

Schlussbericht für den Zeitraum: 01. Mai 2006 bis 31. August 2008

(Forschungsstelle 1 von 1)

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

- Normalverfahren
 Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema:

Herstellung von Niedrigtemperaturasphalt (Walzasphalt) unter Verwendung von Schaumbitumen: „Schaumbitumen-Heißmischgut“

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- ist beigefügt
 liegt bereits vor
 wird fristgerecht nachgereicht

Neubiberg, 28.11.2008

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters

Kurzfassung

Forschungsziele des mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (abgekürzt: AiF) geförderten Forschungsvorhabens sind der Nachweis der grundsätzlichen Eignung von Schaumbitumen für die Heißmischgutherstellung sowie die Ermittlung der optimalen Randbedingungen für die Mischgutherstellung und -verarbeitung des „Schaumbitumenasphalts“. Das heißt, es soll die minimal mögliche Misch- und Verdichtungstemperatur ermittelt werden, bei der der Schaumbitumenasphalt die gleiche Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit hat, wie Asphalt der bei den in den *ZTV Asphalt-StB 01* festgelegten Temperaturen hergestellt wurde (im Weiteren „Referenzasphalt“ genannt).

Hierzu wurden im Untersuchungsteil 1 die zur Herstellung des Schaumbitumens festzulegenden Parameter, wie Wassermenge, Wasserdruck, Luftdruck usw., optimiert. Außerdem wurden, um mögliche Auswirkungen des Aufschäumens auf die Eigenschaften des Bitumens aufzuzeigen, nicht nur die klassischen Bindemittelkennwerte, wie Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, sondern zusätzlich die dynamische Viskosität des geschäumten, des mit Additiv geschäumten und des ungeschäumten Bindemittels gegenübergestellt. Untersucht wurden die Straßenbaubitumen 70/100 und 50/70 von 4 Lieferraffinerien. Mit diesem Untersuchungsschritt konnte nachgewiesen werden, dass durch das Aufschäumen die o. g. Kennwerte nicht verändert werden und Schaumbitumen somit zur Asphaltherstellung geeignet ist.

Im Untersuchungsteil 2 wurden in einem ersten Schritt mit den Prüfverfahren „Verdichtbarkeit mit dem Gyrator-Verdichter“, „Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper“ und „Hohlraumgehalt an Probeplatten“ eine für die Herstellung des Schaumbitumenasphalts geeignete Mischtemperatur von 140 °C bis 150 °C und eine minimal mögliche Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts von 110 °C ermittelt. In einem zweiten Schritt wurde die Gebrauchstauglichkeit des mit den unter Schritt 1 ermittelten Misch- und Verdichtungstemperaturen hergestellten Schaumbitumenasphalts der Gebrauchstauglichkeit des Referenzasphalts gegenübergestellt. Die Prüfverfahren waren: Marshall-Prüfung (Marshall-Stabilität und Marshallfließwert), Spurbildungsversuch, indirekte Zugprüfung, einaxialer Druckschwellversuch und Prüfung der Wasserempfindlichkeit. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Gebrauchsverhalten des Schaumbitumenasphalts nach 21 Tagen nahezu vollständig dem des Referenzasphalts entspricht.

Im Untersuchungsteil 3 wurde aufgrund der Untersuchungsergebnisse des Teils 2 großtechnisch in einer Asphaltmischanlage hergestellter Schaumbitumenasphalt als Deckschicht auf einer Staatsstraße eingebaut. Hierzu wurde die etwa 3 km lange Strecke abzüglich eines 100 m langen Probefelds in 4 gleichlange Abschnitte unterteilt. Im Probefeld und in zwei Abschnitten wurde Schaumbitumenasphalt und in den übrigen Abschnitten wurde Referenzasphalt eingebaut. Ein Jahr nach dem Einbau der Deckschicht ist beim Gebrauchsverhalten zwischen dem Schaumbitumenasphalt und dem Referenzasphalt kein Unterschied erkennbar.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Mit diesem Forschungsvorhaben konnte nachgewiesen werden, dass durch Einsatz von Schaumbitumen die Mischtemperatur gegenüber den herkömmlichen Temperaturen um ca. 30 °C auf 140 °C bis 150 °C reduziert und die Verdichtungstemperatur bei gleichbleibender Verdichtbarkeit und Gebrauchstauglichkeit um ca. 40 °C auf 110 °C reduziert werden kann.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sollen in der Zeitschrift „Straße + Autobahn“, in der Zeitschrift „asphalt“ und in den „Informationen Forschung im Straßen- und Verkehrswesen – Teil Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ veröffentlicht werden. Zwischenergebnisse wurden bereits in einem Beitrag zum „Asphaltseminar 2008“ in Willingen vorgestellt. Der vorliegende Schlussbericht soll in der Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen und Raumplanung an der Universität der Bundeswehr München veröffentlicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	3
2.1	Problemstellung	3
2.2	Forschungsziele	4
3	Möglichkeiten der Temperaturreduzierung	7
3.1	National	7
3.2	International	9
4	Untersuchungsprogramm	13
5	Schaumbitumen- und Probekörperherstellung	25
5.1	Schaumbitumenherstellung	25
5.2	Probekörperherstellung und Gewinnung der Ausbaustücke	27
5.2.1	Mischgutzusammensetzung.....	27
5.2.2	Marshall-Probekörper	27
5.2.3	Probepplatten.....	29
5.2.4	Ausbaustücke	30
6	Untersuchungsverfahren	31
6.1	Bindemitteluntersuchungen	31
6.1.1	Schnelltest	31
6.1.2	Nadelpenetration.....	31
6.1.3	Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK).....	32
6.1.4	Dynamische Viskosität.....	33
6.2	Mischgutuntersuchungen	35
6.2.1	Rohdichte.....	35
6.2.2	Raumdichte.....	36
6.2.3	Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad.....	37
6.2.4	Verdichtbarkeit	38
6.2.5	Marshall-Prüfung.....	41
6.2.6	Spurbildungsversuch	43
6.2.7	Indirekte Zugprüfung.....	46
6.2.8	Wasserempfindlichkeit	48

6.2.9	Einaxialer Druckschwellversuch.....	49
6.2.10	Griffigkeitsmessung.....	51
6.2.11	Zerstörungsfreie Dichtemessung	53
7	Untersuchungsergebnisse	55
7.1	Bindemitteluntersuchungen	55
7.2	Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor	68
7.2.1	Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts.....	68
7.2.2	Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts	73
7.3	Großtechnische Herstellung und Einbau	82
8	Schlussbetrachtung	99
8.1	Zusammenfassung	99
8.2	Ausblick	104
	Literaturverzeichnis	107
	Abkürzungsverzeichnis	109
	Tabellenverzeichnis	113
	Bilderverzeichnis	115
	Anhangteil	117

1 Einleitung

Aus Sicht der Asphaltmischgutproduzenten ist eine Reduzierung der Mischtemperatur erstrebenswert, da nicht nur die Asphaltmischanlagen geschont, der Energiebedarf und die Kosten reduziert, sondern zusätzlich die Umweltbelastungen, wie CO₂-Emissionen, vermindert werden. Mit einer niedrigeren Verarbeitungstemperatur nehmen außerdem die Exposition des Einbaupersonals und die Belastung von Anliegern an innerörtlichen Baustellen ab. Eine Temperaturreduzierung, die in Deutschland durch Zugabe von Zusätzen realisiert wird, ist demnach aus verschiedenen Gründen wünschenswert. Der Einsatz von Schaumbitumen bietet eine weitere Möglichkeit, die Misch- und Verarbeitungstemperatur von Heißasphalt zu reduzieren. Bisher liegen keine Erfahrungen in der Herstellung von Heißmischgut mit Schaumbitumen vor. Diese Lücke soll mit diesem Forschungsprojekt geschlossen werden.

Die großzügige Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, vermittelt durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. und die AiF-Mitgliedsvereinigung Deutsches Asphaltinstitut e. V. (DAI), haben dieses Projekt letztendlich ermöglicht. Mit dem Zuwendungsbescheid vom 11.05.2006 wurde die Projektförderung für den Bewilligungszeitraum vom 01.05.2006 bis 30.04.2008 gewährt. Gleichzeitig wurde der projektbegleitende Ausschuss mit den folgenden Herren gebildet: Dipl.-Ing. Thomas Behle, Dipl.-Ing. Franz Bommert, Dipl.-Ing. Lothar Drüschner, Dr.-Ing. Karl-Heinz Kolb, Dr.-Ing. Michael Schmalz, Dipl.-Ing. Hans-Georg Stutz, Dipl.-Ing. André Täube, Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmüt Wellner. Aufgrund von Problemen beim Einbau des Schaumbitumenasphaltes auf der Versuchsstrecke (der Einbau musste mehrere Male wegen schlechter Witterungsbedingungen verschoben werden, zusätzlich gab es beim Liefermischwerk einen Defekt an einem Steuerventil) wurde eine Verlängerung des Forschungsvorhabens ohne Änderung des Finanzierungsplans um 4 Monate beantragt und genehmigt, so dass der Bewilligungszeitraum bis zum 31.08.2008 verlängert wurde. Das Projekt konnte in vollem Umfang gemäß dem Forschungsantrag und im dafür vorgesehenen Zeitplan abgewickelt werden.

Besonderer Dank gilt insbesondere den Bayerischen Asphalt-Mischwerken, ohne die eine großtechnische Herstellung des „Schaumbitumen-Heißmischguts“ nicht möglich

gewesen wäre und dem Staatlichen Bauamt München – Außenstelle Weilheim, die diesem Forschungsprojekt aufgeschlossen gegenüberstanden und eine geeignete Straßenstrecke zum Einbau des Schaumbitumen-Heißmischguts bereitstellten, sowie der Einbaufirma Klaus Hoch- und Tiefbau, die mit Ihrer praktischen Erfahrung zum erfolgreichen Abschluss des Einbaus des Schaumbitumen-Heißmischguts beitrug. Allen – den hier genannten und den nicht genannten –, die diese Untersuchung mit Rat und Tat unterstützt haben, sei an dieser Stelle ganz herzlich gedankt.

Anmerkung:

Da während des Bearbeitungszeitraums des Forschungsvorhabens nationale Normen, z. B. DIN 1996, Teil 1 bis 20, zurückgezogen und durch europäische Normen ersetzt wurden, wird im Weiteren teilweise auf zurückgezogene und ersetzte Normen oder Prüfvorschriften Bezug genommen. Auf die gewonnenen Erkenntnisse hat dies jedoch keinen Einfluss, da die zu Beginn des Forschungsvorhabens gültigen Prüfverfahren und Normen durchgängig angewandt wurden.

2 Aufgabenstellung

2.1 Problemstellung

Unter Niedrigtemperaturasphalt versteht man Asphaltgemische, die mit niedrigeren Temperaturen als den in den *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 01)* oder in den *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Trag-schichten im Straßenbau (ZTV T-StB 95)* angegebenen Grenzwerten hergestellt und verarbeitet werden. Die Mischtemperaturen von Walzasphalt (Heißeinbau) liegen in der heutigen Mischanlagenpraxis zwischen 160 °C und 180 °C. Aus verschiedenen Gründen (Energiebilanz, Umweltschutz, Arbeitsschutz usw.) sind Temperaturreduzierungen bei der Heißmischgutherstellung und beim Einbau des Asphaltmischguts wünschenswert.

Im *Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt (M TA)* der FGSV-Arbeitsgruppe Asphaltstraßen werden verschiedene Verfahren zur Temperaturreduzierung aufgezeigt. Gemäß dem Merkblatt sind zwei zielführende Möglichkeiten genannt: der Einsatz von Sonderbindemitteln und organischen Zusätzen sowie die Zugabe mineralischer Zusätze. Hiermit kann lt. Merkblatt eine Absenkung der Misch- und Einbautemperaturen von 20 °C bis 30 °C erzielt werden. Der Einsatz dieser Zusätze oder Sonderbindemittel ist jedoch relativ teuer. Die Verwendung von „Schaumbitumen-Heißmischgut“ (im Weiteren als „Schaumbitumenasphalt“ bezeichnet) – eine weitere Möglichkeit Niedrigtemperaturasphalt herzustellen – wird in dem Merkblatt aufgrund fehlender praktischer Erfahrungen nicht beschrieben.

Nach den bisherigen Erfahrungen können mit Schaumbitumen die Mischtemperaturen – bei gleich bleibender Verarbeitbarkeit – auf 110 °C bis 120 °C abgesenkt werden. Es sind sogar Versuche mit einem Verzicht auf eine vollständige Trocknung der Mineralstoffe bekannt, wodurch Mischtemperaturen von unter 100 °C erreicht wurden (GERHARD).

Durch den Einsatz von Schaumbitumen bei der Herstellung von Heißasphalt können die Misch- und Einbautemperaturen kostengünstig und ohne größeren Aufwand deutlich reduziert werden. Somit werden die Asphaltmischanlagen geschont, der E-

nergiebedarf und die Kosten reduziert sowie die Umweltbelastungen (CO₂-Emissionen) vermindert. Außerdem nehmen die Exposition des Einbaupersonals und die Belastung von Anliegern an innerörtlichen Baustellen aufgrund der niedrigeren Einbautemperaturen ab.

Bislang fehlen praktische Erfahrungen mit Schaumbitumenasphalt, insbesondere zum Einfluss des aufgeschäumten Bitumens auf die Verdichtbarkeit und die Gebrauchseigenschaften des damit hergestellten Asphalts. Außerdem gibt es noch keine Erfahrungen mit dem Einsatz von Schaumbitumen bei der Herstellung von Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichtmischgut in großtechnischen Asphaltmischanlagen.

Das hier dokumentierte Forschungsvorhaben soll dazu beitragen, diese Lücke zu schließen.

2.2 Forschungsziele

Konkrete Forschungsziele sind der Nachweis der grundsätzlichen Eignung von Schaumbitumen für die Heißmischgutherstellung sowie die Ermittlung der optimalen Randbedingungen für die Mischgutherstellung und -verarbeitung (z. B. Mischtemperatur, Verdichtungstemperatur). Der Nachweis soll am Beispiel von Deckschichtmischgut (Asphaltbeton) erbracht werden. Dazu wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit Schaumbitumenasphalt sowohl im Labor als auch in großtechnischen Asphaltmischanlagen hergestellt. Untersucht werden sollen die Verdichtbarkeit des mit Schaumbitumen hergestellten Heißasphaltes und letztlich die Gebrauchseigenschaften der eingebauten Asphaltsschicht, und zwar durch Vergleich mit den jeweiligen Referenzfällen „mit nicht aufgeschäumtem Bitumen“. Untersucht werden soll auch, wie sich die Verarbeitbarkeit des Schaumbitumenasphalts in Abhängigkeit von der Zeit verändert. Des Weiteren soll das rheologische Verhalten von Schaumbitumen untersucht und dem des nicht aufgeschäumten Bitumens gleicher Sorte und Rohölprovenienz gegenübergestellt werden.

Der innovative Beitrag des Forschungsvorhabens ist der Nachweis der Machbarkeit und Gebrauchstauglichkeit von Schaumbitumenasphalt unter Praxisbedingungen. Es soll nachgewiesen werden, dass Schaumbitumen nicht nur beim Kaltrecycling, sondern auch zur Herstellung von Heißasphaltemischgut in stationären Chargenmischanlagen eingesetzt werden kann.

3 Möglichkeiten der Temperaturreduzierung

3.1 National

Wie im *Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt (M TA)* beschrieben, stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Temperaturabsenkung zur Verfügung. Grundsätzlich werden im *M TA* zwei Möglichkeiten, die Verwendung von viskositätsveränderten Bindemitteln oder organischen Zusätzen (z. B. Amid-Wachse oder Parafine) und die Verwendung von viskositätsverändernden mineralischen Zusätzen (z. B. Zeolithe), die eine Temperaturreduzierung zwischen 20 °C und 30 °C ermöglichen, beschrieben. Nach RADENBERG lassen sich aber nicht alle Produkte und Verfahren bei Walzasphalt und Gussasphalt gleichermaßen einsetzen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Eignung von Produkten und Verfahren zur Temperaturreduzierung

Produkt bzw. Verfahren Mischgutart	Viskositätveränderte Bindemittel oder organische Zusätze	Viskositätsverändernde mineralische Zusätze	Verfahrenstechnische Maßnahmen
Walzasphalt	+	+	+
Gussasphalt	+	-	1)

Erläuterungen:

+ geeignet

- nicht geeignet

¹⁾ keine Zuordnung möglich, da keine Erfahrungen vorliegen

Unter viskositätsveränderten Bindemitteln versteht man gebrauchsfertige Bindemittel nach *DIN EN 12591*, *DIN EN 13305* und den *Technischen Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen (TL PmB)*, deren rheologischen Eigenschaften durch Zugabe von geeigneten Zusätzen so verändert werden, dass die Misch- und Einbau- bzw. Verdichtungstemperatur gegenüber den in den *ZTV Asphalt-StB 01* vorgegebenen Temperaturen abgesenkt werden kann. Im Gegensatz zu den viskositätsveränderten Bindemitteln, die gebrauchsfertig an die Mischanlage geliefert werden, werden die organischen Zusätze erst an der Mischanlage bei der Herstellung des Mischguts zugegeben. Die viskositätsverändernden organischen Zusätze gehören grundsätzlich der Stoffgruppe „Wachse“ an. Nach RADENBERG eignen sich jedoch nicht alle Wachse/Parafine gleichermaßen. Besonders geeignet sind Wachse mit Hauptkomponenten aus Fettsäureamiden, Fettsäureestern oder langkettigen aliphatischen Kohlewasserstoffen, die im Temperaturbereich von 100 °C bis

200 °C eine geringere Viskosität als die bitumeneigenen Parafine aufweisen und somit grundsätzlich im Gussasphalt und im Walzasphalt Verwendung finden.

Bei der Temperaturreduzierung mit viskositätsverändernden mineralischen Zusätzen werden bei der Herstellung des temperaturabgesenkten Asphaltmischguts kristallwasserhaltige Mineralstoffe, wie kristalline Alkali- bzw. Erdalkalisilikate, zugegeben. Der chemisch gebundene Wasseranteil dieser sog. Zeolithe liegt zwischen 20 M.-% und 30 M.-% und wird bei einer Temperatur von 150 °C nicht schlagartig, sondern in einem Zeitraum von etwa 3 Stunden abgegeben. Durch die Wasserdampffreisetzung des Kristallwassers wird die Viskosität des Bindemittels reduziert. Im Gegensatz zu den viskositätsverändernden organischen Zusätzen werden bei Verwendung mineralischer Zusätze die Eigenschaften des Mischguts nicht verändert, da durch Abgabe des Kristallwassers keine Änderung der Kristallstruktur auftritt. Der mineralische Zusatz, der als Granulat oder als Pulver ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$) eingesetzt wird, kann an der Mischanlage erst bei der Herstellung des Mischguts zugegeben werden.

Nach GÖTZ resultieren die Erfahrungen mit temperaturabgesenktem Asphalt aus Erprobungsstrecken mit einer Liegezeit von bis zu 8 Jahren. Zu diesem Zeitpunkt (2006) konnten die temperaturabgesenkten Asphalte gegenüber herkömmlich hergestellten Asphalten als technisch gleichartig angesehen werden und eine vorzeitige Alterung war nicht zu erwarten. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass eine abschließende Beurteilung erst nach einer Nutzungszeit von ca. 15 Jahren erfolgen kann. Eine Erfahrungssammlung über die Verwendung von Fertigprodukten und Zusätzen zur Temperaturabsenkung von Asphalt ist unter der Website der Bundesanstalt für Straßenwesen (www.bast.de) veröffentlicht. Außerdem können weitere Sachstands- und Schlussberichte verschiedener Studien auf der Website des Gesprächskreises Bitumen (www.gisbau.de/bitumen.html) eingesehen werden.

Verfahrenstechnische Maßnahmen, wie z. B. die Verwendung von Schaumbitumen werden im *M TA*, da keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen, nicht beschrieben.

3.2 International

In den letzten Jahren wurden nicht nur in Deutschland Möglichkeiten zur Temperaturreduzierung untersucht, sondern auch international eine Vielzahl an Verfahren und Zusätzen entwickelt, die es ermöglichen, Niedrigtemperaturasphalt herzustellen. Die Wirkungsweise der in Deutschland verwendeten und im *M TA* beschriebenen Zusätze wurde unter Ziffer 3.1 erklärt. Im Weiteren werden die Grundzüge der Möglichkeiten der Temperaturreduzierung beschrieben, die in Ländern wie Frankreich, Niederlande, Norwegen, USA usw. entwickelt wurden bzw. zur Anwendung kommen. Verfahren, die in Deutschland und anderen Ländern zur Anwendung kommen, wie die Zugabe organischer Zusätze (z. B. Sasobit) oder viskositätsmindernder mineralischer Zusätze (z. B. Aspha-min) werden nicht berücksichtigt.

