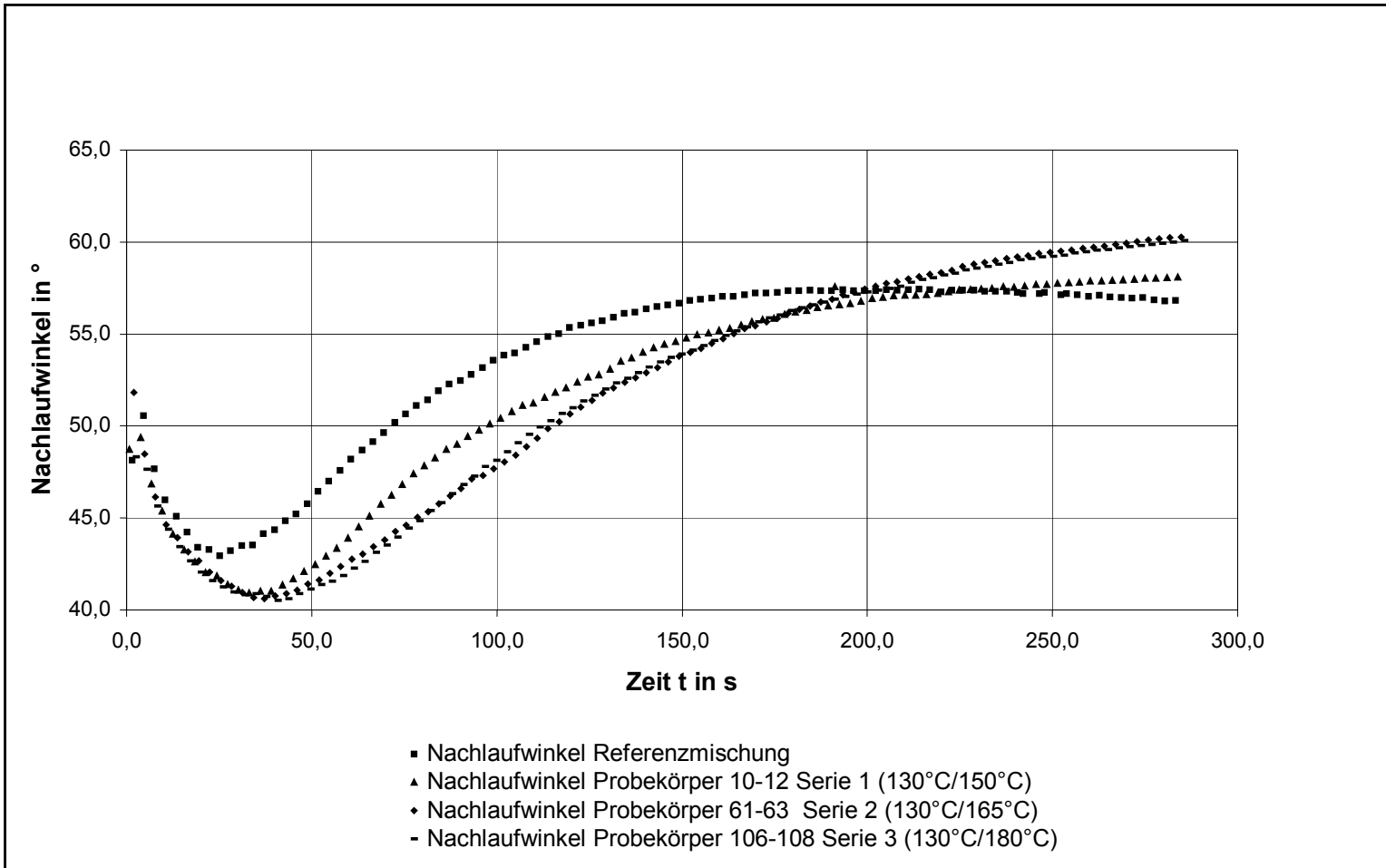
A 7.2

Nachlaufwinkel AB 0/11S und AB 0/11S + 20% AG2, Serien 1 bis 3



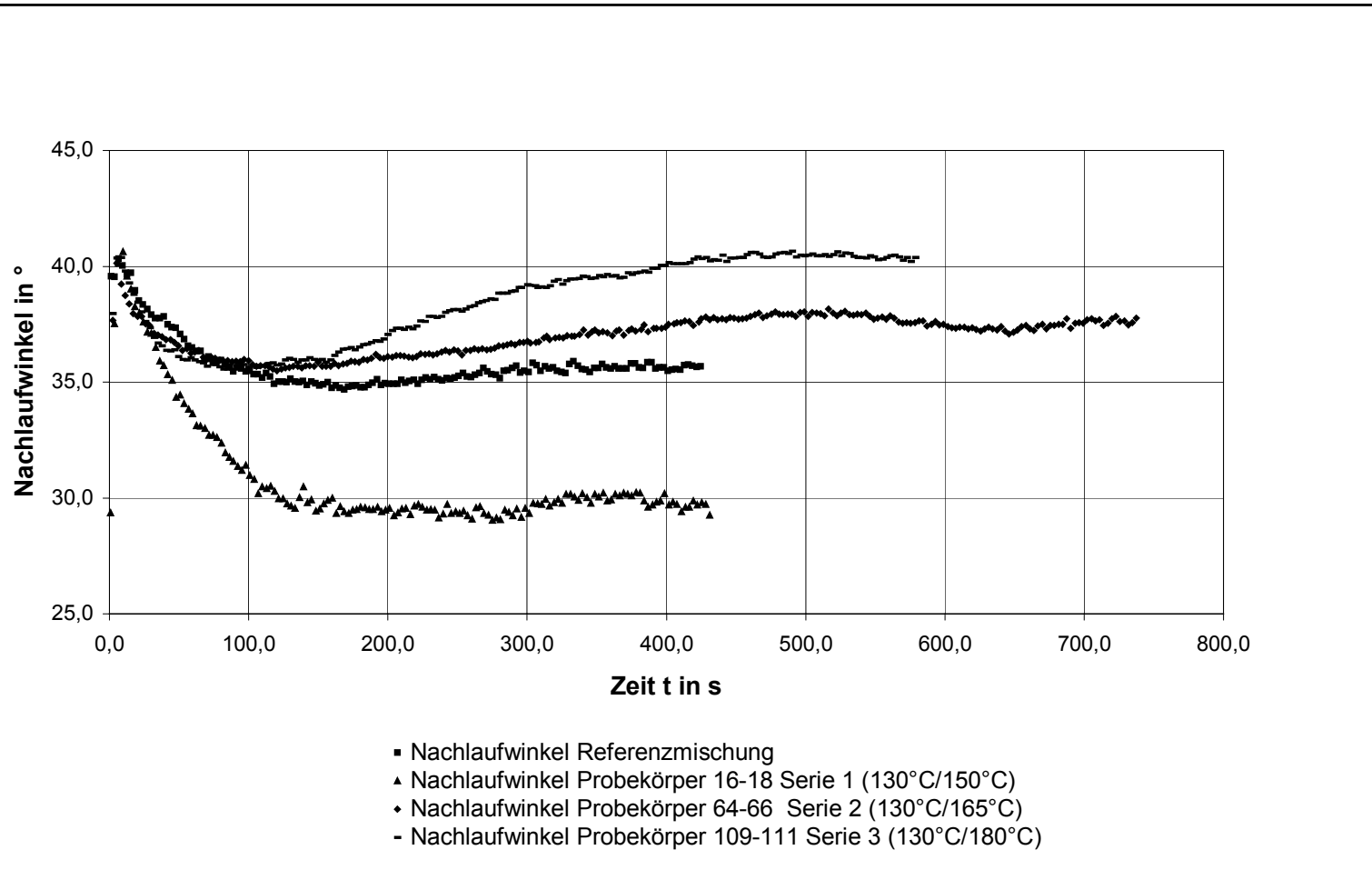
A 7.3

Nachlaufwinkel AB 0/11S und AB 0/11S + 20% AG3, Serien 1 bis 3



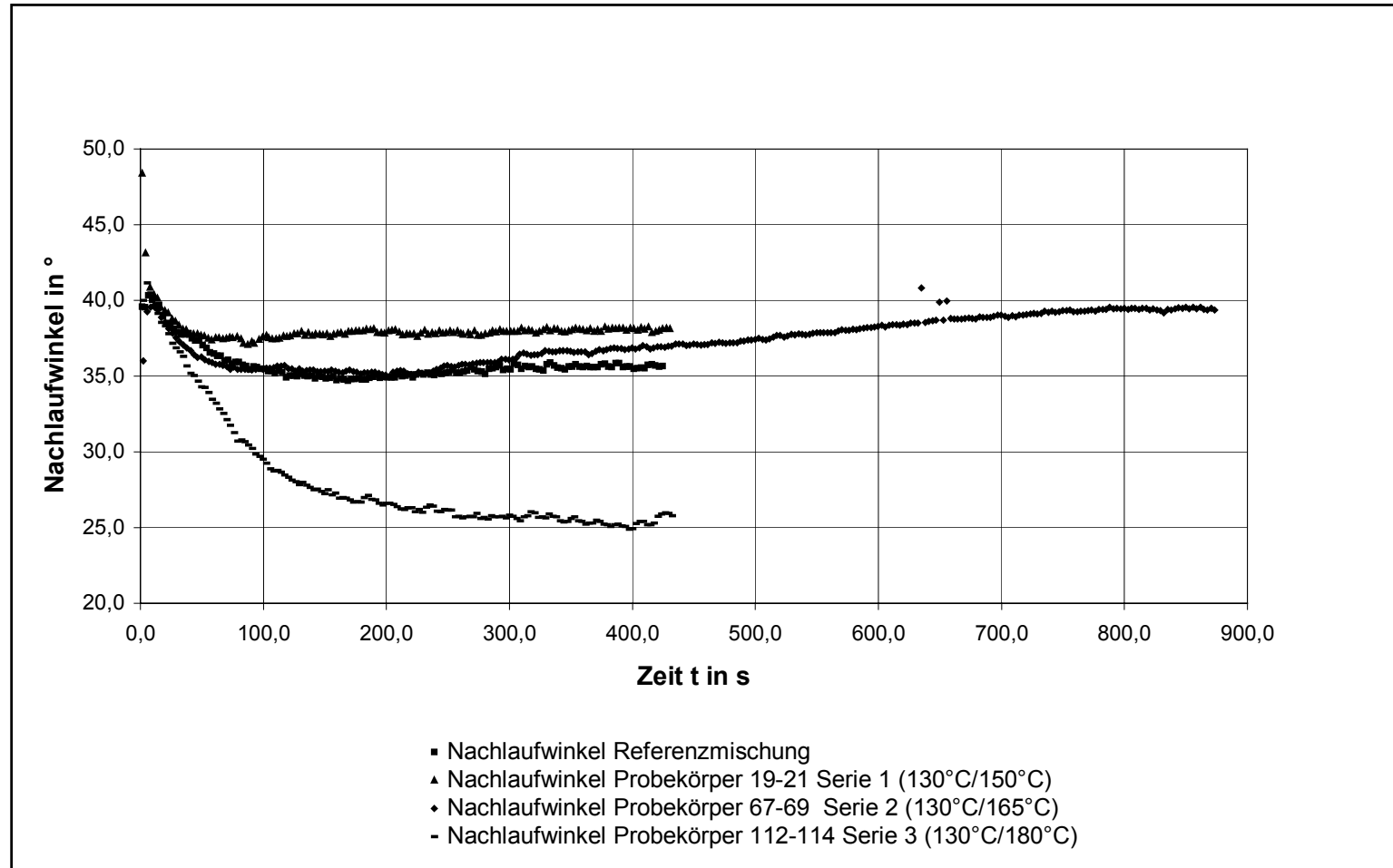
A 7.4

Nachlaufwinkel Bi 0/16 und Bi 0/16 + 20% AG1, Serien 1 bis 3



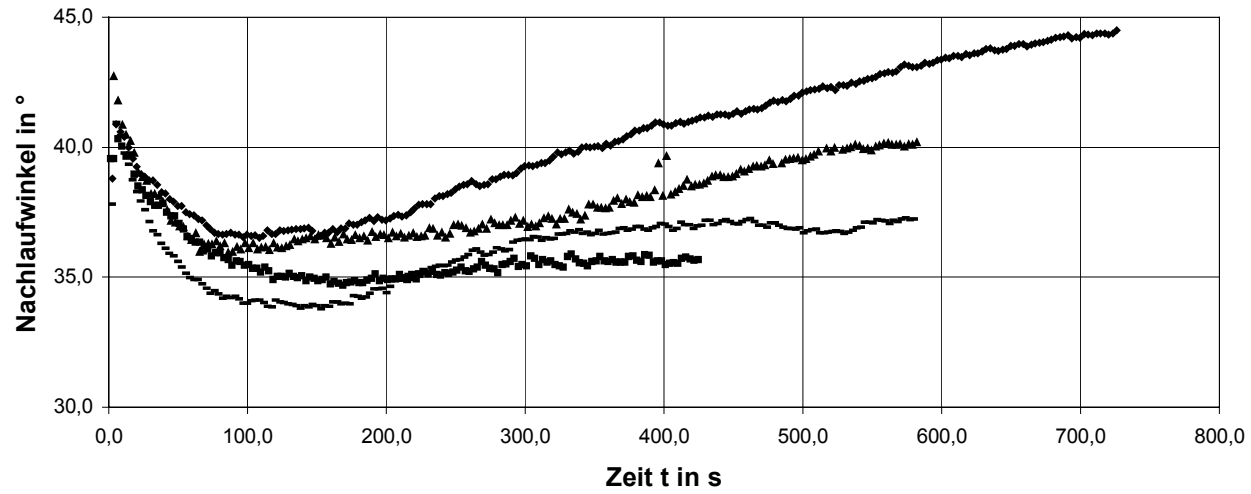
A 7.5

Nachlaufwinkel Bi 0/16 und Bi 0/16 + 20% AG2, Serien 1 bis 3