Es folgt ein Überblick über Möglichkeiten der Temperaturreduzierung gemäß „International Technology Scanning Programm“, das von der amerikanischen Federal Highway Administration (U. S. Department of Transportation) in Zusammenarbeit mit der American Association of State Highway and Transportation Officials und dem National Cooperative Highway Research Programm, gefördert wurde (D'ANGELO).

Low Energy Asphalt (LEA), enrobé á basse energie (EBE) und enrobé á basse temperature (EBT)

All diese Verfahren nutzen eine in der Gesteinskörnung vorhandene „Rest“-Feuchte, die beim Mischen durch Zugabe des heißen Bindemittels explosionsartig verdampft und schließlich zum Aufschäumen des heißen Bindemittels führt. Beim Herstellen des LEA werden beispielsweise zunächst die auf etwa 150 °C erwärmten groben Gesteinskörnungen (Korndurchmesser > 2 mm) mit der für die richtige Mischgutzusammensetzung geforderten gesamten Bindemittelmenge zusammen mit einem Zusatzmittel, das zum einen die Umhüllung der Gesteinskörnung mit dem Bindemittel erleichtert und zum anderen die Hafteigenschaften des Bindemittels verbessert, gemischt. Die Bindemitteltemperatur entspricht hierbei der in der Praxis üblichen Temperatur und die Zugabemenge des Zusatzmittels liegt zwischen 0,2 % und 0,5 % der Gesamtbindemittelmenge. Sind die groben Gesteinskörnungen mit dem Bindemittel umhüllt, werden anschließend die kalten, feinen Gesteinskörnungen (Korndurchmesser ≤ 2 mm) mit einem Feuchtegehalt von etwa 3 % dem Mischprozess zugegeben.

Durch die Zugabe der feuchten, feinen Gesteinskörnungen wird der auf der Oberfläche der groben Gesteinskörnungen vorhandene Bindemittelfilm aufgeschäumt. Die endgültige Mischtemperatur liegt bei diesem Herstellungsprozess bei etwa 100 °C. Sollte der Feuchtegehalt der feinen Gesteinskörnung über 3 % liegen, kann ein Teil der feinen Gesteinskörnungen jederzeit zusammen mit den groben Gesteinskörnungen getrocknet werden.

Low Energy Asphalt Concrete (LEAB)

LEAB ist ein in den Niederlanden eingesetztes, von der niederländischen BAM verwendetes und von Jenkins zur Herstellung von Niedrigtemperaturasphalt entwickeltes Verfahren.

Bei diesem Verfahren werden, im Gegensatz zu den o. g. Verfahren, nicht nur die groben, sondern alle Gesteinskörnungen erwärmt, und zwar auf maximal 95 °C, um den Siedepunkt des Wassers nicht zu überschreiten. Das bei diesem Verfahren zugegebene Asphaltgranulat – die Asphaltgranulatzugaberate liegt bei (in den Niederlanden üblichen) 50 % – wird in einer sogenannten Paralleltrommel (separate Trommel zum Trocknen des Asphaltgranulats) auf 110 °C bis 115 °C erwärmt. Durch diese hohe Zugabemenge an heißem Asphaltgranulat wird das in den Gesteinskörnungen vorhandene Wasser verdampft und somit das im Granulat vorhandene und das neu zugegebene Bindemittel aufgeschäumt. Zusätzlich wird dem Mischgut ein Additiv zugegeben (etwa 0,1 % der Bindemittelmasse), das den Schaum stabilisiert, die Umhüllung der neu zugegebenen Gesteinskörnung verbessert und die Haftung des Bindemittels erhöht. Die Mischguttemperatur kann mit diesem Verfahren auf etwa 90 °C reduziert werden.

LT-Asphalt

Der niederländische Bitumenhersteller Nynas verwendet zur Herstellung von Niedrigtemperaturasphalt eine Kombination aus zwei möglichen Verfahren, die Zugabe von Schaumbitumen und die Zugabe eines mineralischen Zusatzes. Bei dem, unter dem Namen LT-Asphalt bekannten, Niedrigtemperaturasphalt wird den im Mischer befindlichen 90 °C warmen Gesteinskörnungen Schaumbitumen zugegeben, das aus einem speziellen „Nynas-Bitumen“ hergestellt wird. Das Bindemittel, das sich nach

Aussagen von Nynas besonders zum Aufschäumen eignet, wird mit speziell angefertigten Düsen, die über dem Mischer angebracht sind, aufgeschäumt. Zusätzlich wird, um die Stabilität des Schaums zu verbessern, ein hygroskopischer Füller zugegeben, der über mehrere Stunden gebundenes Wasser freisetzt und so den „Schaumeffekt“ aufrechterhält.

Warm Asphalt Mixture (WAM)

WAM ist ein von Shell und der norwegischen Firma KOLO-Veidekke entwickelter Niedrigtemperaturasphalt, dessen Mischtemperaturen im Bereich von 100 °C bis 120 °C und Einbautemperaturen im Bereich von 80 °C bis 90° C liegen. Bei diesem überwiegend in Norwegen verwendeten Verfahren werden zwei Bitumensorten mit unterschiedlicher Viskosität eingesetzt. Die niedrigeren Misch- und Einbautemperaturen werden dadurch erreicht, dass die auf 100 °C bis 120 °C erwärmten Gesteinskörnungen zunächst mit einem weichen Bindemittel (50 % der zuzugebenden Bindemittelmenge) gemischt werden. Die Viskosität des weichen Bindemittels ist bei 100 °C so gering ist, dass eine Verarbeitbarkeit und eine Umhüllung der Gesteinskörnungen möglich ist. Anschließend wird das härtere Bindemittel (50 % der zuzugebenden Bindemittelmenge) in Form von Schaumbitumen zugegeben (WAM-Foam). Es wäre auch denkbar das harte Bindemittel als Pulver oder Emulsion zuzugeben. Die Zugabe des harten Bindemittels als Pulver wurde jedoch wegen verfahrenstechnischer Schwierigkeiten bei der großtechnischen Herstellung, die Zugabe als Emulsion aufgrund höherer Kosten verworfen.

Evotherm

Evotherm ist ein in den USA entwickeltes Verfahren bei dem die erwärmten Gesteinskörnungen mit einer Bitumenemulsion gemischt werden. Das auf diese Weise hergestellte Mischgut hat eine Temperatur zwischen 85 °C und 115 °C. Auch bei diesem Prozess wird dem Mischgut ein Additiv zugegeben, das die Umhüllung der Gesteinskörnung verbessert, die Bindemittelhaftung an den Gesteinskörnungen erhöht und zusätzlich die Verarbeitbarkeit verbessert. Das in der Bitumenemulsion vorhandene Wasser wird, sobald es aufgrund des Mischvorgangs mit der heißen Gesteinskörnung erhitzt wird, verdampft. Das explosionsartige Verdampfen bewirkt, wie bei

allen anderen auf dieser Art basierenden Verfahren, eine Reduzierung der Viskosität des Bindemittels.

Double-Barrel Green

Ein Weiteres, in den USA entwickeltes Verfahren, ist das sog. Double-Barrel Green. Bei diesem Verfahren wird ein von der Firma Astec Industries zum Aufschäumen von Bindemitteln entwickeltes System verwendet, das bei den meisten bestehenden Durchlaufmischanlagen nachgerüstet werden kann. Mit einer sog. „Schaumleiste“, die aus 10 einzelnen Düsen besteht, wird das zugegebene Bindemittel aufgeschäumt. Über die vorhandenen Düsen werden ca. 0,5 kg Wasser pro Tonne Mischgut eingedüst. Durch die Wasserzugabe wird das Wasser schlagartig verdampft und das Bindemittel aufgeschäumt. Im geschäumten Zustand ist das Bindemittelvolumen 18-mal größer als das ursprüngliche Volumen. Bei diesem Verfahren beträgt die Mischtemperatur ca. 135 °C und die Einbautemperatur ca. 115 °C.

4 Untersuchungsprogramm

Die Untersuchungsprogramm umfasst drei Teile:

- Teil 1: Bindemitteluntersuchung,
- Teil 2: Asphaltmischgutuntersuchung im Labor und
- Teil 3: Untersuchungen an großtechnisch hergestelltem Schaumbitumenasphalt und Einbau des Asphalts.

Teil 1: Bindemitteluntersuchung

Zunächst wird gemäß Empfehlung des projektbegleitenden Ausschusses ein Schnelltest, in Anlehnung an den Schaumtest der Firma STRABAG, durchgeführt. Mit diesem Schnelltest sollen die Bindemittelsorten nach den Gruppen: „für die Schaumbitumenherstellung gut geeignet“, „geeignet“ und „nicht geeignet“ eingestuft werden. Wie gefordert wird der Schaumtest für alle Bindemittelsorten ohne Additivzugabe durchgeführt. Um eine eindeutige Aussage über die Eignung des o. g. Schnelltests treffen zu können, werden zusätzlich zum geforderten Untersuchungsumfang alle Bindemittelsorten mit Additivzugabe dem Schnelltest unterzogen. Außerdem werden die Untersuchungen nicht nur an den Bindemittelsorten 50/70 und 70/100 aus jeweils zwei unterschiedlichen Raffinerien, sondern an allen Bitumensorten durchgeführt.

Nach dem Schnelltest werden je Bitumensorte und Lieferraffinerie jeweils eine Probe mit Additiv und eine ohne Additiv mit der mobilen Schaumbitumen-Laboranlage WLB 10 von Wirtgen (siehe Bild 1) aufgeschäumt und dabei die zwei charakteristischen Kennwerte der Schaumbitumenherstellung *Expansionsrate* (Ex) und *Halbwertszeit* ($T_{1/2}$) ermittelt. Die beiden Kennwerte sind von Prozessparametern, wie Luftdruck, Wasserdruck, zugegebene Wassermenge und Bitumentemperatur, abhängig. Um nicht alle theoretischen möglichen Variationen untersuchen zu müssen, werden in diesem Forschungsvorhaben die Variationen durch Vorversuche eingeschränkt und nur die für die Praxis sinnvollen Variationen genauer untersucht. Hierzu werden die Prozessparameter Luftdruck, Wasserdruck und zugegebene Wassermenge variiert.



**Bild 1: Mobile Schaumbitumen-Laboranlage
WLB 10 von Wirtgen (aus WIRTGEN 2001-a)**

Die für die Praxis sinnvollen Variationen mit den dazugehörigen Größen der Prozessparameter und die je Bitumensorte und Lieferrefinerie zu untersuchenden Kombinationen können der Tabelle 2 entnommen werden.

Die Bitumentemperatur wird nicht variiert, da Vorversuche gezeigt haben, dass bei Bitumentemperaturen unter 170 °C die Expansionsrate und die Halbwertszeit weiter abnehmen und die Bitumentemperatur zur Schaumbitumenherstellung über 170 °C liegen sollte. Bindemitteltemperaturen über 175 °C werden nicht untersucht, da die für die zu untersuchenden Bitumensorten maximal zulässigen Bitumentemperatur von 180 °C nicht überschritten und bei der großtechnischen Herstellung das Bitumen nicht unnötig über die in der Praxis übliche Lagertemperatur von 170 °C bis 175 °C hinaus erhitzt werden soll.

Die Zugabemenge des Additivs beträgt 0,1 % der Bindemittelmenge und wird nicht variiert, da in diesem Forschungsvorhaben *nur* die Auswirkung des Additivs auf Expansionsrate und Halbwertszeit zu ermitteln sind. Eine Optimierung der Zugabemenge des Additivs ist nicht gefordert.

Tabelle 2: Variation der Prozessparameter zur Schaumbitumenherstellung

Druck [bar]		Wassermenge			
Luft	Wasser	2%		4%	
		mit Additiv	ohne Additiv	mit Additiv	ohne Additiv
3	4	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}
5	6	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}
7	8	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}	Ex, T _{1/2}

Erläuterungen:

Ex Expansionsrate [-]
 T_{1/2} Halbwertszeit [s]

Für jede in der Tabelle 2 wiedergegebene Kombination werden 3 Versuche – ein Versuch entspricht einem Aufschäumprozess – durchgeführt und je Aufschäumprozess die Halbwertszeit und die Expansionsrate ermittelt. An den mit diesen festgelegten Prozessparametern aufgeschäumten Bitumenproben werden anschließend die Standardkennwerte Nadelpenetration (NP) und Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) sowie mit einem Dynamischen Scherrehometer (DSR) die dynamische Viskosität (η) ermittelt und als Vergleichsgrößen herangezogen. Alle Versuche werden als Doppelbestimmung durchgeführt.

Der Untersuchungsteil *Bindemitteluntersuchung* dient dem Nachweis, dass infolge des Aufschäumprozesses keine signifikanten bleibenden Veränderungen, die die Gebrauchseigenschaften des damit hergestellten Asphaltens einschränken könnten, auftreten.

Als Variationsmerkmale werden neben der Bitumensorte die Rohölprovenienz (Lieferraffinerie) und die Additivzugabe („mit/ohne“) eingeführt, da davon auszugehen ist, dass diese Merkmale die grundsätzliche Eignung für die Aufschäumung signifikant beeinflussen. Für die Untersuchung stehen die Bitumensorten 50/70 und 70/100 der vom projektbegleitenden Ausschuss festgelegten Lieferraffinerien – Gelsenkirchen, Ingolstadt, Karlsruhe und Schwedt – zur Verfügung.

Um mögliche Unterschiede zwischen dem mit/ohne Additiv aufgeschäumten und dem nicht aufgeschäumten Bitumen aufzuzeigen, werden je Lieferraffinerie und Bitumensorte die o. g. Kennwerte des nicht aufgeschäumten und des mit/ohne Additiv

aufgeschäumten Bitumens ermittelt. Die Untersuchungen am mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumen erfolgen erstmals 2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt. Um evtl. zeitliche Veränderungen der Kennwerte des mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens festzustellen, werden zu späteren Zeitpunkten weitere Untersuchungen durchgeführt. Je Kombination werden deshalb weitere Proben des mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens im Wärmeschrank bei 100 °C gelagert und 24 Stunden sowie 7 Tage nach dem Aufschäumzeitpunkt die Kennwerte Nadelpenetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel und die dynamische Viskosität ermittelt. Außerdem wird je Bitumensorte eine nicht aufgeschäumte Probe unter gleichen Bedingungen gelagert und ebenfalls nach 24 Stunden und 7 Tagen untersucht. Anschließend werden, um zeitliche Veränderungen des Bitumens zu erfassen, je Probe die Differenzen „Untersuchungsergebnis des nicht aufgeschäumten Bitumens minus Untersuchungsergebnis des mit bzw. ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens“ der 2 Stunden, 24 Stunden und 7 Tage nach dem Aufschäumzeitpunkt ermittelten Prüfergebnisse der Nadelpenetration, des Erweichungspunkts Ring und Kugel und der dynamischen Viskosität berechnet.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden die Bitumensorten 50/70 und 70/100 nicht, wie im Forschungsantrag festgelegt, nur von zwei Lieferraffinerien, sondern nach Vorschlag des projektbegleitenden Ausschusses von allen o. g. Lieferraffinerien untersucht. Somit ergibt sich das in Tabelle 3 wiedergegebene Untersuchungsprogramm.

Die Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse (je Bindemittelsorte und Lieferraffinerie), des nicht aufgeschäumten und des ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens dient der Eingrenzung der Variationszahl für die anschließenden Versuchsprogramme (Untersuchungsteil 2 und 3), das heißt, unter den o. g. Bitumensorten wird diejenige ausgewählt, die bei Wertung aller Versuchsergebnisse der Bitumenuntersuchung die beste Übereinstimmung mit dem Vergleichsfall „nicht aufgeschäumtes Bitumen“ aufweist.

Tabelle 3: Untersuchungsprogramm der Bindemitteluntersuchung

	Dauer zwischen Aufschäum- und Untersuchungszeitpunkt	Lieferraffinerie							
		1		2		3		4	
		50/70	70/100	50/70	70/100	50/70	70/100	50/70	70/100
Nicht aufgeschäumt	+ 2 h	X	X	X	X	X	X	X	X
	+ 24 h	X	X	X	X	X	X	X	X
	+ 7 d	X	X	X	X	X	X	X	X
Mit Additiv aufgeschäumt	+ 2 h	X	X	X	X	X	X	X	X
	+ 24 h	X	X	X	X	X	X	X	X
	+ 7 d	X	X	X	X	X	X	X	X
Ohne Additiv aufgeschäumt	+ 2 h	X	X	X	X	X	X	X	X
	+ 24 h	X	X	X	X	X	X	X	X
	+ 7 Tage	X	X	X	X	X	X	X	X

Erläuterungen:

- X Ermittlung von EP RuK, NP und η (dynamischen Viskosität)
- d Tag
- h Stunde

Teil 2: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor

In diesem Untersuchungsteil sollen labortechnisch nicht nur die minimal mögliche Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts ermittelt, sondern auch dessen Gebrauchseigenschaften überprüft werden. Hierzu wird in einer ersten Versuchsreihe (Schritt 1) die maximal mögliche Temperaturreduzierung ermittelt und in einer weiteren Versuchsreihe (Schritt 2) die Gebrauchseigenschaften des mit den unter Schritt 1 ermittelten Misch- und Verdichtungstemperaturen hergestellten Schaumbitumenasphalts überprüft.

Schritt 1: Ermittlung der Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts

Mit der Versuchsreihe Schritt 1 werden die optimalen Herstellungsbedingungen für Schaumbitumenasphalt ermittelt, die einerseits möglichst geringe Abweichungen zum Vergleichsfall „mit nicht aufgeschäumtem Bitumen“, andererseits eine möglichst große Absenkung der Misch- und Verdichtungstemperatur ergeben. Die Variationsmerkmale dieser Versuchsreihe sind somit die Misch- und die Verdichtungstemperatur (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Versuchsprogramm zur Ermittlung der minimal möglichen Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts

Schritt 1			
Referenzasphalt gem. ZTV Asphalt-StB 01		Straßenbaubitumen 50/70	Prüfgröße: - Verdichtbarkeit mit dem Gyrator-Verdichter
		Straßenbaubitumen 70/100	
Fälle mit Schaumbitumen	Mischtemperatur 1	Verdichtungstemperatur 1	- Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper
		Verdichtungstemperatur 2	
		Verdichtungstemperatur 3	
	Mischtemperatur 2	Verdichtungstemperatur 4	- Hohlraumgehalt an Probeplatten
		Verdichtungstemperatur 5	
		Verdichtungstemperatur 6	

Die reduzierte Mischtemperatur hat zwangsläufig eine niedrigere Verdichtungstemperatur zur Folge. Da jedoch nicht für jede zu untersuchende Verdichtungstemperatur die Mischguttemperatur variiert werden kann, werden je Mischtemperatur drei Verdichtungstemperaturen unterschieden. Die Temperaturspanne zwischen Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts soll etwa der in den ZTV Asphalt-StB 01 maximal möglichen Temperaturspanne von 50 °C entsprechen (die maximal zulässige Mischtemperatur beträgt 180 °C und die minimal zulässige Verdichtungstemperatur beträgt 130 °C).

Mit den Prüfgrößen des Schritts 1, wie Verdichtbarkeit mit dem Gyrator-Verdichter, Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper und Hohlraumgehalt an Probeplatten soll unter Laborbedingungen die minimal mögliche Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts ermittelt werden, bei der die Ergebnisse je Prüfgröße denen des Referenzasphalts entsprechen oder nur geringfügig davon abweichen. Um die je Prüfgröße ermittelten Ergebnisse des Schaumbitumenasphalts besser beurteilen zu können, werden sie den Ergebnissen des mit Straßenbaubitumen 70/100 und zusätzlich des mit Straßenbaubitumen 50/70 hergestellten Referenzasphalts gegenübergestellt.

Untersuchungsmaterial ist Asphaltbeton (Heißmischgut), der mit dem in Untersuchungsteil 1 – Bindemitteluntersuchung – ermittelten optimalen Bindemittel im Labor hergestellt wird.

Die labortechnische Herstellung des Schaumbitumenasphalts erfolgt, mit Ausnahme der Mischtemperaturen, gemäß *DIN 1996, Teil 20*; da aufgrund des Forschungsansatzes die Mischtemperaturen zu variieren sind, werden die in Tabelle 1 der *DIN 1996, Teil 20* festgelegten Temperaturen nicht eingehalten.

Die in den Normen und Prüfvorschriften angegebenen Verdichtungstemperaturen für die Probekörperherstellung (*DIN 1996, Teil 4, DIN EN 12697-31, ALP A-StB Teil 11*) werden abgeändert und entsprechend den Vorgaben der Versuchsreihe festgelegt. Bei der Probekörperherstellung aus Schaumbitumenasphalt ist außerdem zu berücksichtigen, dass das Mischgut von der Mischtemperatur monoton fallend bis zur versuchsbedingt vorgegebenen Verdichtungstemperatur heruntergekühlt werden muss. Auf keinen Fall darf eine Wiedererwärmung des Mischgutes erfolgen, da damit der für Schaumbitumen typische Wassergehalt verändert und somit die Versuchsergebnisse verfälscht würden.

Schritt 2: Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts

Um eine sichere Prognose über die Gebrauchseigenschaften des Schaumbitumenasphalts, der bei den unter Schritt 1 ermittelten minimal möglichen Misch- und Verdichtungstemperaturen hergestellt wird, machen zu können, werden unter Schritt 2 alle standardmäßigen und unter den gegebenen Untersuchungsbedingungen praktikablen Prüfverfahren für Walzasphalt-Heißmischgut durchgeführt: Marshall-Prüfung, einaxialer Druckschwellversuch, Spurbildungsversuch, indirekte Zugprüfung und Prüfung der Wasserempfindlichkeit (siehe Tabelle 5).

Da erste Erfahrungen mit Schaumbitumenasphalt zeigten, dass die Probekörperlagerzeit („Prüfalter“) die Versuchsergebnisse beeinflusst (STOPPKA), werden auch Hinweise auf das Abklingverhalten des Aufschäumeffekts erwartet. Zu diesem Zweck werden die Probekörper nach ihrer Herstellung unterschiedlich lang bis zur Versuchsdurchführung gelagert und die Probekörperlagerzeit als zusätzliches Variationsmerkmal hinzugenommen. Die Probekörperlagerzeit 1 (PZ 1) entspricht – sofern in den Normen und Prüfvorschriften für die einzelnen Versuche angegeben – dem gemäß Norm/Prüfvorschrift festgelegten „Prüfalter“. Die Probekörperlagerzeit 2 (PZ 2) wird mit 7 Tagen (d) und die Probekörperlagerzeit 3 (PZ 3) mit 21 Tagen entsprechend höher angesetzt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Versuchsprogramm zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts

Schritt 2		
Referenzasphalt gem. ZTV Asphalt-StB 01	PZ 1 (Gem. Norm, Prüfvorschrift)	<i>Prüfverfahren:</i> - Marshall-Prüfung - Spurbildungsversuch - Indirekte Zugprüfung - Einaxialer Druckschwellversuch
	PZ 2 (7 d)	
	PZ 3 (21 d)	
Schaumbitumenasphalt (Misch- und Verdichtungstemperatur gem. Schritt 1)	PZ 1 (Gem. Norm, Prüfvorschrift)	- Prüfung der Wasserempfindlichkeit
	PZ 2 (7 d)	
	PZ 3 (21 d)	
Erläuterungen: PZ Probekörperlagerzeit (Zeitspanne zwischen Probekörperherstellung und Versuchsbeginn) d Tag		

Für die Versuchsreihe Schritt 2 gilt insgesamt: Erreichen die Versuchsergebnisse der Fälle „mit aufgeschäumten Bitumen“ schon bei Probekörperlagerzeit 1 mit guter Näherung die Werte des Referenzfalls „mit nicht aufgeschäumtem Bitumen“, so können die Versuche mit den Probekörperlagerzeiten 2 und 3 unterbleiben.

Die in diesem Untersuchungsteil (Teil 2) gewonnenen Versuchsergebnisse liefern auch Anhaltspunkte für die zulässigen Grenzen der Misch- und Verdichtungstemperaturen, die für Schaumbitumenasphalt im Sinne der Tabellen 1.6 bzw. 3.1 ZTV Asphalt-StB 01 künftig festzulegen wären sowie Aussagen über den frühest möglichen Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe nach dem Einbau des Schaumbitumenasphalts.

Teil 3: Untersuchungen an großtechnisch hergestelltem Schaumbitumenasphalt und Einbau des Asphalts

Der Untersuchungsteil 3 dient zum einen der Beantwortung der Frage, ob die im Teil 2 ermittelten Befunde auch bei großtechnischer Herstellung des Schaumbitumenasphalts in einer Asphaltmischanlage gültig sind bzw. welche Einschränkungen in diesem Fall gemacht werden müssen, zum anderen der Überprüfung, ob

Schaumbitumenasphalt großtechnisch eingebaut werden kann und ob die Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts in der Praxis gegeben ist. Untersucht wird der in einer Chargenmischanlage hergestellte Schaumbitumenasphalt. Die grundsätzlichen Randbedingungen (Bitumensorte/Rohölprovenienz, Mischgutzusammensetzung, Gesteinskörnungen nach Gesteinsart und Korngrößenverteilung, Mischtemperatur usw.) werden von Untersuchungsteil 2 übernommen.

Die großtechnische Herstellung des Schaumbitumenasphalts unterscheidet sich von der labortechnischen dadurch, dass das Asphaltmischgut, abgesehen von der sog. Direktverladung, vor der weiteren Verarbeitung in wärmegeprägten Mischgutsilos gelagert wird. Da hieraus ein Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts resultieren kann, werden dem im Mischgutsilo gelagerten Schaumbitumenasphalt nach der Herstellung (SZ 1) sowie nach einer Silolagerzeit von 3 (SZ 2) und 6 Stunden (SZ 3) Mischgutproben entnommen und daraus die für die weitere Untersuchung notwendigen Marshall-Probekörper und Probenplatten hergestellt. Die Probekörper werden nach einer noch festzulegenden Probekörperlagerzeit – die Probekörperlagerzeit kann erst festgelegt werden, wenn die Ergebnisse des Untersuchungsteils 2 vorliegen – untersucht. Um einen möglichen Einfluss der Silolagerzeit nachzuweisen, wird an den je Silolagerzeit hergestellten Probekörpern der Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper ermittelt und die Marshall-Prüfung und der Spurbildungsversuch durchgeführt. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Versuchsprogramm zur Ermittlung des Einflusses der Silolagerzeit auf die Verarbeitbarkeit und die Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts

Großtechnisch hergestellter Schaumbitumenasphalt	
SZ 1 (Nach Herstellung)	<i>Prüfgrößen/-verfahren:</i> - Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper - Marshall-Prüfung - Spurbildungsversuch
SZ 2 (3 h)	
SZ 3 (6 h)	

Erläuterungen:

SZ Silolagerzeit (Lagerzeit des Mischguts im Silo)
 h Stunde

Des Weiteren wird im Untersuchungsteil 3, um die im Labor ermittelte Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts in einem praktischen Großversuch zu überprüfen, eine Deckschicht mit Schaumbitumenasphalt hergestellt.

Hierzu wurde auf einer von der Bayerischen Staatsbauverwaltung zur Verfügung gestellten Teststrecke, die im Landkreis Starnberg und somit im Zuständigkeitsbereich des Staatlichen Bauamts Weilheim liegt, Schaumbitumenasphalt eingebaut (siehe Bild 2). Auf dieser etwa 3 km langen Staatsstraße, die die Ortschaften Erling und Machtlfing verbindet, musste die Decke erneuert werden. Eine Hälfte der Strecke wurde mit konventionellem Walzasphalt Asphaltbeton 0/11 (abgekürzt AB 0/11) gem. *ZTV Asphalt StB 01* (im Weiteren Referenzasphalt) und die andere Hälfte mit Schaumbitumenasphalt saniert. Die gesamte Strecke abzüglich eines etwa 100 m langen Probefelds wurde in vier gleichlange Abschnitte unterteilt. Im Probefeld am Ortsausgang von Erling konnte die Einbaufirma den Umgang mit Schaumbitumenasphalt testen.

Am ersten Tag erfolgten die Vorarbeiten und der Einbau des Schaumbitumenasphalts im Probefeld. Nachdem die Untersuchungen am Probefeld abgeschlossen und die Untersuchungsergebnisse zufriedenstellend waren, erfolgte der Einbau der Abschnitte 1 und 2 und am darauffolgenden Tag der Einbau der Abschnitte 3 und 4. In den mit Schaumbitumen hergestellten Abschnitten 1 und 3 wurden je 2 Probenahmen und in den mit Referenzasphalt hergestellten Abschnitten 2 und 4 wurden je eine Probenahme durchgeführt. Die vor dem Einbau festgelegten Probenahmeorte können dem Bild 2 entnommen werden.

Je Probenahme wurden nicht nur Mischgutproben für die labortechnischen Überprüfungen, wie Marshall-Prüfung und Spurbildungsversuch, entnommen, sondern zusätzlich an der fertigen und abgekühlten Deckschicht je Probenahmeort zwei kleine Bohrkerne (\varnothing 150 mm) und an den Probenahmeorten P1 bis P6 zusätzlich zwei große Bohrkerne (\varnothing 300 mm) entnommen. Um mögliche Unterschiede in der Verdichtbarkeit des Referenzasphalts und des Schaumbitumenasphalts festzustellen, wurden

an jedem Bohrkern die Schichtdicke und der Verdichtungsgrad ermittelt und die Werte gegenübergestellt.

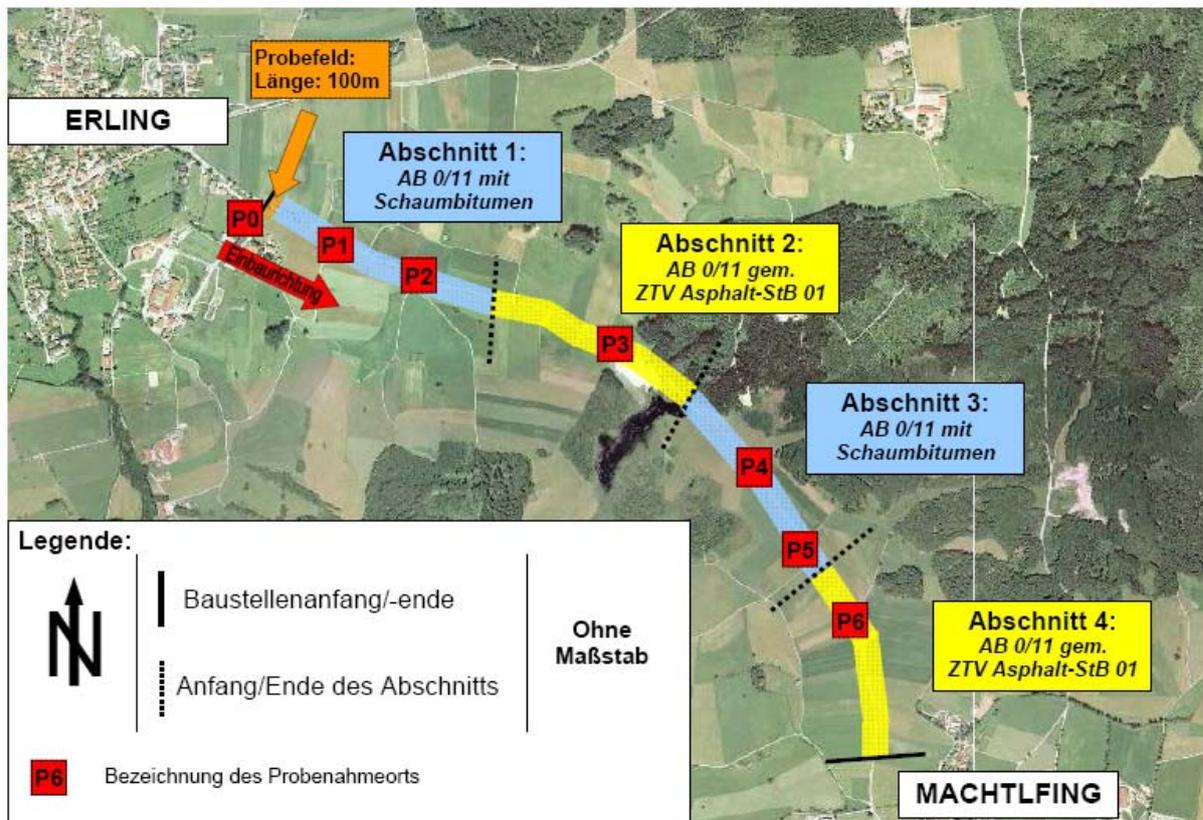


Bild 2: Teststrecke

Außerdem wurde, um einen Aussage über das Gebrauchsverhaltens des großtechnisch hergestellten Schaumbitumenasphalts treffen zu können, an den großen Bohrkernen ein Spurbildungsversuch durchgeführt.

Zusätzlich wurden vom Mischguthersteller die Chargenprotokolle, die während der Herstellung des Schaumbitumenasphalts und des Referenzasphalts aufgezeichnet wurden, für die Gegenüberstellung der Mischtemperaturen des Schaumbitumen- und des Referenzasphalts zur Verfügung gestellt.

Des Weiteren wurden je Lkw die Mischguttemperaturen beim Verlassen der Mischanlage, beim Entladen in den Straßenfertiger sowie die Verdichtungstemperatur nach der Verdichterbohle und vor dem ersten Walzübergang gemessen und in einem selbst erstellten Formblatt (siehe Anhang 1) dokumentiert, sodass nach Abschluss

der Baumaßnahme die Verdichtungstemperaturen für jeden Abschnitt ermittelt und gegenübergestellt werden konnten.

Damit bereits während des Einbaus von Schaumbitumenasphalt der Verdichtungsgrad der eingebauten Deckschicht überprüft werden konnte, wurde in regelmäßigen Abständen die mit einer „Isotopsonde“ gemessene Raumdichte der verdichteten Deckschicht der „Soll-Raumdichte“ gegenübergestellt. Da mit diesem „zerstörungsfreien“ Verfahren die Raumdichte der noch warmen bzw. heißen Deckschicht ermittelt werden kann, besteht die Möglichkeit – sofern die „Soll-Raumdichte“ noch nicht erreicht ist –, mit weiteren Walzübergängen den geforderten Verdichtungsgrad zu erreichen.

Außerdem wurden im Juni 2008 über die gesamte Streckenlänge nach dem Seitenkraftmessverfahren (abgekürzt SKM) Griffigkeitsmessungen durchgeführt. Diese Ergebnisse dienen dazu, mögliche Veränderungen der Griffigkeit der mit Schaumbitumenasphalt hergestellten Fahrbahnoberfläche nachzuweisen.

5 Schaumbitumen- und Probekörperherstellung

5.1 Schaumbitumenherstellung

Im Merkblatt für Kaltrecycling *in situ* (M KRC) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) ist im Anhang 4 die Herstellung von Schaumbitumen beschrieben. Nach dem M KRC erfolgt die Herstellung des Schaumbitumens in einer Expansionskammer. In dieser wird von oben über eine Düse heißes Straßenbaubitumen gem. DIN EN 12591, z. B. die Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 oder 70/100, mit ca. 175 °C zugegeben und gleichzeitig von der Seite kaltes Wasser und Luft mit Druck eingedüst (Bild 3). Der zugegebene Wasseranteil liegt bezogen auf die Bindemittelmenge in der Praxis zwischen 2 % und 4 % und der Wasserdruck beträgt mindestens 3 bar. Der Luftdruck ist grundsätzlich 1 bar geringer als der Wasserdruck. Das Wasser wird durch die Bitumentemperatur von 170 °C bis 180 °C schlagartig erhitzt und zum Verdampfen gebracht, was eine Aufschäumung des Bitumens, das heißt, eine Volumenvergrößerung um das 10- bis 20-fache des Ausgangsvolumens des ungeschäumten Bitumens, zur Folge hat. Die Temperatur des auf diese Weise hergestellten Schaumbitumens liegt zwischen 80 °C und 100 °C. Die Eigenschaften des Schaumbitumens können mit zwei von Wasserdruck, Luftdruck, Bindemitteltemperatur und Bindemittelsorte abhängigen Kenngrößen, der Expansionsrate und der Halbwertszeit, beschrieben werden.

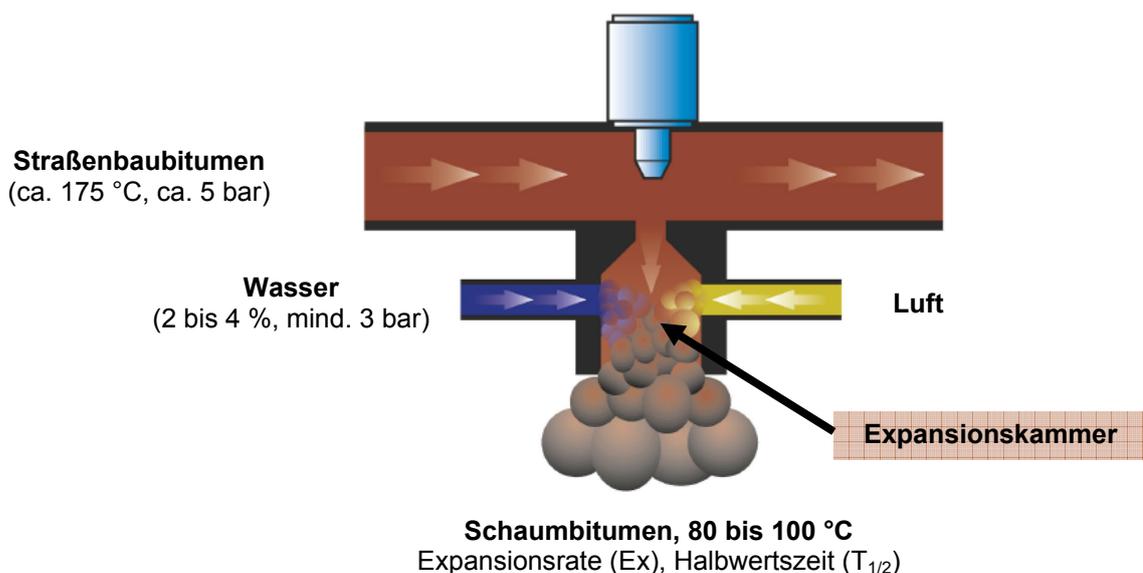


Bild 3: Schaumbitumenherstellung (nach WIRTGEN 2001-b)

Als Expansionsrate bezeichnet man das Verhältnis zwischen maximal erreichtem Volumen im aufgeschäumten Zustand und dem Volumen des ungeschäumten Bitumens. Die Halbwertszeit ist die Zeit in Sekunden (s), in der der Schaum die Hälfte des ursprünglichen maximalen Volumens verliert.

Da die beiden o. g. Kennwerte nicht nur von den Parametern, wie Luftdruck, Wasserdruck, Bindemitteltemperatur, zugegebener Wassermenge, sondern zusätzlich von dem verwendeten Straßenbaubitumen beeinflusst werden, sind demzufolge – um eine größtmögliche Expansion und eine größtmögliche Halbwertszeit zu erhalten – für jedes Straßenbaubitumen die Parameter eigens abzustimmen und deren Einstellungen zu optimieren (optimale Prozessbedingungen).

Ein Straßenbaubitumen ist gemäß *M KRC* für die Schaumbitumenherstellung geeignet, wenn es unter optimalen Prozessbedingungen (s. o.) eine mindestens 10-fache Expansion und eine Halbwertszeit von mindestens 10 Sekunden aufweist.

In Bild 4 ist die Volumenänderung des Schaumbitumens in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dargestellt. Auf der Abszissenachse ist die Zeit in Sekunden (s) und auf der Ordinate die Expansion (Ex) angetragen.