A 7.6

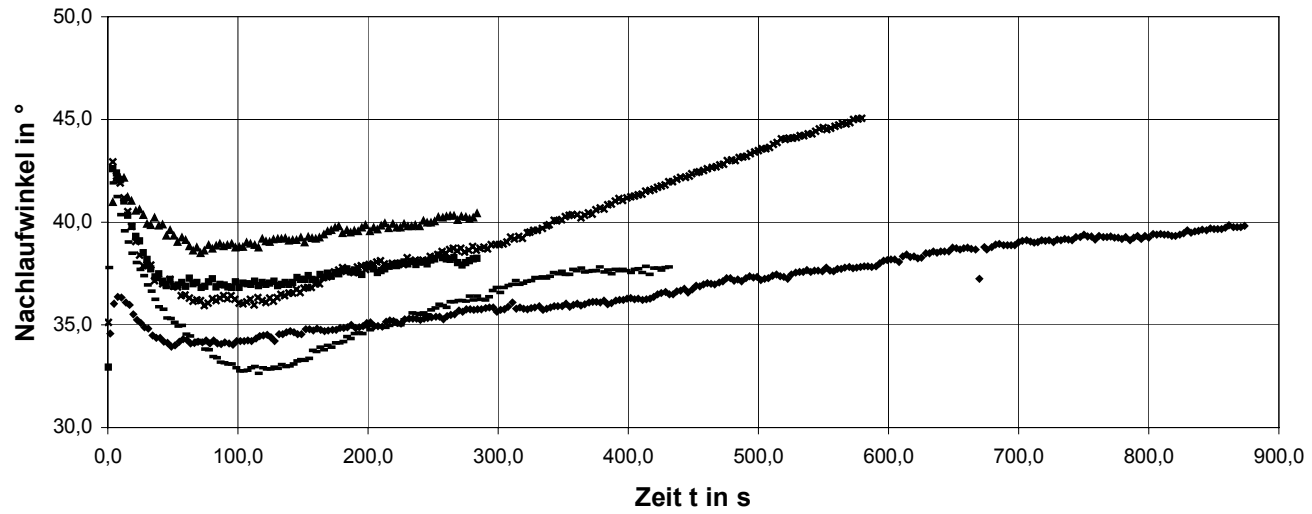
Nachlaufwinkel Bi 0/16 und Bi 0/16 + 20% AG3, Serien 1 bis 3



- Nachlaufwinkel Referenzmischung
- ▲ Nachlaufwinkel Probekörper 22-24 Serie 1 (130°C/150°C)
- ◆ Nachlaufwinkel Probekörper 70-72 Serie 2 (130°C/165°C)
- Nachlaufwinkel Probekörper 115-117 Serie 3 (130°C/180°C)

A 7.7

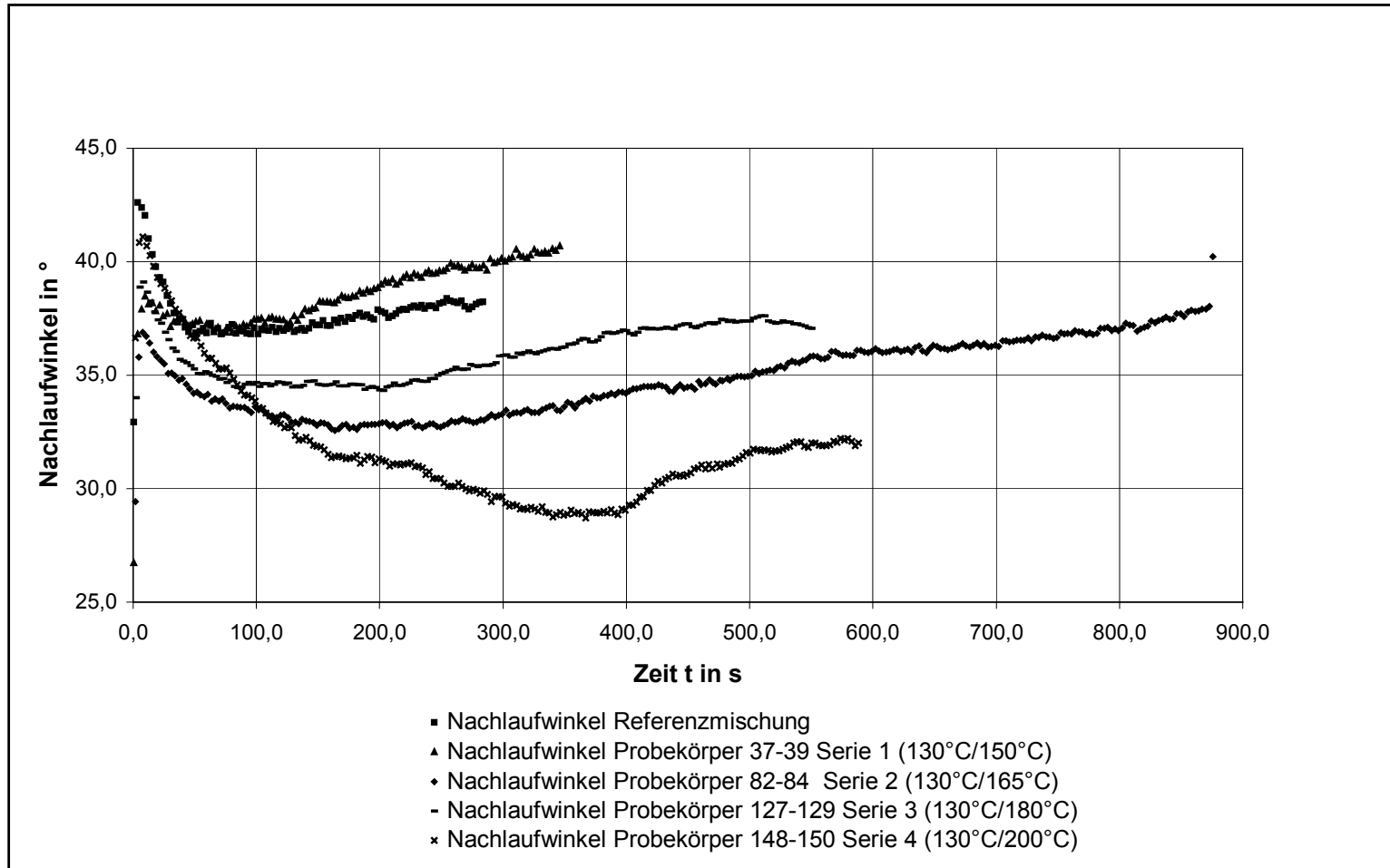
Nachlaufwinkel TS 0/32C und TS 0/32C + 25% AG1, Serien 1 bis 4