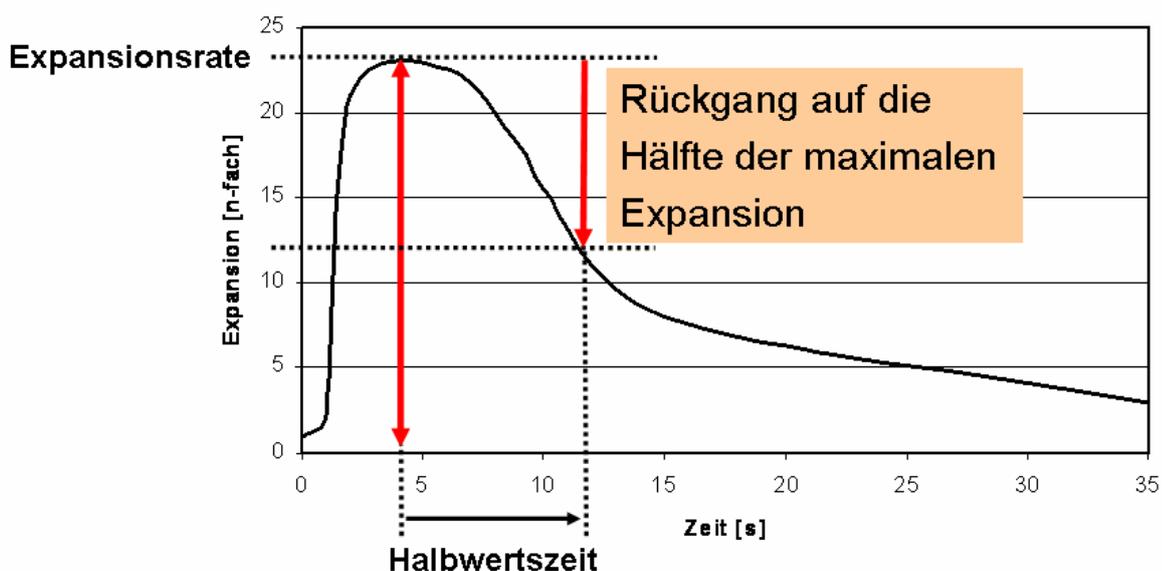


Bild 4: Expansionsrate (Ex) und Halbwertszeit ($T_{1/2}$)

5.2 Probekörperherstellung und Gewinnung der Ausbaustücke

5.2.1 Mischgutzusammensetzung

Die Mischgutzusammensetzung des in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Asphaltbetons AB 0/11 gemäß *ZTV Asphalt-StB 01* (Referenzasphalt) und die ermittelten Kenngrößen können der von den Bayerischen Asphalt-Mischwerken erstellten Eignungsprüfung entnommen werden (siehe Anhang 2). Die wichtigsten Kennwerte der Mischgutzusammensetzung des Referenzasphalts und des Schaumbitumenasphalts sind in Tabelle 7 wiedergegeben. Die Zusammensetzung des Schaumbitumenasphalts entspricht der Zusammensetzung des Referenzasphalts. Der einzige Unterschied zwischen Schaumbitumenasphalt und Referenzasphalt ist die Aufbereitung des Straßenbaubitumens zum Zeitpunkt der Zugabe in den Mischer. Beim Referenzasphalt wird das ca. 175 °C heiße Straßenbaubitumen ohne weitere Aufbereitung - in der vorgegebenen Menge - dem Mischprozess zugegeben. Im Gegensatz dazu wird beim Herstellen des Schaumbitumenasphalts das Straßenbaubitumen zum Zeitpunkt der Zugabe in den Mischer (wie unter Ziffer 5.1 beschrieben) aufgeschäumt.

Tabelle 7: Mischgutzusammensetzung – AB 0/11 für Bauklasse IV

Bezeichnung der Mischgutsorte	AB 0/11 gem. ZTV-Asphalt-StB01 (Referenzasphalt)	Schaumbitumenasphalt
Korngrößenverteilung	Gemäß Eignungsprüfung (siehe Anhang 2)	
Zugabe von Asphaltgranulat	Nein	Nein
Straßenbaubitumen	70/100	Geschäumtes Straßenbaubitumen
Bindemittelgehalt	6,2 M.-%	6,2 M.-%

5.2.2 Marshall-Probekörper

Die Herstellung der Marshall-Probekörper erfolgt mit Ausnahme der Verdichtungs-temperatur des Schaumbitumenasphalts nach *DIN 1996, Teil 4*. In diesem Forschungsvorhaben werden je Prüfung 3 Marshall-Probekörper hergestellt und geprüft. Zur Herstellung eines Marshall-Probekörpers werden etwa 1200 g Mischgut benötigt. Hierbei handelt es sich um Mischgut, das entweder im Labor hergestellt wird oder in

einer Mischanlage großtechnisch produziert und nach *DIN 1996, Teil 3* für die Prüfung im Labor vorbereitet wird.

Die für die Herstellung eines Marshall-Probekörpers erforderliche Mischgutmenge wird in einem Wärmeschrank (mit einer Innentemperatur von 130 °C) ohne Frischluftzufuhr maximal 4 Stunden vortemperiert und vor dem Einbringen in die Verdichtungsform (siehe Bild 5) unter schnellem Erwärmen bei ständigem Umrühren auf die geforderte Verdichtungstemperatur von 135 (± 5) °C erhitzt. Nach dem Einbringen in die Verdichtungsform wird jede Seite mit dem Marshall-Verdichtungsgerät innerhalb von 55 bis 60 Sekunden mit 50 Schlägen (bei der Prüfung der Wasserempfindlichkeit mit 25 Schlägen) verdichtet. Vor dem Auspressen der Marshall-Probekörper aus der Verdichtungsform soll der Marshall-Probekörper an Luft auf 40 °C abgekühlt sein.

Die Herstellung der Marshall-Probekörper aus Schaumbitumenasphalt unterscheidet sich gegenüber dem oben beschriebenen Verfahren (Herstellung der Marshall-Probekörper aus Referenzasphalt) nur darin, dass die Verdichtungstemperatur entsprechend geringer ist (siehe Ziffer 7.2.1) und das Mischgut schon mit dem Vortemperieren auf die gewählte Verdichtungstemperatur gebracht wird; ein Erwärmen des Schaumbitumenasphalts bei ständigem Umrühren, das evtl. die Wirkung des Schaumbitumens reduziert, ist somit nicht notwendig.

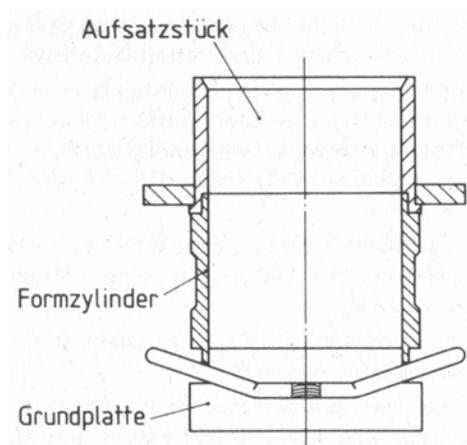
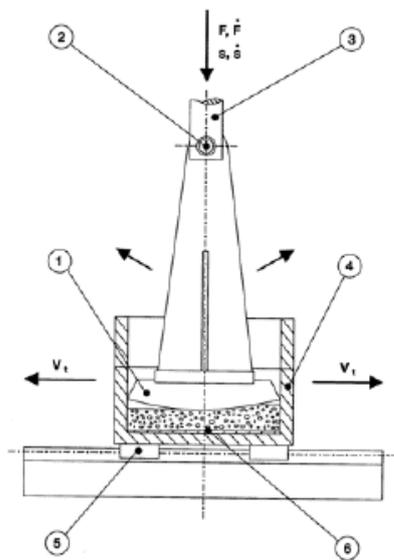


Bild 5: Verdichtungsform zur Herstellung eines Marshall-Probekörpers (aus *DIN 1996, Teil 4*)

Die Marshall-Probekörper aus Referenzasphalt und Schaumbitumenasphalt werden nach dem Ausformen und vor den durchzuführenden Prüfungen auf einer ebenen Unterlage bis auf Raumtemperatur (18 bis 28 °C) abgekühlt.

5.2.3 Probepplatten

Die für die einzelnen Untersuchungsschritte benötigten Probepplatten werden gemäß *Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil 11: Herstellung von Asphaltprobepplatten im Labor mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV)* (ALP A-StB, Teil 11) hergestellt. Das Prinzip eines Walzsektor-Verdichtungsgeräts ist in Bild 6 dargestellt.



Legende:

- 1 Beheizbare und bewegliche Stahlbandage
 - 2 Drehmittelpunkt der Stahlbandage
 - 3 Weg- und kraftregelbare Belastungseinrichtung
 - 4 Beheizbare Verdichtungsform
 - 5 Horizontal beweglicher Schlitten
 - 6 Einlegblech mit darüberliegendem Mischgut
- v_t Mittlere horizontale Schlittengeschwindigkeit
 F, \dot{F} Last, lastregelte Verdichtung
 s, \dot{s} Weg, weggeregelte Verdichtung

Bild 6: Prinzipskizze – Walzsektor-Verdichtungsgerät (nach ALP A-StB, Teil 11)

Zunächst wird das zu verdichtende Asphaltmischgut, das entweder im Labor hergestellt oder als Mischgutprobe an der Mischanlage entnommen wird, in eine 32 cm lange, 26 cm breite und 24 cm hohe Verdichtungsform gegeben und gleichmäßig verteilt. Die anschließende Verdichtung erfolgt in mehreren Schritten. Nachdem die auf ca. 80 °C vorgeheizte Stahlbandage auf die vorgegebene Anfangshöhe abgelassen wurde, beginnt die weggeregelte 3-stufige Vorverdichtung (Vorbelasten, Halten, Entlasten) mit der ein Verdichtungsgrad von ca. 90 % erreicht wird. Es folgt die kraftgeregelte 3-stufige Hauptverdichtung, mit den Verdichtungsstufen Glätten, Verdichten, Entlasten. Die Anzahl der lastgeregelten Walzübergänge der Hauptverdichtung

ist variabel und vor dem Beginn der Verdichtung so festzulegen, dass der Verdichtungsgrad der Probeplatten am Ende 100 (± 1) % beträgt. Die Anzahl der Walzübergänge je Verdichtungsstufe liegt üblicherweise bei 15 Übergängen.

Die Verdichtungstemperatur für Mischgut mit Straßenbaubitumen beträgt 135 (± 5) °C.

Die Herstellung der Probeplatten aus Schaumbitumenasphalt unterscheidet sich nur darin, dass die Verdichtungstemperatur entsprechend geringer ist (siehe Ziffer 7.2.1).

5.2.4 Ausbaustücke

Bei Ausbaustücken handelt es sich um ein aus einer Fahrbahnbefestigung durch Bohren, Schneiden oder Hacken entnommenes Prüfstück. In diesem Forschungsvorhaben werden die Ausbaustücke als Bohrkern mit unterschiedlichen Durchmessern (150 mm, 200 mm und 300 mm), mit einem dafür geeigneten Bohrgerät der fertigen Fahrbahn entnommen. Um die vorgesehenen Prüfungen an der eingebauten Schicht, z. B. Verdichtungsgrad, Hohlraumgehalt usw., durchführen zu können, muss der Bohrkern, der aus mehreren einzelnen Schichten besteht, durch Sägen in die einzelnen Schichten zerlegt werden.

6 Untersuchungsverfahren

6.1 Bindemitteluntersuchungen

6.1.1 Schnelltest

Der Schaumtest der Firma STRABAG dient dazu, eine mögliche Schaumbildung des Bitumens, die beispielsweise beim Einsatz von kristallwasserhaltigen Gesteinskörnungen entstehen kann, frühzeitig – vor der ersten Verwendung des Bitumens – bewerten zu können. In diesem Forschungsvorhaben soll nun geklärt werden, ob mit dem Schaumtest die Eignung des Bitumens zur Schaumbitumenherstellung überprüft werden kann, und ob das Verfahren somit als Schnelltest geeignet wäre.

Hierzu werden in einem Becherglas (Durchmesser 100 mm, Höhe 120mm) 100 g Bitumen auf 90 °C erhitzt und es wird die Höhendifferenz zwischen Oberkante des Bindemittelfilms und des Becherglasrandes bestimmt („Höhe 1“). Anschließend werden 5 ml Wasser zugegeben und mit dem Bindemittel so lange gemischt, bis eine homogene Mischung entsteht. Diese homogene Mischung wird nun unter ständigem, langsamem Rühren (etwa 1 Umdrehung/min) innerhalb von 5 Minuten auf 120 °C erhitzt und durch das verdampfende Wasser aufgeschäumt. Ist das maximale Schaumvolumen erreicht, wird die Höhendifferenz zwischen der Oberfläche des Bitumenschaums und des Becherglasrandes bestimmt („Höhe 2“) und anschließend die maximal erreichte Schaumhöhe als Differenz der beiden Höhen („Höhe 1“ minus „Höhe 2“) berechnet. Als Ergebnis wird die mittlere Schaumhöhe aus drei Einzelmessungen, auf 0,1 cm gerundet, angegeben.

6.1.2 Nadelpenetration

Die Konsistenz des Bitumens oder bitumenhaltiger Bindemittel wird als Nadelpenetration (NP) oder Eindringtiefe bezeichnet und gilt als Maß für die Bitumenhärte. Nach *DIN EN 1426* ist die Nadelpenetration als Wegstrecke, die eine genormte Nadel unter festgelegten Bedingungen (Prüftemperatur 25 °C, Belastung 1 N, Belastungsdauer 5 s) in der zu prüfenden Bitumenprobe zurücklegt, definiert (siehe Bild 7). Zur Bestimmung der Nadelpenetration sind je Bitumenprobe mindestens 3 Messungen erforderlich. Der Zahlenwert der Nadelpenetration als Mittelwert der 3 Einzelergebnisse ist in Zehntelmillimeter (0,1 mm) anzugeben. Die Einzelergebnisse dürfen bei einem

Mittelwert der Nadelpenetration (0,1 mm) von 50 bis 99 maximal 4 Einheiten (0,1 mm) voneinander abweichen. Die Sortenbezeichnung des Straßenbaubitumens erfolgt unter Angabe der zulässigen Spannweite der Nadelpenetration. Beispielsweise wird ein Straßenbaubitumen mit einer Nadelpenetration zwischen 70 und 100 mit „70/100“ bezeichnet.

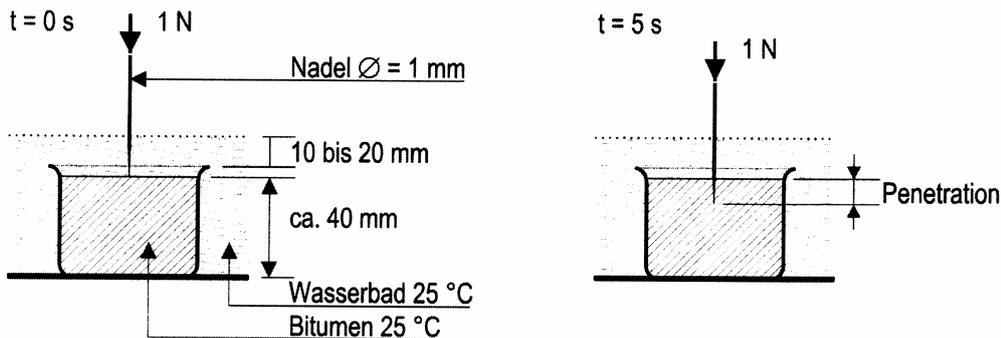


Bild 7: Prinzipskizze – Nadelpenetration NP (aus BECKEDAHL)

6.1.3 Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK)

Das Wärmeverhalten von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln wird mit der Bestimmung des Erweichungspunkts Ring und Kugel nach *DIN EN 1427* untersucht. Der Zahlwert des Erweichungspunkts Ring und Kugel entspricht der Temperatur in °C, bei der eine in einen genormten Ring eingefüllte Bitumenschicht unter definierten Randbedingungen bei gleichmäßiger Erwärmung der Prüfflüssigkeit (5 °C pro Minute) eine durch die Schwerkraft einer aufgelegten Stahlkugel mit definierter Masse verursachte, festgelegte Verformung erfährt (siehe Bild 8, BECKEDAHL).

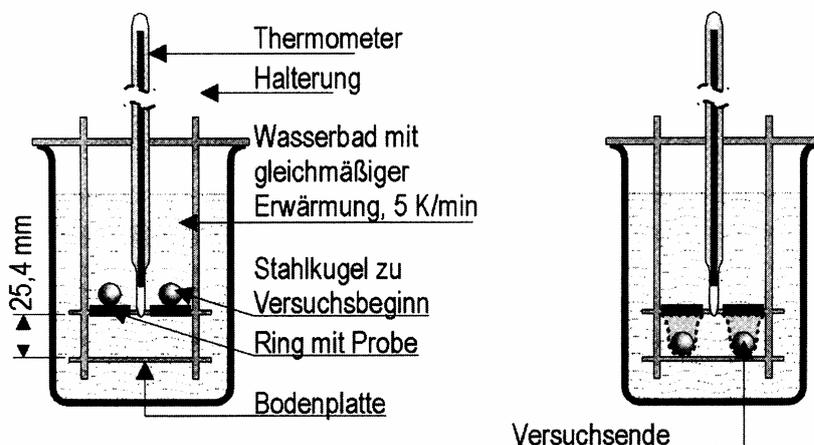


Bild 8: Prinzipskizze – Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK (aus BECKEDAHL)

Der Erweichungspunkt Ring und Kugel je Bitumenprobe ist der Mittelwert aus mindestens 2 Einzelwerten, die höchstens 1 °C voneinander abweichen dürfen. Nach SCHÄFFLER verändert sich bei der Temperatur EP RuK das rheologische Verhalten des Bitumens. Es ist die Temperaturgrenze zwischen dem zähplastischen und weichplastischen Bereich.

6.1.4 Dynamische Viskosität

Die Viskosität ist das Maß für die innere Reibung oder Zähigkeit eines Stoffes und beschreibt die Eigenschaft eines fließfähigen Stoffsystems, bei einer Schubverformung eine Schubspannung aufzunehmen, die nur von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt. Bei Gasen und bei newtonschen Flüssigkeiten gilt das newtonsche Viskositätsgesetz. Es lautet:

$$\tau = \eta \times D \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}] \quad \text{Gleichung 1}$$

Dabei bedeuten:

- τ Schubspannung [N/mm²]
- η Proportionalitätsfaktor, dynamische Viskosität [Pa·s]
- D Geschwindigkeitsgefälle [1/s]

Das heißt, die Schubspannung τ zwischen zwei laminar strömenden Schichten ist proportional zum Geschwindigkeitsgefälle D senkrecht zur Strömungsrichtung. Den Proportionalitätsfaktor η heißt „dynamische Viskosität“, er wird auch als „Koeffizient der inneren Reibung“ oder „dynamische Zähigkeit“ bezeichnet. Bei der kinematischen Viskosität ν handelt es sich um eine auf die Dichte des jeweiligen Stoffes bezogene Viskosität, sie ist als Quotient aus dynamischer Viskosität η und Dichte ρ definiert.

Nach *DIN 52007-1* verhalten sich Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel aufgrund ihres kolloid-dispersen Systems nicht in allen Temperaturbereichen wie newtonsche Flüssigkeiten, das heißt, die dynamische Viskosität des Bitumens oder bitumenhaltiger Bindemittel ist von der Prüftemperatur, der aufgetragenen Schubspannung und vom Geschwindigkeitsgefälle abhängig. Mit anderen Worten, die in dieser Untersuchung je Probe ermittelte dynamische Viskosität gilt nur für eine bestimmte Ver-

suchsanordnung mit festgelegten Versuchsbedingungen (siehe Tabelle 8). Da die dynamische Viskosität des Bitumens zusätzlich von der Belastungsdauer abhängt – der für Bitumen typische zeitabhängige Verlauf der dynamischen Viskosität ist in Bild 9 dargestellt – wird in diesem Forschungsvorhaben die dynamische Viskosität als Mittelwert der Einzelmesswerte zwischen 50 und 60 Minuten definiert.

Die dynamische Viskosität wird mit einem Dynamischen Scherrheometer ermittelt.

Tabelle 8: Versuchsbedingungen und Versuchsanordnung zur Ermittlung der dynamischen Viskosität

Versuchsanordnung/Parameter	Versuchsbedingung
Prüf-/Messeinrichtung	ROTOR
Prüftemperatur des Bindemittels	90 °C
Umdrehungen	10 U/min
Messdauer	60 min
Dauer der Vortemperierung	30 min

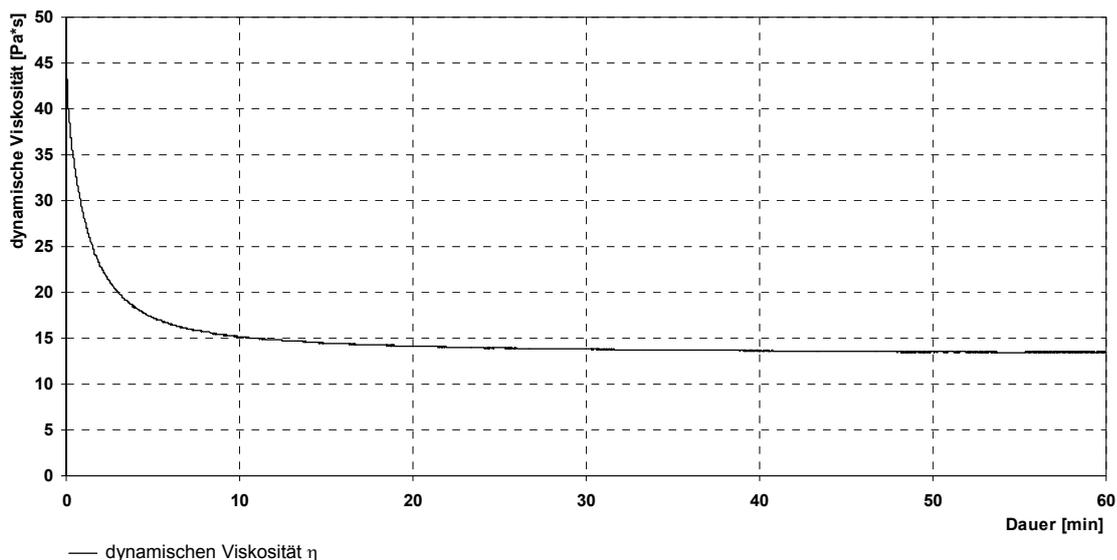


Bild 9: Abhängigkeit der dynamischen Viskosität η von der Belastungsdauer

6.2 Mischgutuntersuchungen

6.2.1 Rohdichte

Der Quotient aus der Masse des Asphalts und seinem Volumen ohne Luftporen (jedoch einschließlich der in der Gesteinskörnung eingeschlossenen, von außen nicht zugänglichen Poren) bezogen auf eine Prüftemperatur von 25 °C wird als Rohdichte bezeichnet. In *DIN 1996, Teil 7* werden zwei Verfahren, ein volumetrisches Verfahren und ein mathematisches Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte beschrieben. Die Rohdichte des Asphalts wird in diesem Forschungsvorhaben mit dem volumetrischen Verfahren ermittelt. Die Vorgehensweise ist in der *Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil 10 Bestimmung der Rohdichte von Asphalt mit Wasser* (abgekürzt *ALP A-StB, Teil 10*) beschrieben.

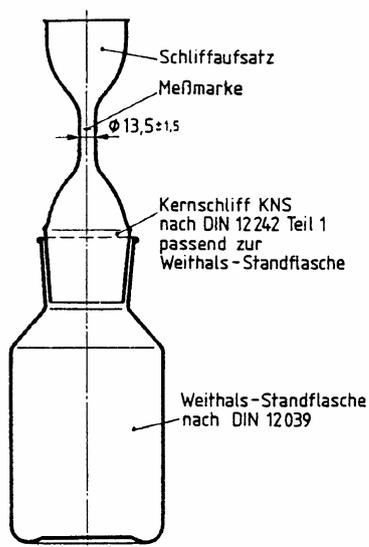


Bild 10: Pyknometer zur Bestimmung der Rohdichte (aus ALP A-StB, Teil 10)

Zur Bestimmung der Rohdichte wird zunächst die Masse (m_1) eines kalibrierten Pyknometers (siehe Bild 10) und die Masse (m_2) des mit der Messprobe befüllten Pyknometers ermittelt. Anschließend wird die Weithals-Standflasche bis ca. 2 cm unterhalb des Schliffes mit destilliertem Wasser befüllt und es werden größere Luft-einschlüsse durch Schütteln oder Rollen ausgetrieben. Danach wird die mit der Messprobe befüllte Weithals-Standflasche in eine Vakuumanlage gestellt und der Druck wird innerhalb von 30 Minuten auf 20 (± 1) mbar (1 mbar = 1 hPa) abgesenkt. Um die restlichen Luft-einschlüsse in der Messprobe auszutreiben, wird dieser Druck

für eine Dauer von 30 (± 1) Minuten beibehalten. Im Anschluss daran ist der eingefettete Schliffaufsatz aufzusetzen, das Pyknometer bis fast zur Messmarke am Schliffaufsatz mit destilliertem Wasser zu befüllen und anschließend mindestens 90 Minuten in einem Wasserbad bei 25 (± 1) °C zu temperieren. Nach dem Temperieren ist das Pyknometer genau bis zur Messmarke mit destilliertem, in einer Spritzflasche enthaltenem, temperiertem Wasser aufzufüllen. Nun wird das Pyknometer dem Wasserbad entnommen, abgetrocknet und gewogen (m_3). Mit den ermittelten Massen kann die Rohdichte nach Gleichung 2 berechnet werden.

$$\rho_R = \frac{m_2 - m_1}{V_P - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad [\text{g/cm}^3] \quad \text{Gleichung 2}$$

Dabei bedeuten:

- ρ_R nach volumetrischem Verfahren ermittelte Rohdichte von Asphalt [g/cm^3], auf 0,001 gerundet
- m_1 Masse der Weithals-Standflasche mit Schliffaufsatz [g], auf 0,1 gerundet
- m_2 Masse der Weithals-Standflasche mit Schliffaufsatz und Messprobe [g], auf 0,1 gerundet
- m_3 Masse der Weithals-Standflasche mit Schliffaufsatz, Messprobe und Wasser [g], auf 0,1 gerundet
- V_P Volumen des kalibrierten Pyknometers bis zur Messmarke [cm^3]
- ρ_w 0,997 [g/cm^3], Dichte des destillierten Wassers bei 25 °C

6.2.2 Raumdichte

Der Quotient aus der Masse des Asphalts und des Außenvolumens des verdichteten Asphalts, das heißt, einschließlich der im Asphalt vorhandenen Luftporen, wird als Raumdichte bezeichnet. In *DIN 1996, Teil 7* sind zwei Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte, das Tauchwägevverfahren und das Ausmessverfahren, beschrieben. Welches Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte anzuwenden ist, hängt vom Hohlraumgehalt des Asphaltprobekörpers und von der Hohlraumstruktur ab. In diesem Forschungsvorhaben wird die Raumdichte des Asphalts mit dem Tauchwägevverfahren ermittelt.

Zur Bestimmung der Raumdichte wird ein Probekörper (z. B. Marshall-Probekörper oder Ausbaustück), dessen Trockenmasse (m_4) bekannt ist, zunächst 90 (± 30) Minuten im Wasserbad bei 25 (± 1) °C gelagert und anschließend in 25 (± 1) °C warmen

Wasser gewogen (m_5). Nach der Unterwasserwägung ist der Probekörper an Luft zu wiegen. Hierzu ist der Probekörper mit der Hand oder einem geeigneten Gerät, z. B. einer Zange, die den Probekörper nur punktförmig berührt, dem Wasserbad zu entnehmen. Wird der Probekörper mit der Hand herausgenommen, so ist der Probekörper nach der Entnahme an die trockene Hand zu übergeben. Die dem Wasserbad entnommene Probe wird nun in eine tarierte Schale gelegt und die Masse des Probekörpers (m_6) bestimmt. Die Zeit zwischen Herausnehmen des Probekörpers aus dem Wasser bis zum Einlegen in die Schale soll 10 (± 2) Sekunden betragen. Der Probekörper ist währenddessen so zu halten, das das überschüssige Wasser über eine Kante abtropfen kann. Die Raumdichte des Probekörpers wird nach Gleichung 3 berechnet.

$$\rho_A = \frac{m_4}{m_6 - m_5} \quad [\text{g/cm}^3] \quad \text{Gleichung 3}$$

Dabei bedeuten:

- ρ_A Raumdichte des Asphalts [g/cm^3], auf 0,001 gerundet
- m_4 Trockenmasse des Probekörpers [g], auf 0,1 gerundet
- m_5 Masse des in Wasser gelagerten Probekörpers unter Wasser [g], auf 0,1 gerundet
- m_6 Masse des in Wasser gelagerten Probekörpers an Luft [g], auf 0,1 gerundet

Im Weiteren wird die Raumdichte je Marshall-Probekörper mit $\rho_{A,M,i}$ und die mittlere, aus drei Einzelraumlichkeiten berechnete Raumdichte mit $\rho_{A,M}$ bezeichnet. Analog dazu wird die Raumdichte je Probeplatte mit $\rho_{A,P,i}$ und die mittlere, aus zwei Einzelraumlichkeiten berechnete Raumdichte mit $\rho_{A,P}$ bezeichnet. Die mittlere Raumdichte von Ausbaustücken wird mit $\rho_{A,A}$ abgekürzt.

6.2.3 Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad

Der Hohlraumgehalt an den im Labor hergestellten Probekörpern, z. B. Probeplatten oder Marshall-Probekörper, sowie an Ausbaustücken, z. B. Bohrkernen, wird nach Gleichung 4 und der Verdichtungsgrad k an Ausbaustücken nach Gleichung 5 berechnet (*DIN 1996, Teil 7*).

Der je Mischgutsorte (Schaumbitumenasphalt und Referenzasphalt) angegebene Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper H_{MPK} entspricht dem mittleren Hohlraumgehalt von drei Marshall-Probekörpern und der angegebenen Hohlraumgehalt an Probeplatten H_{PP} entspricht dem mittleren Hohlraumgehalt von zwei Probeplatten.

$$H = \frac{\rho_R - \rho_A}{\rho_R} \times 100 \quad [\text{Vol.-%}] \quad \text{Gleichung 4}$$

Dabei bedeuten:

H Hohlraumgehalt des Probekörpers oder Ausbaustücks [Vol.-%], auf 0,1 gerundet

ρ_R Rohdichte der Asphaltmischgutprobe [g/cm³], auf 0,1 gerundet

ρ_A Raumdichte des Probekörpers oder Ausbaustücks [g/cm³], auf 0,001 gerundet

$$k = \frac{\rho_{A,A}}{\rho_{A,M}} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Gleichung 5}$$

Dabei bedeuten:

k Verdichtungsgrad des Ausbaustücks [%], auf 0,1 gerundet

$\rho_{A,A}$ Raumdichte des Ausbaustücks [g/cm³], auf 0,001 gerundet

$\rho_{A,M}$ Raumdichte des Marshall-Probekörpers, der aus dem zugehörigen Asphaltmischgut hergestellt wurde [g/cm³], auf 0,001 gerundet

Bei der Berechnung des Verdichtungsgrads der Probeplatte k_P nach Gleichung 5 ist die Raumdichte des Ausbaustücks $\rho_{A,A}$ durch die Raumdichte der Probeplatten $\rho_{A,P}$ zu ersetzen

6.2.4 Verdichtbarkeit

In *DIN EN 12697, Teil 10* werden drei Prüfverfahren, das Einstampfverfahren (Marshall-Verdichtung), das Verfahren mit dem Gyrator-Verdichter und dem Vibrationsverdichter, zur Bestimmung der Verdichtbarkeit von Asphalten beschrieben. In diesem Forschungsvorhaben wird die Verdichtbarkeit des Asphalts mit dem im Laboratorium für Straßenwesen der Universität der Bundeswehr München vorhandenem Gyrator-Verdichter untersucht.

In Bild 11 ist der in diesem Forschungsvorhaben verwendete Gyrator-Verdichter des Typs „Troxler Model 4140“ abgebildet. Mit einem Gyrator-Verdichter können im Labor zum einen die beim Verdichten des Mischguts auftretenden, durch das Schieben der Walzen entstehen horizontalen Scherkräfte sowie die durch das Eigengewicht der Walze auftretenden vertikalen Druckkräfte und zum anderen die Nachverdichtung unter Verkehr nachgestellt werden. Bild 12 zeigt einen Probekörper während der Verdichtung.

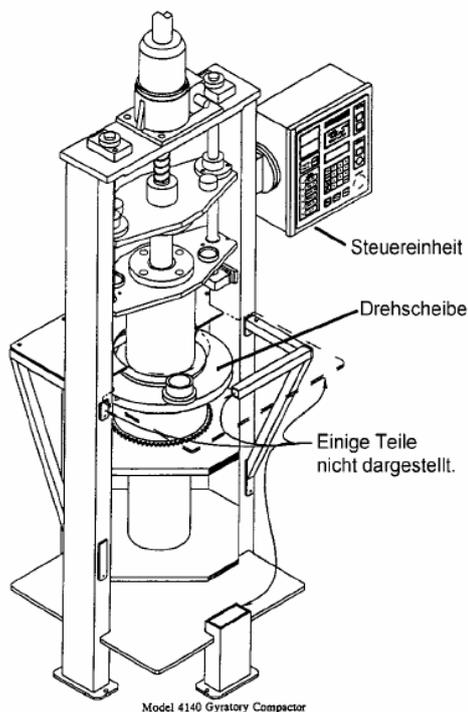
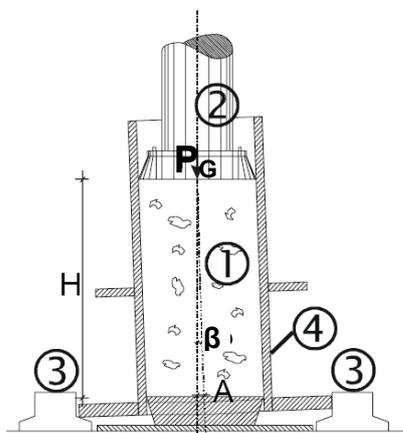


Bild 11: Gyrator-Verdichter (aus WALLNER)



Legende:

- ① Mischgut
- ② Stempel
- ③ Nockenstößel
- ④ Probenform
- P_G Druck
- h_G Probekörperhöhe
- A Auslenkung
- β Neigungswinkel (Umlaufwinkel)

Bild 12: Probekörper während der Verdichtung (nach WALLNER)

Dabei wird ein zylindrischer Probekörper mit der Höhe h_G durch einen während des gesamten Verdichtungsvorgangs konstanten, in Zylinderachsrichtung wirkenden Druck P_G belastet und um die Zylinderachse mit einer festgelegten Umdrehungsgeschwindigkeit V_G gedreht, während der Probekörper gleichzeitig um den Neigungswinkel β gegenüber der Rotationsachse ausgelenkt („getaumelt“) wird (nach WALLNER). Für die Bestimmung der Verdichtbarkeit werden die in Tabelle 9 zusammengefassten Einstellungen verwendet.

Tabelle 9: Versuchsanordnung und Versuchsbedingungen – Gyrator-Verdichter

Versuchsanordnung/Parameter	Versuchsbedingungen/Größe
Taumelwinkel β	1°
Umlaufgeschwindigkeit V_G	30/min
Verdichtungsdruck P_G	600 kPa
Innendurchmesser der Probeform r_G	100 mm
Verdichtungstemperatur	Für Referenzasphalt: 140°C Für Schaumbitumenasphalt: siehe Ziffer 7.2.1

Bei diesem Verfahren wird die Abnahme des berechneten Hohlraumgehalts in Abhängigkeit von der eingebrachten Verdichtungsenergie, das heißt, in Abhängigkeit von der Anzahl der Umdrehungen der Gyratorprobe (Gyrationen), als sog. Verdichtungskurve wiedergegeben (Bild 13). Zur Berechnung des Hohlraumgehalts H_b wird die von der Anzahl der Gyrationen abhängige Höhe des Gyrator-Probekörpers herangezogen (Gleichung 6).

$$H_b = 100 - \frac{m_7}{h_G \times r_G^2 \times \pi \times \rho_R} \times 100 \quad [\text{Vol.-%}] \quad \text{Gleichung 6}$$

Dabei bedeuten:

- H_b berechneter Hohlraumgehalt [Vol.-%], auf 0,1 gerundet
- m_7 Masse des in der Gyrator-Form vorhandenen Mischguts [g], auf 0,1 gerundet
- r_G Innenradius der Gyrator-Form [cm], auf 0,1 gerundet
- ρ_R Rohdichte des Mischguts gem. Eignungsprüfung [g/cm³], auf 0,001 gerundet
- h_G Von der Anzahl der Gyrationen abhängige, gemessene Höhe des Gyrator-Probekörpers [cm], auf 0,01 gerundet

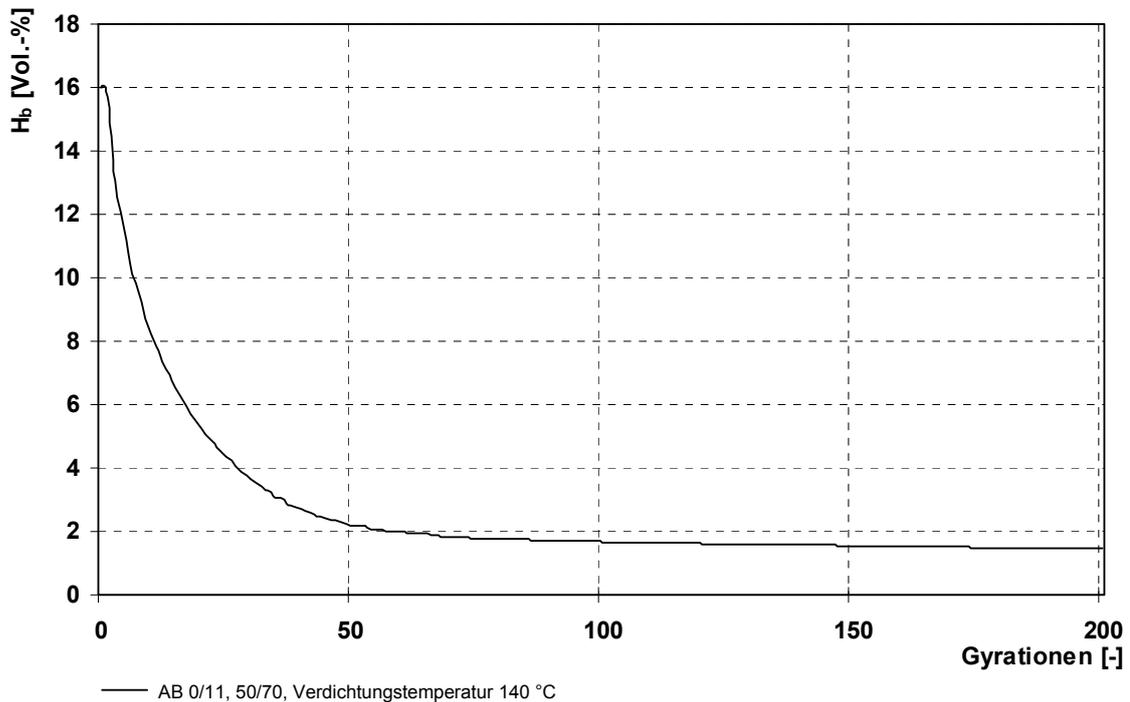


Bild 13: Abnahme des berechneten Hohlraumgehalts H_b in Abhängigkeit von den Gyrationen

6.2.5 Marshall-Prüfung

Der Widerstand des Asphalts gegen mechanische Beanspruchung wird mit den Kenngrößen Marshall-Stabilität (S_M) und Marshall-Fließwert (F_M) beschrieben. Die beiden Kenngrößen werden in diesem Forschungsvorhaben unter dem Begriff „Marshall-Prüfung“ zusammengefasst. Die Marshall-Prüfung wird innerhalb von Eignungsprüfungen für Walzasphalte zur Bestimmung des günstigsten Bindemittelgehalts herangezogen und lässt keine Beurteilung der Standfestigkeit der eingebauten Asphalt-schichten zu (BECKENDAHL). Die Durchführung und Auswertung der „Marshall-Prüfung“ ist in *DIN 1997, Teil 11* genormt.

Demnach werden je Marshall-Prüfung an drei Marshall-Probekörpern (siehe Ziffer 5.2.2) mit einer Höhe von $63,5 (\pm 2,5)$ mm die Marshall-Stabilität $S_{M,i}$ und der Marshall-Fließwert $F_{M,i}$ ermittelt und der Mittelwert je Kenngröße (S_M , F_M) berechnet. Zur Bestimmung der Stabilität und des Fließwerts je Marshall-Probekörper, wird dieser nach dem Ausformen mindestens 9, jedoch höchstens 24 Stunden auf einer ebenen Unterlage bei einer Lufttemperatur zwischen 18°C und 24°C gelagert und anschließend in einem Wasserbad 30 bis 35 Minuten auf $60 (\pm 1) ^\circ\text{C}$ erwärmt. Danach

wird der Marshall-Probekörper in die Druckvorrichtung eingelegt und mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von $50 (\pm 3)$ mm/min bis über die Höchstkraft hinaus verformt (siehe Bild 14).