- Nachlaufwinkel Referenzmischung
- ▲ Nachlaufwinkel Probekörper 28-30 Serie 1 (130°C/150°C)
- ◆ Nachlaufwinkel Probekörper 73-75 Serie 2 (130°C/165°C)
- Nachlaufwinkel Probekörper 118-120 Serie 3 (130°C/180°C)
- * Nachlaufwinkel Probekörper 145-147 Serie 4 (130°C/200°C)

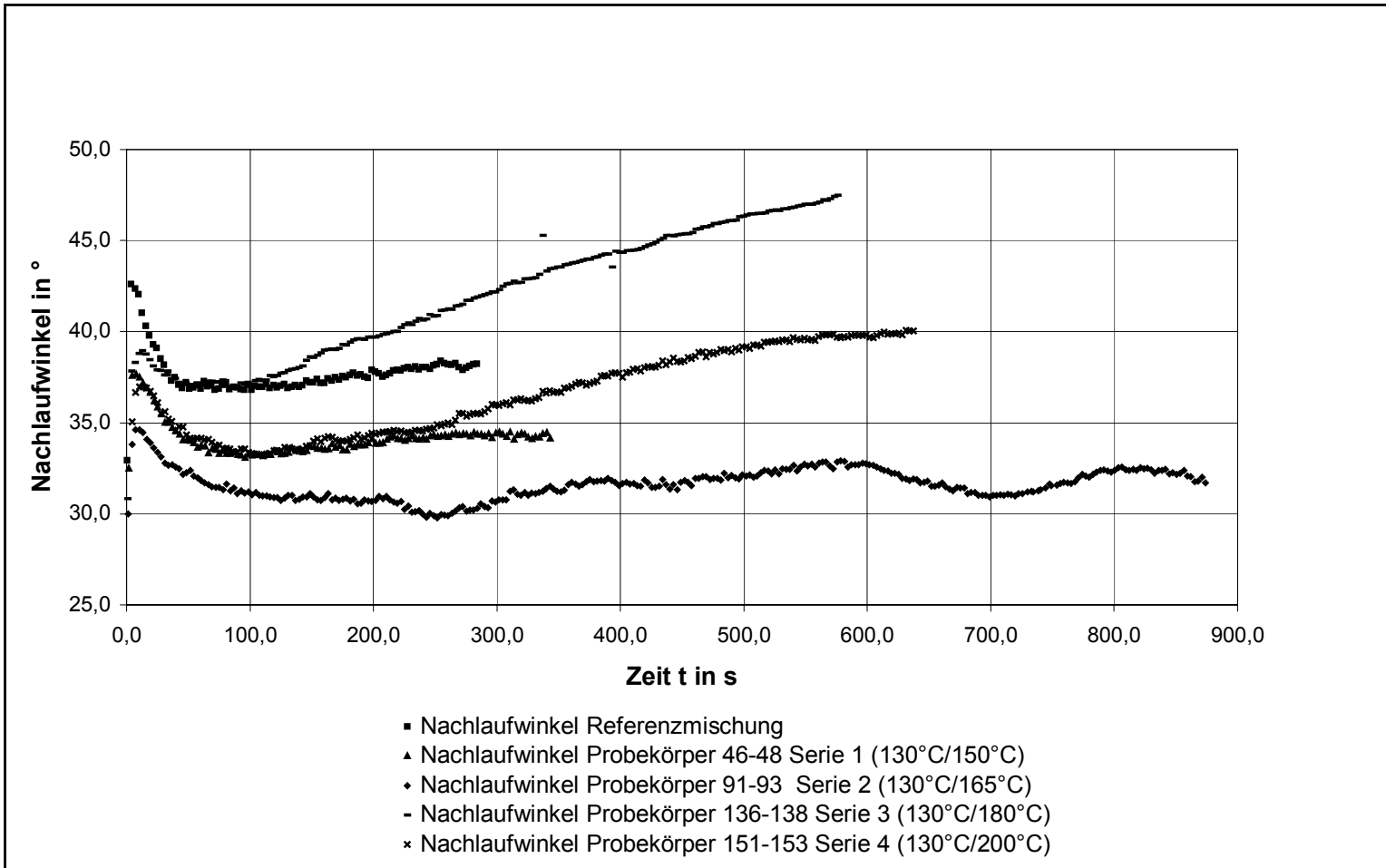
A 7.8

Nachlaufwinkel TS 0/32C und TS 0/32C + 25% AG2, Serie 1 bis 4



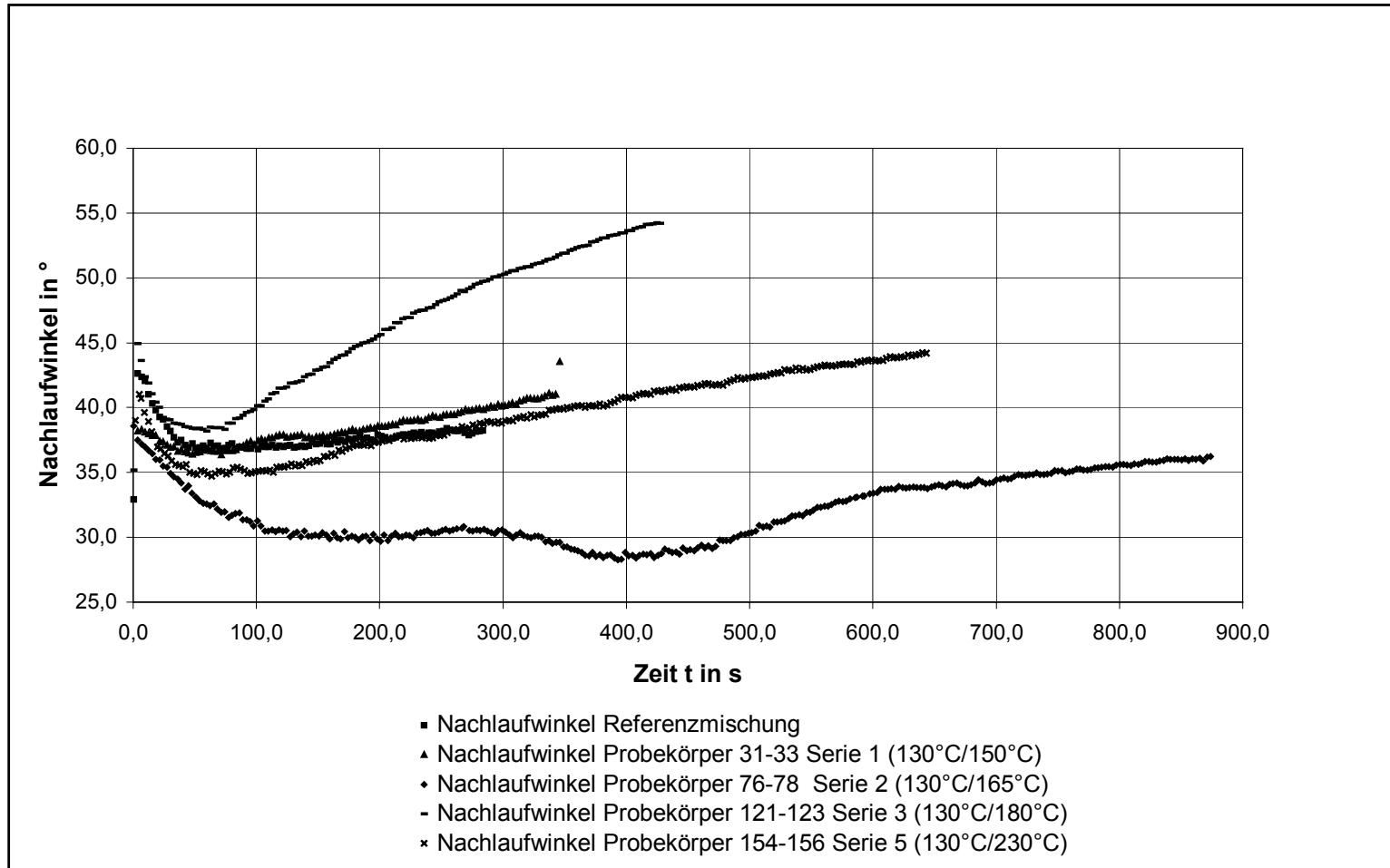
A 7.9

Nachlaufwinkel TS 0/32C und TS 0/32C + 25% AG3, Serien 1 bis 4



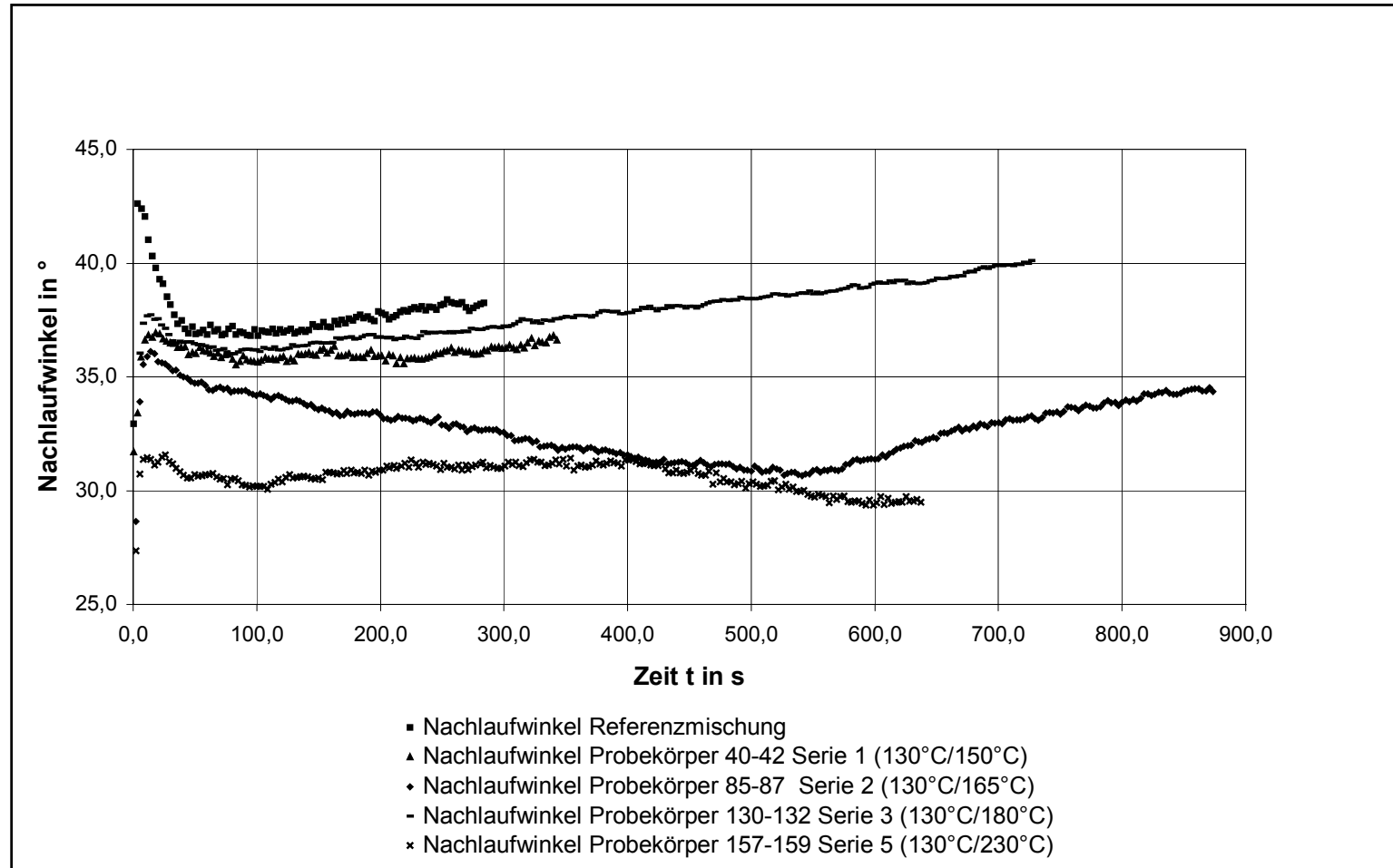
A 7.10

Nachlaufwinkel TS 0/32C und TS 0/32C + 40% AG1, Serien 1 bis 3 und 5



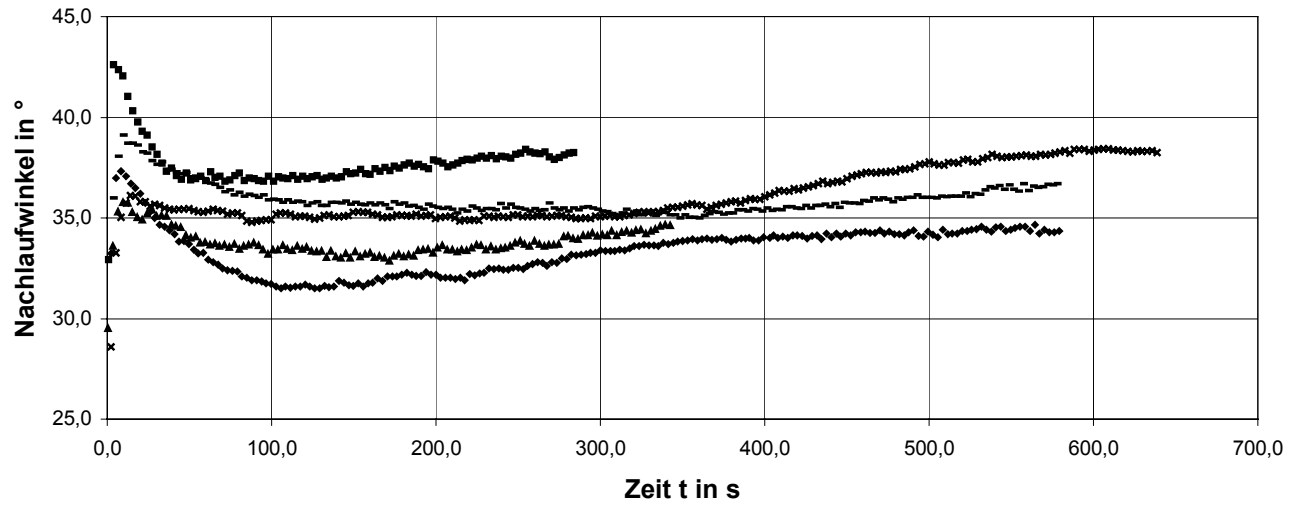
A 7.11

Nachlaufwinkel TS 0/32C und TS 0/32C + 40% AG2, Serien 1 bis 3 und 5



A 7.12

Nachlaufwinkel TS 0/32C und TS 0/32C + 40% AG3, Serien 1 bis 3 und 5



- Nachlaufwinkel Referenzmischung
- ▲ Nachlaufwinkel Probekörper 49-51 Serie 1 (130°C/150°C)
- ◆ Nachlaufwinkel Probekörper 94-96 Serie 2 (130°C/165°C)
- Nachlaufwinkel Probekörper 139-141 Serie 3 (130°C/180°C)
- × Nachlaufwinkel Probekörper 160-162 Serie 5 (130°C/230°C)

A 8.1

Verdichtungsarbeit (Durchlauf des viskoelastischen Bereiches),
Asphaltbetonvarianten 0/11S, Serien 1 und 2

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,1 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	$\phi = 45^\circ$		h			Δh		Kraft		Winkel		U		Ein- waage [kg]	AG		$\Delta AG_{1/2}$ [kpm/kg]	$\Delta AG_{1/2}$ [Nm/kg]
		t ₁ [s]	t ₂ [s]	t = 0s [cm]	t ₁ [cm]	t ₂ [cm]	t ₁ [cm]	t ₂ [cm]	t ₁ [kp]	t ₂ [kp]	t ₁ [°]	t ₂ [°]	t ₁ [-]	t ₂ [-]		t ₁ [kpm/kg]	t ₂ [kpm/kg]		
-	-	13,98	44,34	7,18	7,03	6,82	0,15	0,36	76,12	70,44	1,4142	1,4142	4,7	14,8	1,322	11,2	32,5	21,3	209,1
20% AG1	1	11,75	39,05	7,15	7,03	6,83	0,12	0,32	80,72	71,83	1,4142	1,4142	3,9	13,0	1,336	9,8	28,9	19,0	186,7