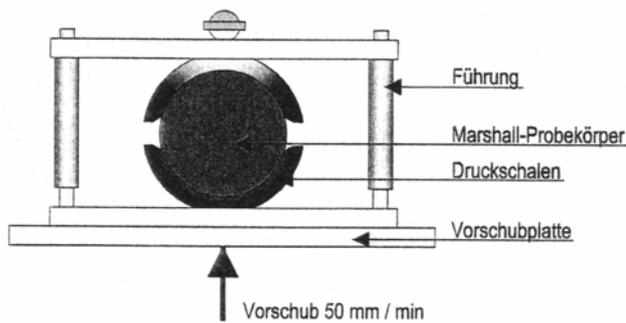


Bild 14: Druckvorrichtung (Marshall) – Prinzipskizze (aus WEHNER)

Während des Versuchsablaufs ist ein Kraft-Verformungs-Diagramm (siehe Bild 15) aufzuzeichnen, dem der Marshall-Fließwert (Strecke zwischen dem ersten deutlich erkennbaren Abweichen der Kurve von der Null-Linie und dem Erreichen der Höchstkraft) und die Höchstkraft (Stabilität) zu entnehmen sind.

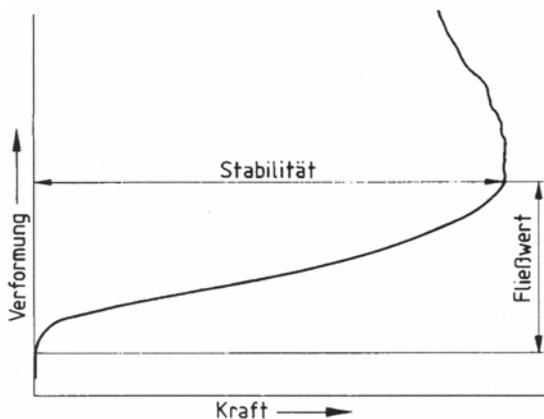


Bild 15: Kraft-Verformungsdiagramm (aus DIN 1996, Teil 11)

Da die Stabilität von der Probekörperhöhe abhängt, ist die im Versuch ermittelte Stabilität mit einem Korrekturfaktor zu multiplizieren (Gleichung 7), um die Marshall-Stabilität (M_S), die eine Probekörperhöhe von 63,5 mm voraussetzt, zu erhalten. Die von der Probekörperhöhe abhängigen Korrekturfaktoren sind in Tabelle 1 der *DIN 1996, Teil 11*, zusammengefasst.

$$M_{S,i} = L_i \times c_i \quad [\text{kN}]$$

Gleichung 7

Dabei bedeuten:

- $M_{S,i}$ Marshall-Stabilität je Marshall-Probekörper [kN], auf 0,1 gerundet
- L_i Höchstlast je Marshall-Probekörper (max. Stabilität) [kN], auf 0,1 gerundet
- c_i Korrekturfaktor je Marshall-Probekörper gem. *DIN 1996, Teil 11*, Tabelle 1 [-]
Index i je Marshall-Probekörper

Im Gegensatz zur *DIN 1996, Teil 11* werden die Ergebnisse der Marshall-Stabilität unabhängig von der Größe der Stabilität auf 0,1 kN gerundet.

6.2.6 Spurbildungsversuch

Der Spurbildungsversuch ist ein Prüfverfahren an Probeplatten (siehe Ziffer 5.2.3) zur Bestimmung der Verformungsanfälligkeit von Asphalt und wird im Straßenbaulabor mit einem Spurbildungsgerät – in Deutschland wird ein Prüfgerät mit kleinem Rad verwendet – überprüft.

Das Prinzip des Spurbildungsversuchs ist in Bild 16 dargestellt. Die von der Anzahl der Belastungszyklen abhängige Spurrinnentiefe – ein Belastungszyklus entspricht zwei Überrollungen (hin und zurück) eines mit 700 (± 10) N belasteten Rades – dient als Kenngröße für den Verformungswiderstand.

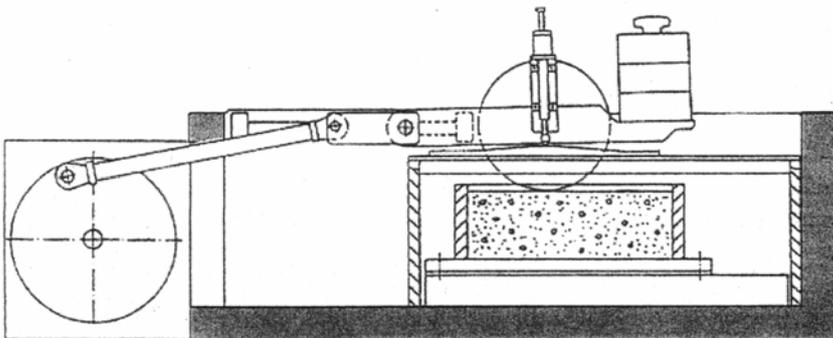


Bild 16: Prinzipskizze – Spurbildungsgerät (aus BECKEDAHL)

Die Zunahme der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungszyklen kann graphisch dargestellt werden. In Bild 17 ist die Zunahme der Spurrinnentiefe je Probeplatte (Probe 1 und Probe 2) sowie die mittlere Spurrinnentiefe (Mittelwert

der beiden Einzelwerte) und die während des Versuchs vorhandene Lufttemperatur wiedergegeben. Der Spurbildungsversuch wird entweder nach 10.000 Belastungszyklen (20.000 Überrollungen) oder bei einer maximalen Spurrinntiefe von 20 mm beendet, je nachdem was zuerst eintritt.

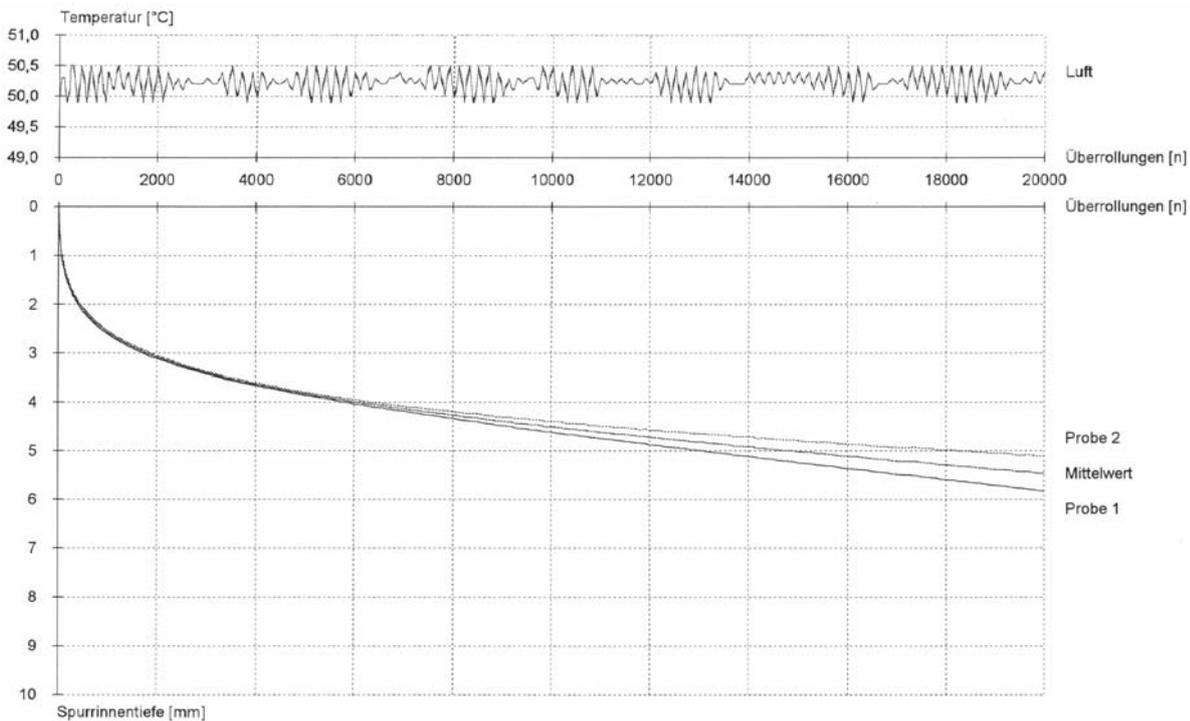


Bild 17: Zunahme der Spurrinntiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen

Die Spurrinntiefe wurde in diesem Forschungsvorhaben mit dem in Deutschland verwendeten „Prüfgerät mit kleinem Rad“ ermittelt. Die Prüfbedingungen des Spurbildungsversuchs und die Anforderungen an den Verdichtungsgrad der Probepplatten und die Probepplattenhöhe sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Bei der Festlegung der Prüfbedingungen wurden die Ergebnisse des von der Bundesanstalt für Straßenwesen in Auftrag gegebenen Forschungsvorhabens (FE-Nr. 07.180/1997/EGB) „Spurbildungstest Optimierung der Prüfbedingungen des Spurbildungsversuchs“ (GAUER), berücksichtigt.

Für die Auswertung des Spurbildungsversuchs werden die Kenngrößen Spurrinntiefe, proportionale Spurrinntiefe und Spurbildungsrate herangezogen. Der Zahlenwert der Spurrinntiefe RD_{Luft} (Rut Depth in Luft, mm) entspricht der absoluten

Tabelle 10: Versuchsanordnung und Versuchsbedingungen – Spurbildungsversuch

Versuchsanordnung/Parameter	Versuchsbedingung/Größe
Prüfrad	Gummirad Ø 200 mm
Prüftemperatur	50 (±1) °C
Art der Temperierung	Luft
Temperierdauer	mindestens 4 h
Verdichtungsgrad der Probeplatten k_{PP}	100 (±1) %
Probeplattenhöhe h_{PP}	40 (±2) mm

mittleren Spurrinnentiefe von zwei geprüften Probeplatten. Zusätzlich werden zur Bewertung der Verformungsanfälligkeit die Kenngrößen Spurbildungsrate WTS_{Luft} (Wheel Tracking Slope in Luft, mm/1.000) und proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} (Proportional Rut Depth in Luft, %) herangezogen. Der Zahlenwert der Spurbildungsrate WTS_{Luft} und der proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} ist jeweils der Mittelwert der Prüfergebnisse von zwei Probeplatten.

Nach *DIN EN 12697, Teil 22* ist die Spurbildungsrate eine berechnete Durchschnittsgeschwindigkeit, mit der die Spurrinnentiefe bei wiederholten (an Luft) vorgenommenen Übergängen des belasteten Rads zunimmt (Gleichung 8)

$$WTS_{Luft,i} = \frac{d_{10.000} - d_{5.000}}{5} \quad [kN] \quad \text{Gleichung 8}$$

Dabei bedeuten:

$WTS_{Luft,i}$ Spurbildungsrate je Probeplatte 10.000 Belastungszyklen [mm], auf 0,1 gerundet

$d_{5.000}$ Spurrinnentiefe nach 5.000 Belastungszyklen [mm], auf 0,1 gerundet

$d_{10.000}$ Spurrinnentiefe nach 10.000 Belastungszyklen [mm], auf 0,1 gerundet

Index i je Probeplatte

Die je Probeplatte ermittelte proportionale Spurrinnentiefe $PRD_{Luft,i}$ ist der Quotient aus vorhandener Spurrinnentiefe (nach 10.000 Belastungszyklen) und der vor Beginn der Prüfung vorhandenen Probeplattenhöhe und wird in Prozent angegeben. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 9.

$$\text{PRD}_{\text{Luft},i} = \frac{d_{10.000}}{h_{\text{PP}}} \times 100 \quad [\text{kN}] \quad \text{Gleichung 9}$$

Dabei bedeuten:

$\text{PRD}_{\text{Luft},i}$ proportionale Spurrinntiefe je Probeplatte [%], auf 0,1 gerundet

$d_{10.000}$ Spurrinntiefe nach 10.000 Belastungszyklen [mm], auf 0,1 gerundet

$h_{\text{PP},i}$ Probeplattenhöhe, je Probeplatte [mm], auf 0,1 gerundet

Index i je Probeplatte

6.2.7 Indirekte Zugprüfung

Beim Prüfverfahren indirekte Zugfestigkeit wird ein zylindrischer Probekörper – in diesem Forschungsvorhaben werden Marshall-Probekörper (siehe Ziffer 5.2.2) verwendet – bei einer Prüftemperatur von $5 (\pm 2)^\circ\text{C}$ mit einer festgelegten, konstanten Vorschubgeschwindigkeit von $50 (\pm 2)$ mm/min über diametral gegenüberliegende Belastungsstreifen bis zum Bruch belastet. Das Versuchsprinzip ist in Bild 18 dargestellt.

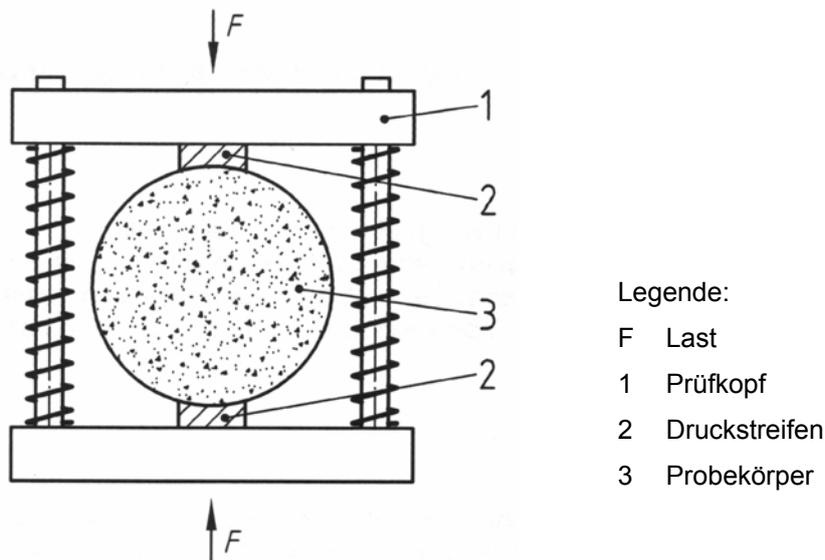


Bild 18: Prinzipskizze – Indirekte Zugprüfung (aus DIN EN 12697, Teil 23)

Die zu prüfenden Probekörper werden zunächst mindestens 2 Stunden im Wasserbad oder in einer Luftkammer bei $5 (\pm 1)^\circ\text{C}$ gelagert. Nach Entnahme des temperierten Probekörpers aus dem Wasserbad oder der Luftkammer muss die Prüfung innerhalb von 2 Minuten abgeschlossen sein.

Die je Prüfkörper ermittelte indirekte Zugfestigkeit ITS_i entspricht der maximalen Zugfestigkeit, die nach Gleichung 10 aus der beim Bruch erreichten Höchstlast und den Maßen des geprüften Probekörpers Höhe und Durchmesser berechnet wird.

$$ITS_i = \frac{2 \times P_{z,i}}{\pi \times d_i \times h_i} \quad [\text{GPa}] \quad \text{Gleichung 10}$$

Dabei bedeuten:

ITS_i Indirekte Zugfestigkeit (Indirect Tensile Strength) [GPa], auf 0,001 gerundet

$P_{z,i}$ Beim Bruch erreichte Höchstlast [kN], auf 0,001 gerundet

d_i Durchmesser des Probekörpers [mm], auf 0,1 gerundet

h_i Höhe des Probekörpers [mm], auf 0,1 gerundet

Index i je Probekörper

Die in diesem Forschungsvorhaben angegebene, mittlere indirekte Zugfestigkeit ITS (Indirect Tensile Strength) ist der aus 3 Einzelergebnissen berechnete Mittelwert.

Bei dem bis zum Bruch belasteten Probekörper sind die in Bild 19 dargestellten Brucharten zu unterscheiden.

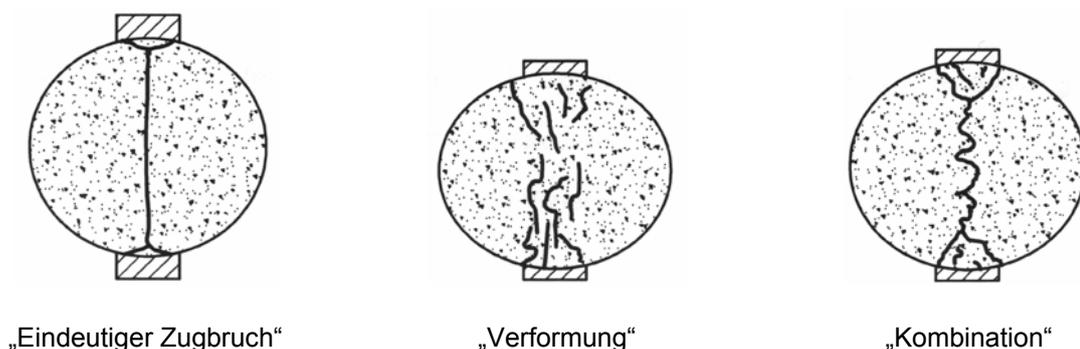


Bild 19: Brucharten (aus DIN EN 12697, Teil 23)

Als eindeutigen Zugbruch bezeichnet man eine Bruchlinie, die glatt und entlang einer Durchmesserlinie verläuft. Im Gegensatz dazu ist bei der Bruchart „Verformung“ keine klare Bruchlinie erkennbar. Eine weitere Bruchart die eine begrenzte Bruchlinie und im Bereich der Druckstreifen eine größere Verformung aufweist, bezeichnet man als „Kombination“. Zusätzlich wurden die Probekörper entlang der Bruchlinie geteilt,

um die Bruchoberfläche visuell auf Anzeichen von abgerissenen oder gebrochenen Gesteinskörnungen zu untersuchen zu können („Oberfläche zum größten Teil gebrochen“ oder „unversehrt“).

6.2.8 Wasserempfindlichkeit

Zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit werden 6 Marshall-Probekörper, die mit nur 2 x 25 Schlägen (siehe Ziffer 5.2.2) verdichtet wurden, in zwei gleichgroße Gruppen mit je 3 Marshall-Probekörper (Teilgruppen) geteilt. Die Teilgruppe „trockene Probekörper“ wird zunächst auf einer ebenen Unterlage bei einer Raumtemperatur von 20 (± 5)°C gelagert, während die Teilgruppe „nasse Probekörper“ ein festgelegtes Verfahren zur Sättigung der Prüfkörper mit Wasser durchlaufen.

Die Sättigung der „nassen Probekörper“ erfolgt in einer Vakuumkammer. Die nassen Probekörper werden für 30 (± 5) Minuten in einer mit 20 (± 5) °C warmen, mit destilliertem Wasser gefüllten Vakuumkammer bei 67 (± 3) mbar gelagert und anschließend ohne Vakuum weitere 30 (± 5) Minuten im Wasser belassen. Anschließend werden die „nassen Probekörper“, nach Prüfung des Volumens (alle Probekörper mit einer Volumenzunahme von mehr als 2 % sind zu verwerfen), für 68 bis 72 Stunden im Wasserbad bei 40 (± 1) °C gelagert. Im Anschluss daran werden beide Teilgruppen im Wasserbad 2 Stunden lang auf die empfohlene Norm-Prüftemperatur von 25 (± 2) °C temperiert. Hierbei ist darauf zu achten, dass die „trockenen Probekörper“ mit Hilfe einer wasserdichten Hülle, die gleichzeitig die Wärmeübertragung nicht behindert (z. B. Plastiktüte), gegen eindringendes Wasser geschützt werden. Die „nassen Probekörper“ können direkt ins Wasserbad gelegt werden.