20% AG2	1	12,14	56,05	7,14	7,00	6,69	0,14	0,45	76,02	69,78	1,4142	1,4142	4,0	18,7	1,322	9,8	40,7	30,9	303,4
20% AG3	1	10,98	62,18	7,21	7,08	6,74	0,13	0,48	70,89	63,80	1,4142	1,4142	3,7	20,7	1,322	8,3	41,4	33,1	324,5

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	$\phi = 45^\circ$		h			Δh		Kraft		Winkel		U		Ein- waage [kg]	AG		$\Delta AG_{1/2}$ [kpm/kg]	$\Delta AG_{1/2}$ [Nm/kg]
		t ₁ [s]	t ₂ [s]	t = 0s [cm]	t ₁ [cm]	t ₂ [cm]	t ₁ [cm]	t ₂ [cm]	t ₁ [kp]	t ₂ [kp]	t ₁ [°]	t ₂ [°]	t ₁ [-]	t ₂ [-]		t ₁ [kpm/kg]	t ₂ [kpm/kg]		
-	-	13,98	44,34	7,18	7,03	6,82	0,15	0,36	76,12	70,44	1,4142	1,4142	4,7	14,8	1,322	11,2	32,5	21,3	209,1
20% AG1	2	16,01	53,81	7,78	7,63	7,42	0,15	0,37	78,43	66,02	1,4142	1,4142	5,3	17,9	1,327	13,1	36,6	23,6	231,2
20% AG2	2	7,35	57,80	7,90	7,83	7,50	0,08	0,40	73,72	64,09	1,4142	1,4142	2,5	19,3	1,317	5,7	38,6	32,9	322,3
20% AG3	2	11,56	78,52	7,74	7,62	7,25	0,12	0,49	71,37	63,00	1,4142	1,4142	3,9	26,2	1,310	8,8	51,6	42,8	419,7

A 8.2

Verdichtungsarbeit (Durchlauf des viskoelastischen Bereiches),
Asphaltbetonvarianten 0/11S, Serie 3

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,1 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	$\phi = 45^\circ$		h		Δh		Kraft		Winkel		U		Ein- waage [kg]	AG		$\Delta AG_{1/2}$ [kpm/kg]	$\Delta AG_{1/2}$ [Nm/kg]	
		t ₁ [s]	t ₂ [s]	t = 0s [cm]	t ₁ [cm]	t ₂ [cm]	t ₁ [cm]	t ₂ [cm]	t ₁ [kp]	t ₂ [kp]	t ₁ [°]	t ₂ [°]	t ₁ [-]		t ₂ [-]	t ₁ [kpm/kg]			t ₂ [kpm/kg]
-	-	13,98	44,34	7,18	7,03	6,82	0,15	0,36	76,12	70,44	1,4142	1,4142	4,7	14,8	1,322	11,2	32,5	21,3	209,1
20% AG1	3	9,79	59,51	7,06	6,96	6,65	0,10	0,41	73,56	67,35	1,4142	1,4142	3,3	19,8	1,309	7,7	41,9	34,2	335,7
20% AG2	3	8,35	65,85	7,20	7,11	6,74	0,09	0,46	72,02	64,60	1,4142	1,4142	2,8	22,0	1,326	6,3	44,0	37,7	369,2
20% AG3	3	10,14	75,76	7,19	7,06	6,66	0,13	0,54	74,32	65,26	1,4142	1,4142	3,4	25,3	1,315	8,1	51,6	43,5	426,5

A 9.1

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphaltbetonvarianten
0/11S, Serien 1 und 2

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	AG [kpm/kg]	AG [Nm/kg]
-	-	25,15	7,18	6,94	0,24	76,38	1,3691	8,4	1,322	19,5	190,8
20% AG1	1	24,32	7,15	6,92	0,22	79,29	1,3607	8,1	1,336	19,2	187,8
20% AG2	1	30,26	7,14	6,84	0,30	76,68	1,3455	10,1	1,322	23,2	227,2
20% AG3	1	33,16	7,21	6,89	0,32	72,14	1,3200	11,1	1,322	23,5	230,7

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	AG [kpm/kg]	AG [Nm/kg]
-	-	25,15	7,18	6,94	0,24	76,38	1,3691	8,4	1,322	19,5	190,8
20% AG1	2	22,30	7,78	7,58	0,20	77,71	1,3557	7,4	1,327	17,3	169,4
20% AG2	2	25,96	7,90	7,67	0,23	71,36	1,3396	8,7	1,317	18,4	180,8
20% AG3	2	37,21	7,74	7,42	0,32	70,65	1,3196	12,4	1,310	25,9	254,0

A 9.2

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphaltbetonvarianten
0/11S, Serie 3

senkrechter Stempeldruck P_v 7 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	AG [kpm/kg]	AG [Nm/kg]
-	-	25,15	7,18	6,94	0,24	76,38	1,3691	8,4	1,322	19,5	190,8
20% AG1	3	36,45	7,06	6,76	0,30	75,25	1,3336	12,1	1,309	27,2	266,6
20% AG2	3	37,90	7,20	6,87	0,33	71,39	1,3046	12,6	1,326	26,1	255,5
20% AG3	3	40,80	7,19	6,80	0,39	74,17	1,3135	13,6	1,315	29,7	290,9

A 9.3

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel)
Asphaltbindervarianten 0/16, Serien 1 und 2

senkrechter Stempeldruck P_V 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,073 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,0278 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	168,43	7,45	6,93	0,52	73,177	1,2208	56,1	1,374	103,6	1016,0
20% AG1	1	274,99	7,47	6,92	0,55	53,174	1,1507	91,7	1,370	116,1	1138,0
20% AG2	1	87,49	7,41	7,02	0,39	78,869	1,2644	29,2	1,353	61,4	601,8
20% AG3	1	86,31	7,36	7,03	0,33	71,635	1,2440	28,8	1,363	53,6	525,9

senkrechter Stempeldruck P_V 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	168,43	7,45	6,93	0,52	73,177	1,2208	56,1	1,374	103,6	1016,0
20% AG1	2	120,41	7,19	6,90	0,29	76,980	1,2344	40,1	1,367	78,8	772,1
20% AG2	2	202,54	7,28	6,84	0,45	78,693	1,2277	67,5	1,367	134,5	1318,6
20% AG3	2	108,49	7,21	6,87	0,34	75,199	1,2488	36,2	1,343	71,7	703,2

A 9.4

senkrechter Stempeldruck P_V
 Querschnittsfläche F
 Gerätekonstante k

7,0 [kp/cm²]
 81,07 [cm²]
 0,028 [-]

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel)
 Asphaltbindervarianten 0/16, Serie 3

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	168,43	7,45	6,93	0,52	73,177	1,2208	56,1	1,374	103,6	1016,0
20% AG1	3	82,14	7,28	6,96	0,31	70,452	1,2266	27,4	1,359	49,7	487,3
20% AG2	3	397,17	7,36	6,87	0,49	45,620	1,1086	132,4	1,362	138,7	1359,9
20% AG3	3	152,72	7,30	6,89	0,42	66,647	1,2193	50,9	1,363	86,1	844,1

A 9.5

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschicht-varianten 0/32C + 25 AG, Serien 1 und 2

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
25% AG1	1	71,46	7,46	7,06	0,40	88,078	1,2860	23,8	1,391	55,6	544,7
25% AG2	1	71,55	7,50	7,16	0,34	92,760	1,2540	23,9	1,391	56,8	557,1
25% AG3	1	95,88	7,49	7,13	0,35	76,690	1,1978	32,0	1,382	60,5	593,1

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
25% AG1	2	48,95	7,35	7,21	0,14	83,783	1,2150	16,3	1,395	33,7	330,1
25% AG2	2	163,76	7,33	7,01	0,32	72,091	1,1932	54,6	1,389	95,3	934,2
25% AG3	2	251,68	7,35	6,89	0,47	72,626	1,1621	83,9	1,364	146,3	1433,9

A 9.6

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschicht-varianten 0/32C + 25 AG, Serien 3 und 4

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
25% AG1	3	116,01	7,26	6,87	0,39	62,828	1,2006	38,7	1,373	60,7	594,9
25% AG2	3	202,82	7,36	6,91	0,45	71,795	1,2269	67,6	1,376	122,2	1197,6
25% AG3	3	83,59	7,46	7,15	0,30	80,018	1,2509	27,9	1,383	57,3	561,9

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,073 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,0278 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
25% AG1	4	74,27	7,35	7,05	0,30	71,260	1,2398	24,8	1,373	45,5	446,3
25% AG2	4	366,92	7,34	6,83	0,51	62,878	1,1663	122,3	1,384	182,3	1786,9
25% AG3	4	110,39	7,51	7,20	0,32	68,957	1,1951	36,8	1,383	62,3	610,3

A 9.7

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschicht-varianten 0/32C + 40 AG, Serien 1 und 2

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,073 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,0278 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch Ag [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
40% AG1	1	71,59	7,48	7,17	0,30	85,374	1,2501	23,9	1,373	52,8	517,8
40% AG2	1	83,23	10,68	10,33	0,35	86,238	1,2360	27,7	1,380	61,0	598,0
40% AG3	1	171,46	7,56	7,05	0,51	90,890	1,2074	57,2	1,381	128,3	1258,3

senkrechter Stempeldruck P_v 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch Ag [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
40% AG1	2	393,16	7,42	6,89	0,53	64,491	1,3304	131,1	1,429	220,8	2165,1
40% AG2	2	541,15	7,46	6,92	0,53	71,650	1,1743	180,4	1,382	307,5	3014,8
40% AG3	2	129,11	7,40	7,05	0,35	71,468	1,1870	43,0	1,364	75,9	743,7

A 9.8

Verdichtungsarbeit (minimaler Nachlaufwinkel) Asphalttragschicht-varianten 0/32C + 40 AG, Serien 3 und 5

senkrechter Stempeldruck P_V 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,07 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,028 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
40% AG1	3	59,44	7,28	6,94	0,35	65,942	1,2771	19,8	1,373	35,2	345,2
40% AG2	3	81,96	7,41	7,20	0,21	80,551	1,2433	27,3	1,389	55,6	545,2
40% AG3	3	348,43	7,60	7,04	0,56	71,163	1,2377	116,1	1,391	206,7	2026,9

senkrechter Stempeldruck P_V 7,0 [kp/cm²]
 Querschnittsfläche F 81,073 [cm²]
 Gerätekonstante k 0,0278 [-]

AG [%]	Serie	ϕ_M t [s]	Anfangshöhe t=0s [cm]	Höhe [cm]	delta H [cm]	Kraft [kp]	Winkel [°]	Um- drehungen [-]	Einwaage [kg]	spezifisch AG [kpm/kg]	spezifisch AG [Nm/kg]
-	-	101,05	7,40	6,90	0,50	83,228	1,2534	33,7	1,374	73,1	717,1
40% AG1	5	63,64	7,20	6,97	0,23	78,592	1,2206	21,2	1,373	42,1	413,2
40% AG2	5	592,76	7,45	6,95	0,50	72,802	1,1566	197,6	1,380	337,2	3306,4
40% AG3	5	87,81	7,51	7,26	0,25	82,870	1,2267	29,3	1,381	60,9	597,4

				QUERVERFORMUNG					
				Mittelwerte nach Ausreißerprüfung					
				untere Hüllkurve					
Mischgut	AG		S e r i e	Werte im Wendepunkt				Werte in der Asymptote	
	%	Nr.		Zeit TWQ [s]	Lastspielzahl LSPWQ	Querdehnung EPSWQ	Quer- dehnungs- rate VEPSWQ [-/s]	Zeit TAQ [s]	Lastspielzahl LSPAQ
AB 0/11	-	-	1	1,7980E+02	8,9903E+02	1,3361E-03	3,7056E-06	9,1970E+02	4,5986E+03
AB 0/11	20	1	1	1,1881E+02	5,9405E+02	1,5015E-03	7,6901E-06	5,7444E+02	2,8722E+03
AB 0/11	20	2	1	1,0795E+02	3,8484E+02	9,7588E-04	5,8141E-06	6,2092E+02	3,1046E+03
AB 0/11	20	3	1	5,9984E+01	2,9992E+02	2,2838E-03	2,2742E-05	2,4916E+02	1,2458E+03
Bi 0/16	-	-	1	1,7981E+01	8,9906E+01	1,5385E-03	6,3850E-05	8,0514E+01	4,0257E+02
Bi 0/16	20	1	1	2,3654E+01	1,1827E+02	1,7902E-03	5,4450E-05	1,0056E+02	5,0279E+02
Bi 0/16	20	2	1	2,2435E+01	1,1218E+02	1,8303E-03	6,0724E-05	9,5616E+01	4,7809E+02
Bi 0/16	20	3	1	2,4604E+01	1,2302E+02	1,8760E-03	5,4370E-05	1,0313E+02	5,1565E+02
TS 0/32C	-	-	1	2,4564E+01	1,2282E+02	1,7678E-03	6,0202E-05	9,9920E+01	4,9961E+02
TS 0/32C	25	1	1	2,1376E+01	1,0688E+02	9,2358E-04	2,8058E-05	1,1798E+02	5,8987E+02
TS 0/32C	40	1	1	3,4720E+01	1,7360E+02	1,2048E-03	1,8078E-05	1,8618E+02	9,3090E+02
TS 0/32C	25	2	1	2,9797E+01	1,4898E+02	9,8081E-04	1,8237E-05	1,6635E+02	8,3173E+02
TS 0/32C	40	2	1	3,7107E+01	1,8554E+02	7,6294E-04	6,3262E-06	2,2715E+02	1,1358E+03
TS 0/32C	25	3	1	4,1353E+01	2,0676E+02	8,3104E-04	1,0767E-05	2,4164E+02	1,2082E+03
TS 0/32C	40	3	1	1,9267E+01	9,6336E+01	8,4263E-04	2,8672E-05	1,2542E+02	5,3743E+02