Anschließend wird an jedem Probekörper die indirekte Zugfestigkeit ermittelt und es wird die durchschnittliche indirekte Zugfestigkeit der „trockenen Probekörper“ ITS_d (Indirect Tensile Strength, dry) und die durchschnittliche indirekte Zugfestigkeit der „nassen Probekörper“ ITS_w (Indirect Tensile Strength, wet) berechnet. Somit kann die Wasserempfindlichkeit $ITSR$ (Indirect Tensile Strength Ratio) nach Gleichung 11 berechnet werden.

$$\text{ITSR} = \frac{\text{ITS}_w}{\text{ITS}_d} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Gleichung 11}$$

Dabei bedeuten:

- ITSR Verhältnis der durchschnittlichen indirekten Zugfestigkeiten (Indirect Tensile Strength Ratio) [%], auf 0,1 gerundet
- ITS_w mittlere indirekte Zugfestigkeit der „nassen Probekörper“ (Indirect Tensile Strength, wet) [kPa], auf 0,001 gerundet
- ITS_d mittlere indirekte Zugfestigkeit der „trockenen Probekörper“ (Indirect Tensile Strength, dry) [kPa], auf 0,001 gerundet

6.2.9 Einaxialer Druckschwellversuch

Mit dem einaxialen Druckschwellversuch kann das Verformungsverhalten von Asphalt bei hohen Temperaturen bewertet werden. Bei diesem Prüfverfahren wird die plangeschliffene und eingefettete Grundfläche eines zylindrischen Probekörpers (z. B. Marshall-Probekörper, siehe Ziffer 5.2.2) bei einer konstanten Prüftemperatur von 50 °C fortlaufend mit einer haversine-impulsförmigen Druckschwellbelastung beansprucht. Während des Versuchsablaufs wird die von der Anzahl der aufgetragenen Belastungszyklen abhängige Verformung in Belastungsrichtung aufgezeichnet. Ein Belastungszyklus entspricht dem Zeitintervall bestehend aus Impulsdauer und Impulspause (siehe Bild 20). Das Prüfverfahren und die Prüfbedingungen werden in den *Technischen Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme* (abgekürzt *TP A-StB Teil: Druckschwellversuch*) beschrieben.

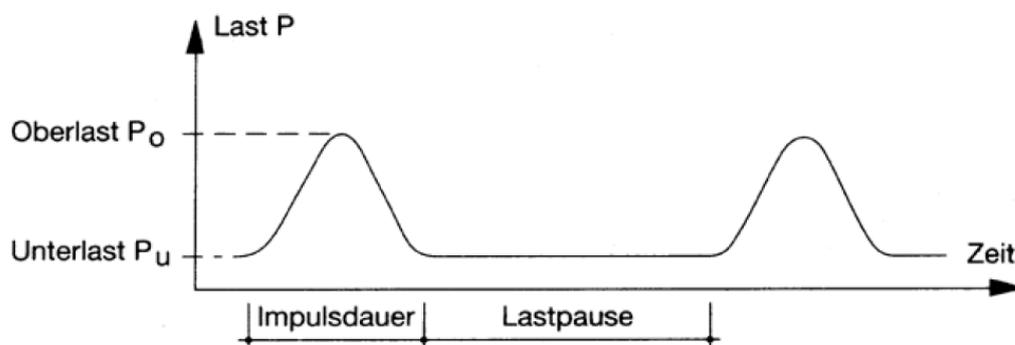


Bild 20: Impulsbelastung – Druckschwellversuch (aus TP A-StB, Teil: Druckschwellversuch)

Dem einaxialen Druckschwellversuch werden in diesem Forschungsvorhaben die in Tabelle 11 zusammengefassten Parameter zugrunde gelegt. Der typische Verlauf

der von der Anzahl der Belastungszyklen abhängigen Kriechkurve ist in Bild 21 dargestellt. Die Kriechkurve kann wie folgt in 3 Phasen unterteilt werden:

- Phase A: starke Verformung mit progressiv abnehmender Verformungsgeschwindigkeit (Konsolidierung)
- Phase B: nahezu konstante Verformungsgeschwindigkeit mit einem Wendepunkt (volumenkonstante Formänderung)
- Phase C: progressiv zunehmende Verformungsgeschwindigkeit (beginnende und fortschreitende volumendilatante Gefügezerstörung des Probekörpers)

Tabelle 11: Einaxialer Druckschwellversuch – Parameter

Versuchsanordnung/Parameter	Versuchsbedingung/Größe
Prüftemperature	50 °C
Unterlast P_u	200 N (entspricht einer unteren Spannung von $\sigma_u = 0,025 \text{ N/mm}^2$)
Oberlast P_o	1600 N (entspricht einer oberen Spannung von $\sigma_o = 0,20 \text{ N/mm}^2$)
Wasserfilmbreite	80 mm
Impulsdauer	0,2 s
Impulspause (Pause zwischen zwei Lastimpulsen)	1,5 s

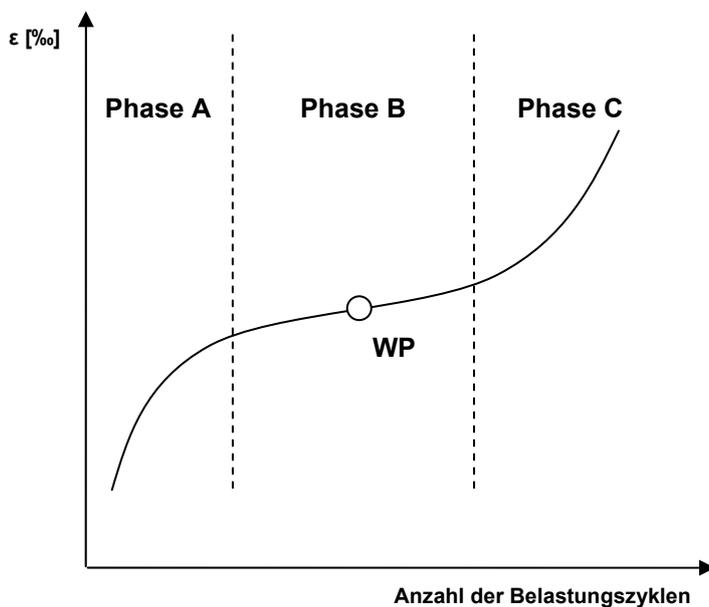


Bild 21: Kriechkurve – Druckschwellversuch (nach TP A-StB, Teil: Druckschwellversuch)

Im Gegensatz zur TP A-StB, Teil: Druckschwellversuch erfolgt die Auswertung nicht wie gefordert am Wendepunkt, sondern, da in den meisten Fällen der Wendepunkt

nicht erreicht wird, bei 10.000 Belastungszyklen. Die Dehnung ε [‰] nach 10.000 Belastungszyklen ist der Mittelwert von drei Einzelwerten. Die Dehnung ε wird in diesem Forschungsvorhaben als Verhältnis zwischen der gemessenen Verformung zur ursprünglichen Probekörperhöhe bei 10.000 Belastungszyklen definiert und wird in Promille [‰] angegeben.

6.2.10 Griffigkeitsmessung

Eine der wichtigsten nutzerrelevanten Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche ist die Griffigkeit, die die Wirkung der Textur und der stofflichen Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche auf den Kraftschluss mit dem Fahrzeugreifen unter festgelegten Bedingungen beschreibt. Die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche über einen längeren Streckenabschnitt zu messen, ist beispielsweise nach dem SKM (Seitenkraftmessverfahren) möglich (siehe Anmerkung Ziffer 1). Die standardisierten Messbedingungen, die Einsatzbedingungen, die Datenerfassung und die Datenaufbereitung des SKM sind in den *Technischen Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren SKM (TP Griff-StB)* beschrieben. Das Messprinzip des SKM nutzt die auf einen schräglaufenden Reifen (Reibrad mit schräggestellter Achse, deren Lagerflansch gelenkig am Messfahrzeug angebracht ist) wirkende Seitenkraft, um den Seitenkraftbeiwert μ_y , der zur Bewertung der Griffigkeit herangezogen wird, zu ermitteln. Der Seitenkraftbeiwert am schräglaufenden Rad (μ_y) ist der Quotient aus der Seitenreibungskraft F_y – die Seitenreibungskraft ist die Kraft, die das Reibrad in die Richtung des Geschwindigkeitsvektors V drehen will, also die Tendenz hat, den Schräglaufwinkel α zu reduzieren – und der auf das Rad wirkenden Normalkraft F_z (Bild 22, Gleichung 12)

$$\mu_y = \frac{F_y}{F_z} \quad [-]$$

Gleichung 12

Dabei bedeuten:

μ_y Seitenkraftbeiwert am schräglaufenden Rad [-], auf 0,01 gerundet

F_y Seitenreibungskraft [N], auf 0,01 gerundet

F_z Normalkraft [N], auf 0,01 gerundet

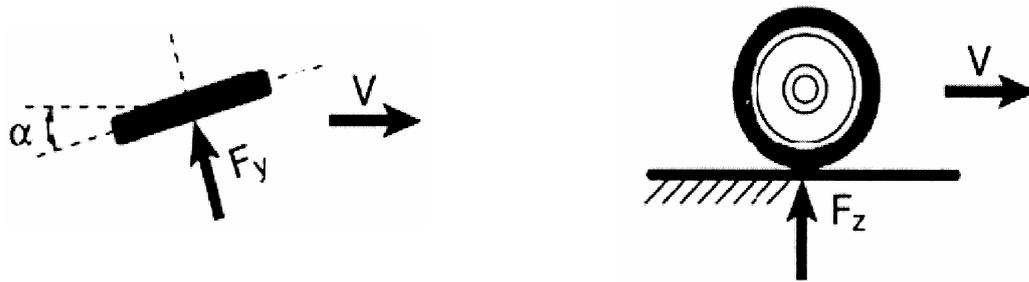


Bild 22: Schräglaufwinkel α , Seitenreibungskraft F_y und Normalkraft F_z (aus TP Griff-StB)

Eine Auswahl der wichtigsten standardisierten Messbedingungen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Standardisierte Messbedingungen (nach TP Griff-StB)

Versuchsanordnung/Parameter	Versuchsbedingung/Größe
Messreifen	SKM-Reifen, Größe 3x20 Zoll (profilloser, schmaler Reifen in Motorradimensionen)
Normalkraft F_z (Radlast)	1960 (± 10) N
Reifenüberdruck bei einer Lufttemperatur von 25 °C	3,50 ($\pm 0,1$) bar
Wasserfilmdicke	0,5 mm (rechnerisch)
Wasserfilmbreite	80 mm
Schräglaufwinkel α	20 ($\pm 1,0$) °C
Soll-Messgeschwindigkeit	80, 60 oder 40 km/h

Bei der Griffigkeitsmessung sind folgende Einsatzgrenzen einzuhalten:

- Fahrbahnoberflächentemperatur (T_F): $5\text{ °C} \geq T_F \geq 50\text{ °C}$
- Lufttemperatur (T_L): $5\text{ °C} \geq T_L$
- Messzeitraum: Mai bis Oktober

Beim Abfahren der zu prüfenden Strecke wird je Abschnitt mit einer Länge von 1 m der mittlere Seitenkraftbeiwert (μ_{SKM}) ermittelt. Zusätzlich müssen je Abschnitt die mittlere Messgeschwindigkeit, die mittlere Temperatur der Fahrbahnoberfläche und die mittlere Wassertemperatur bekannt sein, da diese für die notwendige Korrektur des mittleren Seitenkraftbeiwerts notwendig sind. Die Geschwindigkeitskorrektur und die Temperaturkorrektur sind notwendig, da jede Geschwindigkeitsabweichung von

der Soll-Geschwindigkeit (hier: 60 km/h) und jede Abweichung der Fahrbahnoberflächentemperatur T_F von der Bezugstemperatur (20 °C) sowie jede Abweichung der Wassertemperatur T_W die Messergebnisse maßgebend beeinflusst. Die Korrektur erfolgt nach Gleichung 13.

$$\mu_{SKM,k} = \mu_{SKM} + \frac{V_{ist} + V_{soll}}{20km/h} \times 0,05 + (T_W - 20) \times 0,002 + (T_F - 20) \times 0,012 \quad [-] \quad \text{Gleichung 13}$$

Dabei bedeuten:

$\mu_{SKM,k}$	Korrigierter Seitenkraftbeiwert am schräglaufenden Rad im 1-m-Abschnitt [-], auf 0,01 gerundet
μ_{SKM}	Gemessener Seitenkraftbeiwert am schräglaufenden Rad im 1-m-Abschnitt [-], auf 0,01 gerundet
V_{soll}	Soll-Messgeschwindigkeit [km/h], ohne Dezimalstelle
V_{ist}	Mittlere Geschwindigkeit im 1-m-Abschnitt [km/h], ohne Dezimalstelle
T_F	Mittlere Fahrbahnoberflächentemperatur [°C]
T_W	Mittlere Wassertemperatur [°C]

Aus hundert aufeinander folgenden korrigierten Seitenkraftbeiwerten (je 1-m-Abschnitt) wird der Mittelwert des 100-m-Abschnitts berechnet. In diesem Forschungsvorhaben werden zusätzlich zu den Mittelwerten der 100-m-Abschnitte, die der Abnahme der Baumaßnahme zugrunde gelegt werden, die Griffigkeitswerte der Fahrbahnoberfläche aus Referenzasphalt mit den Griffigkeitswerten der „Schaumbitumenasphaltoberfläche“ verglichen, das heißt, es wird für jeden in Bild 2 dargestellten Abschnitt der mittlere korrigierte Seitenkraftbeiwert ($\mu_{SKM,k,a}$, abgekürzt: Griffigkeitswerte) berechnet und gegenübergestellt.

6.2.11 Zerstörungsfreie Dichtemessung

Zerstörungsfreie Dichtemessungen mit einer Aufsetz- und/oder Einstecksonde sind geeignet, die Raumdichte der eingebauten Asphaltsschicht innerhalb einer bestimmten, geräteabhängigen Tiefe zu messen.

Da dieses Verfahren sowohl auf kalten wie auch auf heißen Asphaltsschichten eingesetzt werden kann, wird in diesem Forschungsvorhaben v. a. beim Verdichten der mit Schaumbitumenasphalt hergestellten Deckschicht die vorhandene Raumdichte „ein-

baubegleitend“ gemessen und somit der Verdichtungsgrad der noch „warmen“ Schicht ermittelt. War der geforderte Verdichtungsgrad ($\geq 97\%$) nicht erreicht, konnte die Schicht mit weiteren Walzübergängen weiter verdichtet werden.

Da die Messergebnisse großen Schwankungen unterliegen, kann dieses Verfahren die Bestimmung der Raumdichte am Bohrkern nicht ersetzen. Bei der Dichtemessung mit einer Aufsetzsonde, wie sie auch in diesem Forschungsvorhaben verwendet wurde, wird ein radioaktives Isotop (i. d. R. Caesium CS 137) eingesetzt. Die Gamma-Strahlung des radioaktiven Isotops wird auf dem Weg durch die Materie in einem Maße geschwächt, das von der Weglänge, der Dichte der Materie und dem Massenabsorptionskoeffizienten abhängig ist. Die Schwächung tritt im Wesentlichen durch Streuung und Absorption ein. Bei Aufsetzsonden befindet sich die Strahlenquelle nahe an der Oberfläche der zu untersuchenden Schicht. Strahlungsdetektoren messen die Intensität der aus der Schicht zurückgestreuten Gammaquanten, wobei die Direktstrahlung durch Blei abgeschirmt wird (FGSV 2001). Auf eine weitere ausführliche Beschreibung der physikalischen Grundlage der radiometrischen Verfahren wird verzichtet, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, und zum anderen dieses Prüfverfahren nur dazu dient, den Verdichtungsgrad der Schicht während des Einbaus zu überprüfen, jedoch nicht dazu, mögliche Unterschiede zwischen Schaumbitumenasphalt und Referenzasphalt aufzuzeigen.

7 Untersuchungsergebnisse

7.1 Bindemitteluntersuchungen

Prozessparameter zur Schaumbitumenherstellung

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse des *ohne* Additiv aufgeschäumten Bitumens ergibt, dass bei der Kombination Luftdruck 5 bar, Wasserdruck 6 bar und zugegebener Wassermenge 4 % die besten Ergebnisse erzielt werden. Bei 4 von 8 untersuchten Sorten wurde für diese Kombination die maximale Expansionsrate und bei 7 von 8 Bitumensorten die maximale Halbwertszeit ermittelt. Die Einzelergebnisse für das Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 (ohne Additivzugabe) sind in Tabelle 13 und die der Sorte 70/100 in Tabelle 14 zusammengefasst.

**Tabelle 13: Expansionsrate Ex und Halbwertszeit $T_{1/2}$ der Bitumensorte 50/70
 (Bitumentemperatur: 170 °C bis 175 °C, Wassermenge 4 %)**

Lieferraffinerie		1		2		3		4	
Luftdruck [bar]	Wasserdruck [bar]	$T_{1/2}$	Ex	$T_{1/2}$	Ex	$T_{1/2}$	Ex	$T_{1/2}$	Ex
3	4	6,0	18,6	4,9	17,3	4,4	25,3	7,0	12,3
5	6	5,3	20,0	5,3	17,7	6,1	23,3	8,2	13,0
6	7	4,0	16,7	4,2	17,0	5,7	23,7	5,5	15,3

**Tabelle 14: Expansionsrate Ex und Halbwertszeit $T_{1/2}$ der Bitumensorte 70/100
 (Bitumentemperatur: 170 °C bis 175 °C)**

Lieferraffinerie		1		2		3		4	
Luftdruck [bar]	Wasserdruck [bar]	$T_{1/2}$	Ex	$T_{1/2}$	Ex	$T_{1/2}$	Ex	$T_{1/2}$	Ex
3	4	4,7	18,3	4,5	18,3	3,7	23,0	4,3	15,5
5	6	4,9	19,7	4,8	20,0	4,1	23,3	5,9	15,7
6	7	4,2	22,7	4,1	21,3	4,0	22,0	5,8	15,0

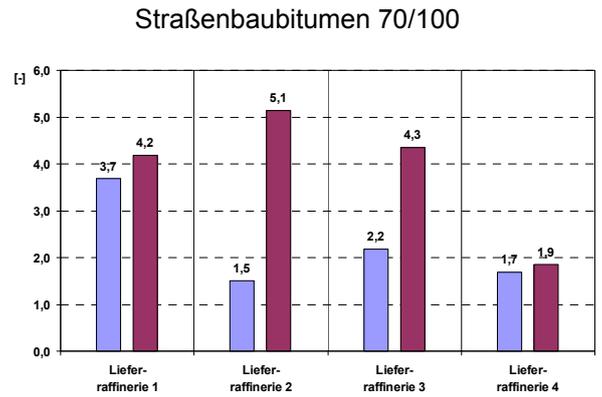
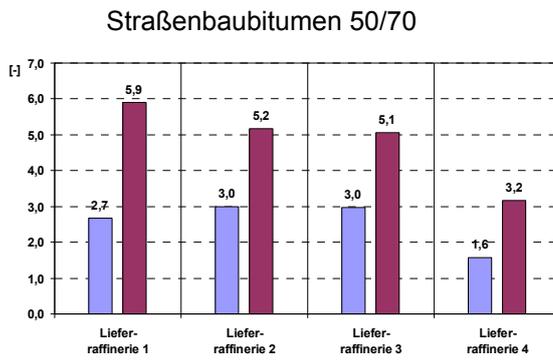
Schnelltest

Zusätzlich zum Forschungsantrag wird gemäß der Empfehlung des projektbegleitenden Ausschusses ein Schnelltest, in Anlehnung an den Schaumtest der Firma STRABAG, durchgeführt, um zu überprüfen, ob hiermit die Bindemittelsorten nach den Gruppen: „für die Schaumbitumenherstellung gut geeignet“, „... geeignet“ und „... nicht geeignet“ unterschieden werden können. Wie vorgeschlagen wird der Schaumtest mit allen Bindemittelsorten ohne Additivzugabe und zusätzlich zum geforderten Untersuchungsumfang auch an den Bindemittelsorten mit Additivzugabe durchgeführt.

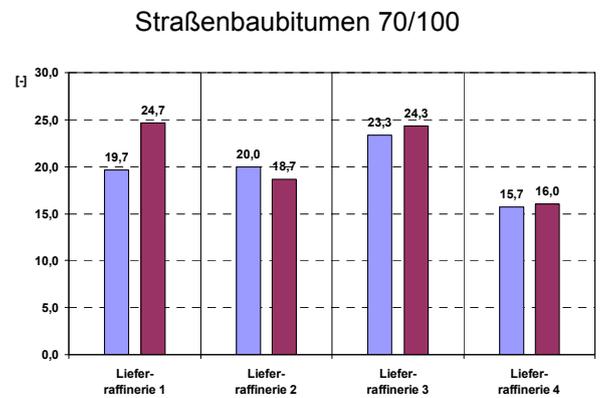
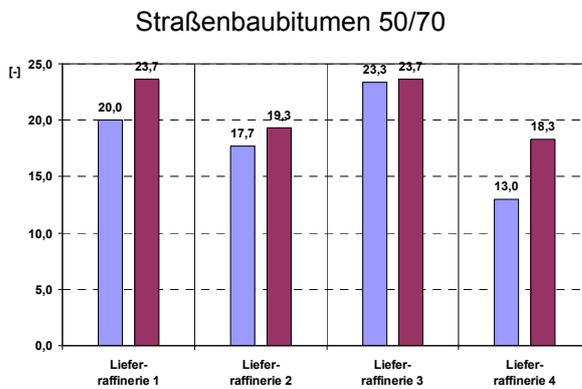
In Bild 23 sind die Untersuchungsergebnisse des Schnelltests und die je Bitumenprobe ermittelten Werte für Expansionsrate und Halbwertszeit für die Sorten 50/70 und 70/100 wiedergegeben.