A 11.1	Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serie 1
--------	--

				QUERVERFORMUNG					
				Mittelwerte nach Ausreißerprüfung					
				untere Hüllkurve					
Mischgut	AG		S e r i e	Werte im Wendepunkt				Werte in der Asymptote	
	%	Nr.		Zeit TWQ [s]	Lastspielzahl LSPWQ	Querdehnung EPSWQ	Quer- dehnungs- rate VEPSWQ [-/s]	Zeit TAQ [s]	Lastspielzahl LSPAQ
AB 0/11	20	1	2	7,3303E+01	3,6651E+02	1,5480E-03	1,0233E-05	4,0756E+02	2,0378E+03
AB 0/11	20	2	2	6,0460E+01	3,0230E+02	1,8035E-03	1,8993E-05	2,6911E+02	1,3456E+03
AB 0/11	20	3	2	8,1227E+01	4,0613E+02	1,4031E-03	9,2905E-06	4,1476E+02	2,0738E+03
Bi 0/16	20	1	2	6,0423E+01	3,0212E+02	1,6462E-03	1,8375E-05	2,7952E+02	1,3976E+03
Bi 0/16	20	2	2	6,1147E+01	3,0573E+02	8,8989E-04	7,5614E-06	3,5434E+02	1,7717E+03
Bi 0/16	20	3	2	3,2698E+01	1,6349E+02	1,3675E-03	3,2318E-05	1,4542E+02	7,2709E+02
TS 0/32C	25	1	2	1,4425E+01	7,2124E+01	1,1192E-03	6,0867E-05	7,0788E+01	3,5394E+02
TS 0/32C	40	1	2	1,1172E+01	5,5858E+01	6,7760E-04	7,5632E-05	5,9751E+01	2,9876E+02
TS 0/32C	25	2	2	3,7820E+01	1,8910E+02	6,9962E-04	8,8680E-06	2,8491E+02	1,4246E+03
TS 0/32C	40	2	2	1,5422E+01	7,7110E+01	7,5652E-04	3,5741E-05	8,6386E+01	4,3194E+02
TS 0/32C	25	3	2	2,1865E+01	1,0933E+02	8,4727E-04	2,6120E-05	9,9743E+01	4,9872E+02
TS 0/32C	40	3	2	8,9030E+00	4,4515E+01	4,9083E-04	5,4916E-05	5,0676E+01	2,5338E+02

A 11.2	Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serie 2
--------	--

				QUERVERFORMUNG						
				Mittelwerte nach Ausreißerprüfung						
				untere Hüllkurve						
Mischgut	AG		S e r i e	Werte im Wendepunkt				Werte in der Asymptote		
	%	Nr.		Zeit TWQ [s]	Lastspielzahl LSPWQ	Querdehnun g EPSWQ	Quer- dehnungs-rate VEPSWQ [-/s]	Zeit TAQ [s]	Lastspiel- zahl LSPAQ	
AB 0/11	20	1	3	5,4208E+01	2,7105E+02	1,0511E-03	1,2664E-05	2,7681E+02	1,3840E+03	
AB 0/11	20	2	3	8,1776E+01	4,0888E+02	1,3779E-03	1,0128E-05	4,1639E+02	2,0820E+03	
AB 0/11	20	3	3	7,0687E+01	3,5343E+02	1,2265E-03	8,8336E-06	3,8096E+02	1,9048E+03	
Bi 0/16	20	1	3	3,2497E+01	1,6249E+02	1,2377E-03	2,4537E-05	1,6651E+02	8,3255E+02	
Bi 0/16	20	2	3	2,2886E+01	1,1443E+02	1,1284E-03	3,6486E-05	1,2804E+02	6,4020E+02	
Bi 0/16	20	3	3	5,0171E+01	2,5086E+02	1,3220E-03	1,3457E-05	2,6468E+02	1,3234E+03	
TS 0/32C	25	1	3	3,0114E+01	1,5057E+02	9,3083E-04	2,2375E-05	1,6566E+02	8,2831E+02	
TS 0/32C	40	1	3	4,9699E+01	2,4850E+02	6,9731E-04	8,8270E-06	2,3783E+02	1,1892E+03	
TS 0/32C	25	2	3	1,3561E+01	6,7805E+01	7,4980E-04	4,7048E-05	7,6496E+01	3,8247E+02	
TS 0/32C	40	2	3	9,5626E+00	4,7813E+01	6,7191E-04	5,4038E-05	5,3697E+01	2,6849E+02	
TS 0/32C	25	3	3	2,6538E+01	1,3270E+02	6,1800E-04	1,1674E-05	1,6049E+02	8,0245E+02	
TS 0/32C	40	3	3	8,9258E+00	4,4629E+01	8,2630E-04	7,2264E-05	4,8516E+01	2,4258E+02	

A 11.3	Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serie 3
--------	--

				QUERVERFORMUNG					
				Mittelwerte nach Ausreißerprüfung					
				untere Hüllkurve					
Mischgut	AG		S e r i e	Werte im Wendepunkt				Werte in der Asymptote	
	%	Nr.		Zeit TWQ [s]	Lastspielzahl LSPWQ	Querdehnung EPSWQ	Quer- dehnungs- rate VEPSWQ [-/s]	Zeit TAQ [s]	Lastspielzahl LSPAQ
TS 0/32C	25	1	4	6,0903E+01	3,0452E+02	6,8038E-04	6,7007E-06	3,6843E+02	1,8422E+03
TS 0/32C	25	2	4	1,8097E+01	9,0484E+01	3,3996E-04	1,9978E-05	1,1186E+02	5,5929E+02
TS 0/32C	25	3	4	5,8303E+01	2,9151E+02	4,0503E-04	5,9665E-06	3,7511E+02	1,8755E+03
TS 0/32C	40	1	5	3,5334E+01	1,7667E+02	7,2923E-04	1,1536E-05	1,8436E+02	9,2177E+02
TS 0/32C	40	2	5	2,1299E+01	1,0650E+02	4,5849E-04	1,2337E-05	1,3067E+02	6,5332E+02
TS 0/32C	40	3	5	1,3004E+01	6,5019E+01	4,2907E-04	3,2828E-05	8,0370E+01	4,0185E+02

A 11.4	Querverformung im Spaltzugschwellversuch, Mittelwerte, Serien 4 und 5
---------------	---

Serie	AG-Anteil	Referenz- mischung	Serie 1 (AG-Anteil 20%)			Serie 2 (AG-Anteil 20%)			Serie 3 (AG-Anteil 20%)		
			AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3
Referenzm.	-		3,98E-06	2,11E-06	1,90E-05	6,53E-06	1,53E-05	5,58E-06	8,96E-06	6,42E-06	5,13E-06
Serie1	+ 20% AG1			1,88E-06	1,51E-05	2,54E-06	1,13E-05	1,60E-06	4,97E-06	2,44E-06	1,14E-06
	+ 20% AG2				1,69E-05	4,42E-06	1,32E-05	3,48E-06	6,85E-06	4,31E-06	3,02E-06
	+ 20% AG3					1,25E-05	3,75E-06	1,35E-05	1,01E-05	1,26E-05	1,39E-05
Serie2	+ 20% AG1						8,76E-06	9,42E-07	2,43E-06	1,05E-07	1,40E-06
	+ 20% AG2							9,70E-06	6,33E-06	8,86E-06	1,02E-05
	+ 20% AG3								3,37E-06	8,38E-07	4,57E-07
Serie3	+ 20% AG1									2,54E-06	3,83E-06
	+ 20% AG2										1,29E-06
	+ 20% AG3										

A 11.5

Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt VEPSWQ der Asphaltbetonvarianten 0/11S (Schattierung)

Serie	AG-Anteil	Referenz- mischung	Serie 1 (AG-Anteil 20%)			Serie 2 (AG-Anteil 20%)			Serie 3 (AG-Anteil 20%)		
			AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3
Referenzm.	-		1,718E+03	1,486E+03	3,345E+03	2,553E+03	3,245E+03	2,517E+03	3,207E+03	2,509E+03	2,686E+03
Serie1	+ 20% AG1			2,324E+02	1,626E+03	8,344E+02	1,527E+03	7,984E+02	1,488E+03	7,903E+02	9,674E+02
	+ 20% AG2				1,859E+03	1,067E+03	1,759E+03	1,031E+03	1,721E+03	1,023E+03	1,200E+03
	+ 20% AG3					7,920E+02	9,977E+01	8,280E+02	1,382E+02	8,362E+02	6,590E+02
Serie2	+ 20% AG1						6,922E+02	3,597E+01	6,538E+02	4,415E+01	1,331E+02
	+ 20% AG2							7,282E+02	3,847E+01	7,364E+02	5,592E+02
	+ 20% AG3								6,897E+02	8,183E+00	1,690E+02
Serie3	+ 20% AG1									6,979E+02	5,207E+02
	+ 20% AG2										1,772E+02
	+ 20% AG3										

A 11.6

Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Lastspielzahlen in der Asymptote der Querverformung LSPAQ der Asphaltbetonvarianten 0/11S (Schattierung)

Serie	AG-Anteil	Referenz- mischung	Serie 1 (AG-Anteil 20%)			Serie 2 (AG-Anteil 20%)			Serie 3 (AG-Anteil 20%)		
			AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3
Referenzm.	-		9,40E-06	3,13E-06	9,48E-06	4,55E-05	5,63E-05	3,15E-05	3,93E-05	2,74E-05	5,04E-05
Serie1	+ 20% AG1			6,27E-06	8,00E-08	3,61E-05	4,69E-05	2,21E-05	2,99E-05	1,80E-05	4,10E-05
	+ 20% AG2				6,35E-06	4,23E-05	5,32E-05	2,84E-05	3,62E-05	2,42E-05	4,73E-05
	+ 20% AG3					3,60E-05	4,68E-05	2,21E-05	2,98E-05	1,79E-05	4,09E-05
Serie2	+ 20% AG1						1,08E-05	1,39E-05	6,16E-06	1,81E-05	4,92E-06
	+ 20% AG2							2,48E-05	1,70E-05	2,89E-05	5,90E-06
	+ 20% AG3								7,78E-06	4,17E-06	1,89E-05
Serie3	+ 20% AG1									1,19E-05	1,11E-05
	+ 20% AG2										2,30E-05
	+ 20% AG3										

A 11.7

Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Querdehnungsraten im Wendepunkt VEP_{SWQ} der Asphaltbindervarianten 0/16 (Schattierung)

Serie	AG-Anteil	Referenz- mischung	Serie 1 (AG-Anteil 20%)			Serie 2 (AG-Anteil 20%)			Serie 3 (AG-Anteil 20%)		
			AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3	AG1	AG2	AG3
Referenzm.	-		0,102	0,068	0,109	0,541	0,631	0,262	0,313	0,208	0,522
Serie1	+ 20% AG1			0,034	0,007	0,439	0,529	0,160	0,211	0,106	0,421
	+ 20% AG2				0,041	0,472	0,563	0,193	0,245	0,139	0,454
	+ 20% AG3					0,431	0,522	0,152	0,203	0,098	0,413
Serie2	+ 20% AG1						0,091	0,279	0,228	0,333	0,018
	+ 20% AG2							0,370	0,318	0,423	0,109
	+ 20% AG3								0,051	0,054	0,261
Serie3	+ 20% AG1									0,105	0,210
	+ 20% AG2										0,315
	+ 20% AG3										

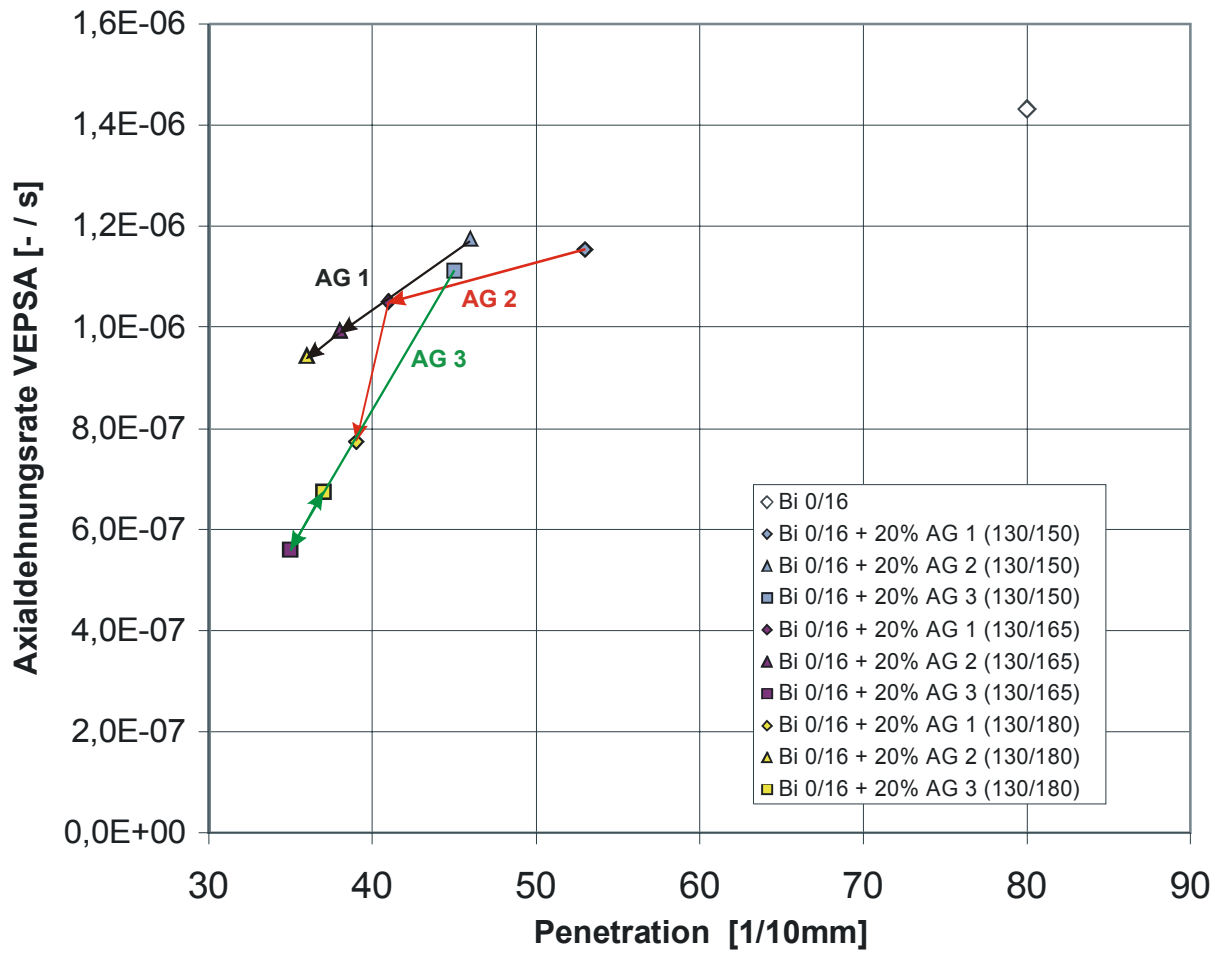
A 11.8

Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Lastspielzahlen in der Asymptote der Querverformung LSPAQ der Asphaltbindervarianten 0/16 (Schattierung)

Serie	AG Anteil	Ref.	Serie 1			Serie 2			Serie 3			Serie 4			Serie 1			Serie 2			Serie 3			Serie 5		
			AG1 25%	AG2 25%	AG3 25%	AG1 25%	AG2 25%	AG3 25%	AG1 25%	AG2 25%	AG3 25%	AG1 25%	AG2 25%	AG3 25%	AG1 40%	AG2 40%	AG3 40%	AG1 40%	AG2 40%	AG3 40%	AG1 40%	AG2 40%	AG3 40%	AG1 40%	AG2 40%	AG3 40%
Ref.	-		9,0E+01	3,3E+02	7,1E+02	1,5E+02	9,2E+02	9,0E-01	3,3E+02	1,2E+02	3,0E+02	1,3E+03	6,0E+01	1,4E+03	4,3E+02	6,4E+02	3,8E+01	2,0E+02	6,8E+01	2,5E+02	6,9E+02	2,3E+02	2,6E+02	4,2E+02	1,5E+02	9,8E+01
1	25% AG1			2,4E+02	6,2E+02	2,4E+02	8,3E+02	9,1E+01	2,4E+02	2,1E+02	2,1E+02	1,3E+03	3,1E+01	1,3E+03	3,4E+02	5,5E+02	5,2E+01	2,9E+02	1,6E+02	3,4E+02	6,0E+02	3,2E+02	3,5E+02	3,3E+02	6,3E+01	1,9E+02
	25% AG2				3,8E+02	4,8E+02	5,9E+02	3,3E+02	3,4E+00	4,5E+02	2,9E+01	1,0E+03	2,7E+02	1,0E+03	9,9E+01	3,0E+02	2,9E+02	5,3E+02	4,0E+02	5,8E+02	3,6E+02	5,6E+02	5,9E+02	9,0E+01	1,8E+02	4,3E+02
	25% AG3					8,5E+02	2,2E+02	7,1E+02	3,8E+02	8,3E+02	4,1E+02	6,3E+02	6,5E+02	6,7E+02	2,8E+02	7,2E+01	6,7E+02	9,1E+02	7,8E+02	9,5E+02	1,9E+01	9,4E+02	9,7E+02	2,9E+02	5,5E+02	8,1E+02
2	25% AG1					1,1E+03	1,4E+02	4,7E+02	2,9E+01	4,5E+02	1,5E+03	2,1E+02	1,5E+03	5,8E+02	7,8E+02	1,8E+02	5,5E+01	7,8E+01	1,0E+02	8,4E+02	8,5E+01	1,1E+02	5,7E+02	3,0E+02	4,8E+01	
	25% AG2						9,3E+02	6,0E+02	1,0E+03	6,2E+02	4,2E+02	8,7E+02	4,5E+02	4,9E+02	2,9E+02	8,9E+02	1,1E+03	9,9E+02	1,2E+03	2,4E+02	1,2E+03	1,2E+03	5,0E+02	7,7E+02	1,0E+03	
	25% AG3							3,3E+02	1,2E+02	3,0E+02	1,3E+03	6,1E+01	1,4E+03	4,3E+02	6,4E+02	3,9E+01	2,0E+02	6,7E+01	2,5E+02	6,9E+02	2,3E+02	2,6E+02	4,2E+02	1,5E+02	9,7E+01	
3	25% AG1							4,5E+02	2,6E+01	1,0E+03	2,7E+02	1,0E+03	1,0E+02	3,1E+02	2,9E+02	5,3E+02	4,0E+02	5,7E+02	3,6E+02	5,6E+02	5,9E+02	9,3E+01	1,7E+02	4,3E+02		
	25% AG2								4,2E+02	1,5E+03	1,8E+02	1,5E+03	5,5E+02	7,5E+02	1,5E+02	6,4E+01	4,9E+01	1,3E+02	8,1E+02	1,1E+02	1,4E+02	5,4E+02	2,7E+02	1,9E+01		
	25% AG3									1,0E+03	2,4E+02	1,1E+03	1,3E+02	3,3E+02	2,7E+02	5,0E+02	3,7E+02	5,5E+02	3,9E+02	5,3E+02	5,6E+02	1,2E+02	1,5E+02	4,0E+02		
4	25% AG1										1,3E+03	3,3E+01	9,1E+02	7,1E+02	1,3E+03	1,5E+03	1,4E+03	1,6E+03	6,5E+02	1,6E+03	1,6E+03	9,2E+02	1,2E+03	1,4E+03		
	25% AG2											1,3E+03	3,7E+02	5,8E+02	2,2E+01	2,6E+02	1,3E+02	3,1E+02	6,3E+02	2,9E+02	3,2E+02	3,6E+02	9,4E+01	1,6E+02		
	25% AG3												9,4E+02	7,4E+02	1,3E+03	1,6E+03	1,4E+03	1,6E+03	6,9E+02	1,6E+03	1,6E+03	9,5E+02	1,2E+03	1,5E+03		
1	40% AG1														2,0E+02	3,9E+02	6,3E+02	5,0E+02	6,8E+02	2,6E+02	6,6E+02	6,9E+02	9,1E+00	2,8E+02	5,3E+02	
	40% AG2														6,0E+02	6,4E+02	7,0E+02	8,8E+02	5,3E+01	8,7E+02	8,9E+02	2,1E+02	4,8E+02	7,3E+02		
	40% AG3														2,4E+02	1,1E+02	2,8E+02	6,5E+02	2,7E+02	2,9E+02	3,8E+02	1,2E+02	1,4E+02			
2	40% AG1															1,3E+02	4,5E+01	8,9E+02	3,0E+01	5,6E+01	6,2E+02	3,5E+02	1,0E+02			
	40% AG2															1,8E+02	7,6E+02	1,6E+02	1,9E+02	4,9E+02	2,2E+02	3,0E+01				
	40% AG3															9,4E+02	1,5E+01	1,1E+01	6,7E+02	4,0E+02	1,5E+02					
3	40% AG1																		9,2E+02	9,5E+02	2,7E+02	5,4E+02	7,9E+02			
	40% AG2																		2,6E+01	6,5E+02	3,8E+02	1,3E+02				
	40% AG3																		6,8E+02	4,1E+02	1,6E+02					
5	40% AG1																					2,7E+02	5,2E+02			
	40% AG2																						2,5E+02			
	40% AG3																									

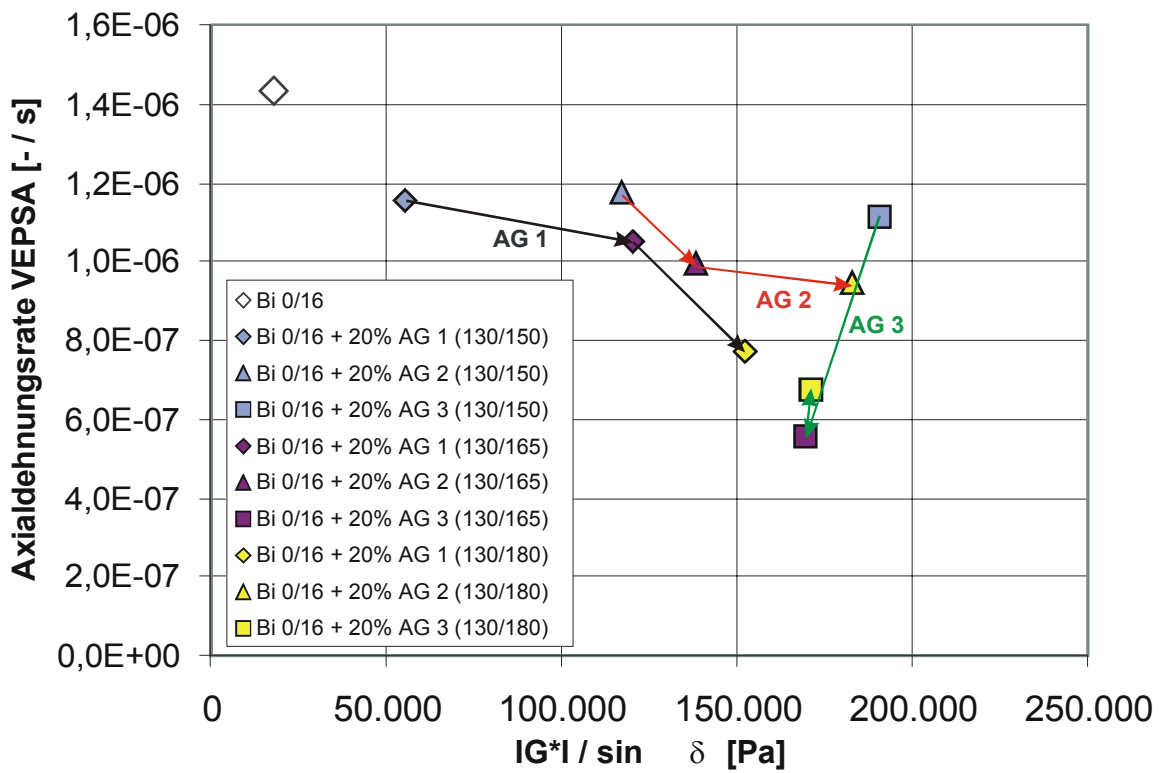
A 11.10

Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Lastspielzahlen in der Asymptote der Querverformung LSPAQ der Asphalttragschichtvarianten 0/32C (Schattierung)

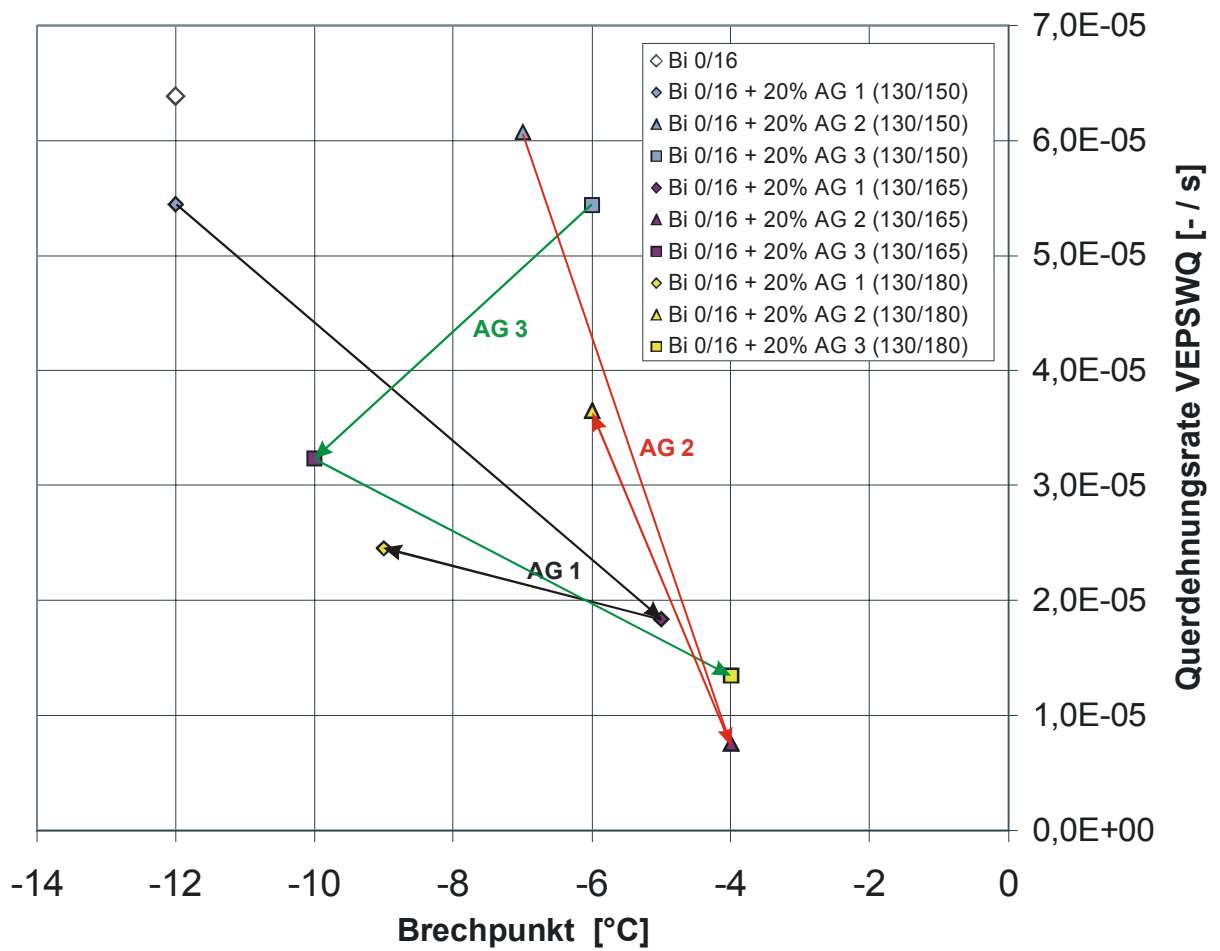


A 12.1

Asphaltbindervarianten 0/16 - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Nadelpenetrationen der rückgewonnenen Bindemittel in den Serien 1 bis 3



A 12.2	Asphaltbindervarianten 0/16 - Zusammenhang zwischen den Axialdehnungsraten nach 4.500 Lastwechseln und den Kennwerten $IG \cdot I / \sin \delta$ der rückgewonnenen Bindemittel im Schubwechselversuch bei 50°C in den Serien 1 bis 3
--------	---



A 12.3	Asphaltbindervarianten 0/16 im Spaltzugschwellversuch bei 20°C - Zusammenhang zwischen der Querdehnungsrate VEPSWQ im Wendepunkt (Beginn der Bruchphase) und dem Brechpunkt nach Fraaß der rückgewonnenen Bindemittel in den Serien 1 bis 3
--------	---

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

1965 geboren in Bad Wildungen

Bildungsweg

1985 Abitur am Gustav-Stresemann-Gymnasium in Bad Wildungen

1985 – 1986 Wehrdienst

1986 – 1994 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt, Abschluss Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Berufstätigkeit

1994 – 1997 Projektingenieur der Bauunternehmung Friedrich Ruwenstroth KG in Bad Wildungen

1997 – 1998 Bauleiter der Bauunternehmung Fröhlich Bau AG in Kassel

seit 1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt, Institut für Verkehr der Technischen Universität Darmstadt

2003 Promotion zum Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)