Stellt man je Lieferraffinerie und Sorte das Untersuchungsergebnis Expansionsrate und Halbwertszeit der im Schnelltest ermittelten Kenngröße gegenüber, so zeigt sich, dass die Ergebnisse des Schnelltests sich nicht für eine Einteilung der Bindemittelsorten nach den o. g. Gruppen eignen. Es kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Ergebnis des Schnelltests und der bei der Schaumbitumenherstellung ermittelten Expansionsrate bzw. der Halbwertszeit abgeleitet werden. Somit eignet sich ein Prüfverfahren in Anlehnung an den Schaumtest der Firma STRABAG nicht zur Eingruppierung der Bindemittelsorten.

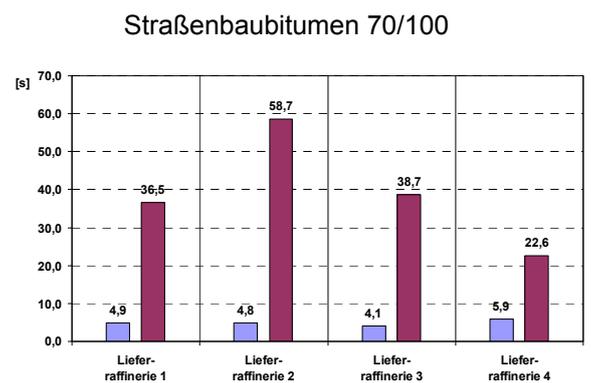
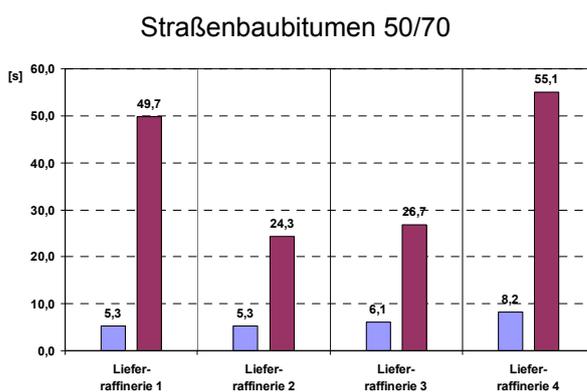
a) Schnelltest



b) Expansionsrate



c) Halbwertszeit



Legende:

■ Ohne Additiv geschäumtes Bitumen

■ Mit Additiv geschäumtes Bitumen

Bild 23: Schnelltest – Bitumensorten 50/70 und 70/100

Expansionsrate und Halbwertszeit

Zunächst werden die bei der Schaumbitumenherstellung ermittelten Werte der Expansionsrate E_x und die Halbwertszeit $T_{1/2}$ der untersuchten Bindemittelsorten gegenübergestellt. In Bild 24 sind je Bindemittelsorte und Lieferraffinerie die Expansionsrate und die Halbwertszeit des ohne und mit Additiv geschäumten Bitumens dargestellt.

Die Expansionsrate des ohne Additiv geschäumten Bindemittels liegt bei der Bindemittelsorte 50/70 zwischen 13,0 und 23,3 und bei der Sorte 70/100 zwischen 15,7 und 23,3. Durch die Zugabe des Additivs erhöhte sich bei 7 von 8 Bitumensorten (87,5 %) die Expansionsrate geringfügig. Die Expansionsrate liegt bei der Sorte 50/70 zwischen 18,3 und 23,7 und bei der Sorte 70/100 zwischen 16,0 und 24,7.

Die Halbwertszeit liegt beim Aufschäumprozess ohne Additivzugabe bei der Sorte 50/70 zwischen 5,3 und 8,2 Sekunden und bei der Sorte 70/100 zwischen 4,1 und 5,9 Sekunden. Bei der Gegenüberstellung der Halbwertszeit der Sorten 50/70 und 70/100 je Lieferraffinerie kann festgestellt werden, dass bei den vier Lieferraffinerien (siehe Ziffer 4) die Halbwertszeit der Sorte 50/70 länger ist als die der Sorte 70/100. Durch die Additivzugabe konnte die Halbwertszeit deutlich verlängert werden. Bei der Sorte 50/70 liegt diese zwischen 24,3 und 55,1 und bei der Sorte 70/100 zwischen 22,6 und 58,7 Sekunden.

Die Einzelergebnisse der Expansionsrate und Halbwertszeit sind in Anhang 3 zusammengefasst

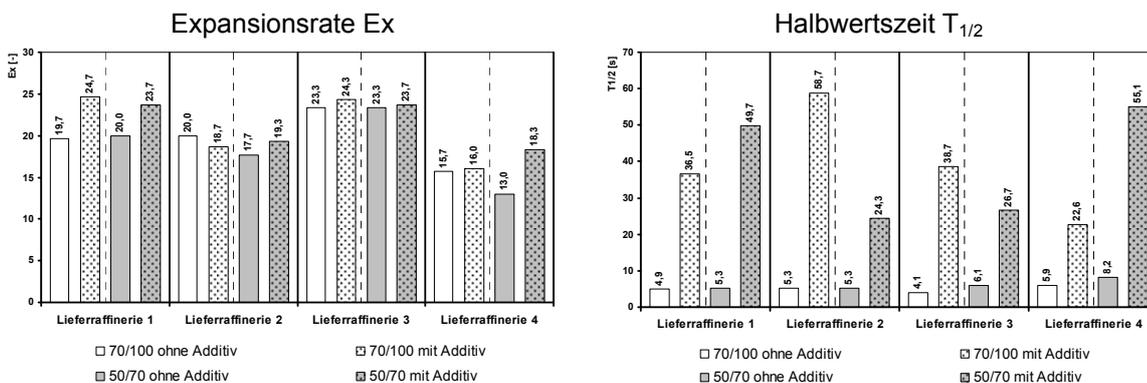


Bild 24: Expansionsrate E_x und Halbwertszeit $T_{1/2}$

Nadelpenetration

Um mögliche Unterschiede zwischen nicht geschäumten und mit/ohne Additiv geschäumten Bitumen aufzuzeigen, werden zunächst die Prüfergebnisse der Nadelpenetration des nicht aufgeschäumten Bitumens einerseits und des mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens („2 Stunden nach Aufschäumzeitpunkt“) andererseits gegenübergestellt. In Bild 25 sind die Prüfergebnisse der Sorte 50/70 und in Bild 26 die Prüfergebnisse der Sorte 70/100 dargestellt.

Der Wert der Nadelpenetration des nicht aufgeschäumten Bitumens der Sorte 50/70 und der Sorte 70/100 unterschreitet je zweimal den in *DIN EN 12597* festgelegten unteren Grenzwert (untere rote Linie). Durch den Aufschäumprozess mit bzw. ohne Additiv kann bei beiden Sorten (50/70 und 70/100) eine geringfügige Erweichung (geringere Härte) des Bitumens (Tendenz, s. u.) festgestellt werden. Die Erweichung des Bindemittels durch den Aufschäumprozess ist jedoch so gering, dass der obere Grenzwert (obere rote Linie) in keinem Fall überschritten wird.

Außerdem wird, wie unter Ziffer 4 beschrieben, je Probe die Differenz zwischen dem Prüfergebnis der Nadelpenetration des nicht aufgeschäumten und dem Prüfergebnis des mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens berechnet. Die Ergebnisse „2 Stunden“, „24 Stunden“ und „7 Tage“ nach dem Aufschäumzeitpunkt für die Sorte 50/70 sind in Bild 27 und für die Sorte 70/100 in Bild 28 als Diagramm dargestellt. Bezüglich der Differenz der Prüfergebnisse (2 Stunden, ohne Additiv) über- bzw. unterschreiten bei der Sorte 50/70 und bei der Sorte 70/100 jeweils 2 von 4 Proben die gem. *DIN EN 1426* festgelegte Wiederholpräzision (grüne Linien) bzw. Vergleichspräzision (blaue Linien). Eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss des Aufschäumens auf die Prüfergebnisse der Nadelpenetration ist somit nicht möglich. Da aber die Prüfgröße bei allen untersuchten aufgeschäumten Proben im Vergleich zu den nicht aufgeschäumten Proben größer ist, kann man davon ausgehen, dass tendenziell durch den Aufschäumprozess die Bitumenhärte geringfügig reduziert wird.

Außerdem sollte mit der Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“ die Anzahl der Bindemittelsorten für die Untersuchungsteile 2 und 3 eingeschränkt werden (s. o.). Zur Herstellung des Mischguts der Untersuchungsteile 2 und 3 sollten die Sorte 50/70 der Lieferraffinerie 2 und die

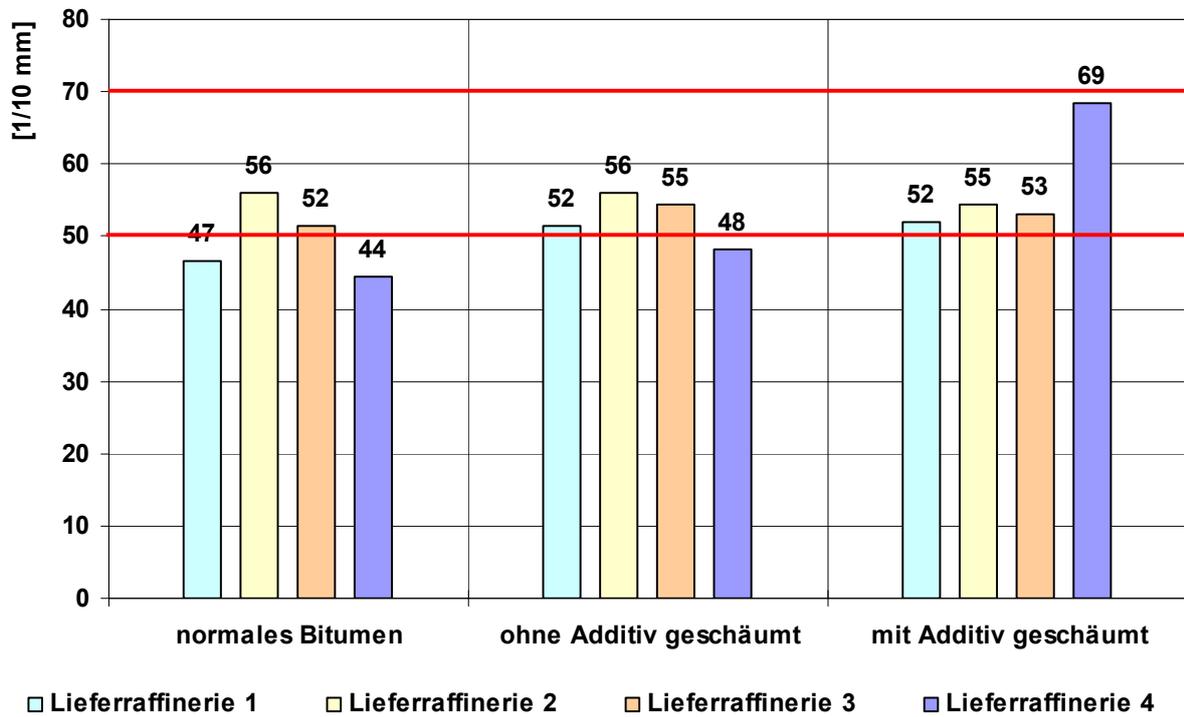


Bild 25: Nadelpenetration der Sorte 50/70; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“

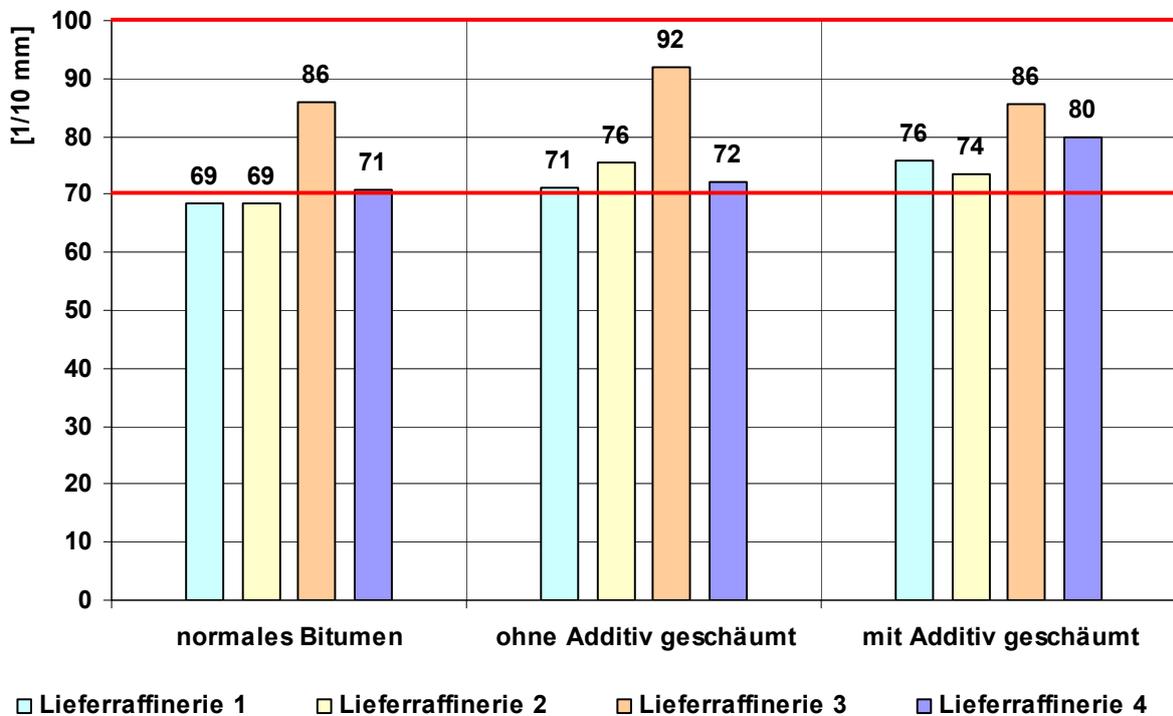


Bild 26: Nadelpenetration der Sorte 70/100; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“

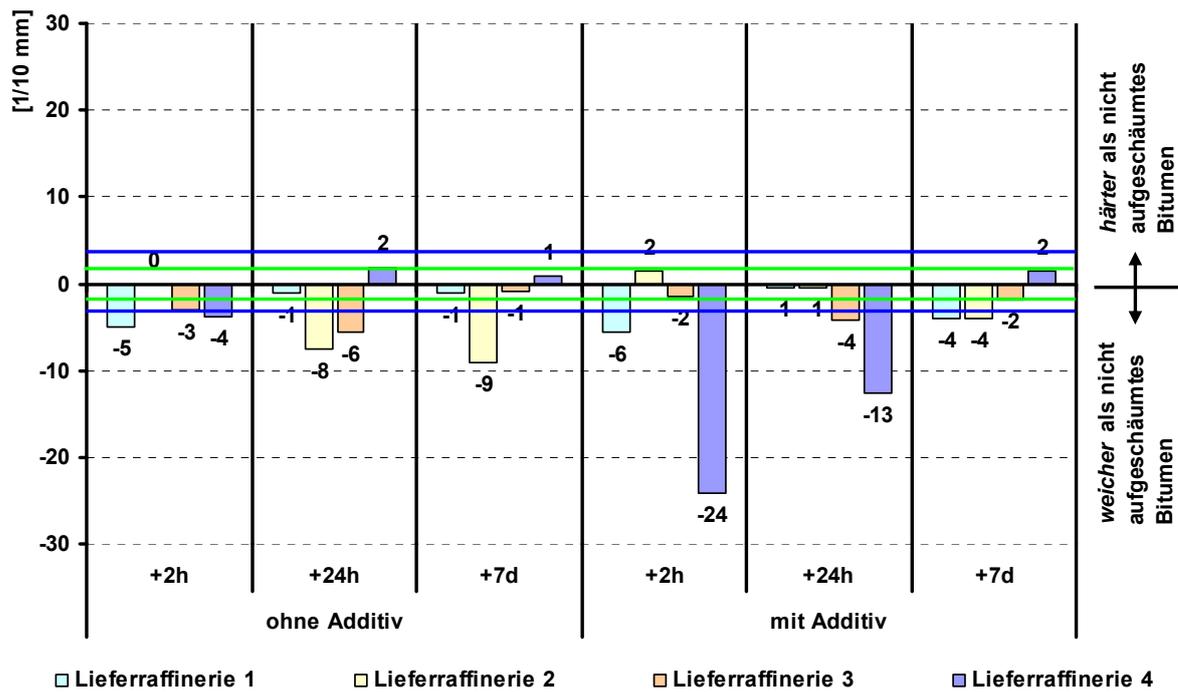


Bild 27: Nadelpenetration der Bitumensorte 50/70: Differenz „nicht geschäumt minus mit/ohne Additiv geschäumt“

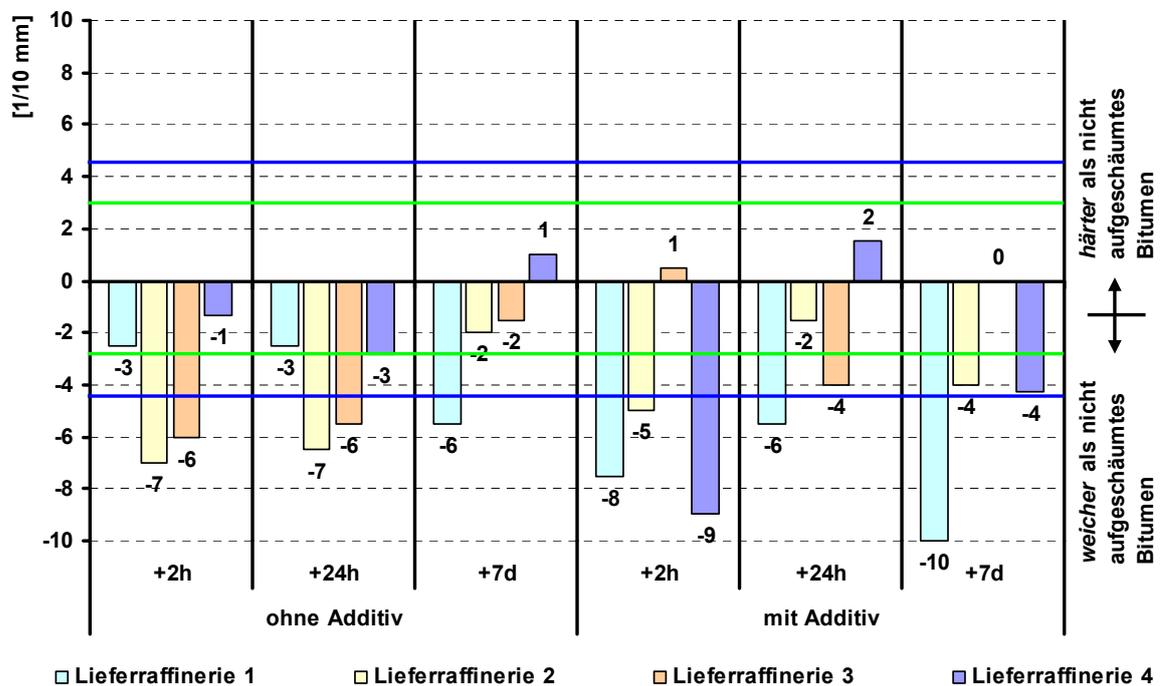


Bild 28: Nadelpenetration der Bitumensorte 70/100: Differenz „nicht geschäumt minus mit/ohne Additiv geschäumt“

Sorte 70/100 der Lieferraffinerie 4 verwendet werden, da diese die kleinsten Abweichungen zwischen nicht aufgeschäumten Bitumen und *ohne* Additiv aufgeschäumten Bitumen aufweisen.

Die Einzelergebnisse der Bindemitteluntersuchung Nadelpenetration sind in Anhang 4 zusammengefasst.

Erweichungspunkt „Ring und Kugel“

Analog zur Untersuchung „Nadelpenetration“ wurde auch der Erweichungspunkt Ring und Kugel an nicht aufgeschäumten und mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumen ermittelt. Die Prüfergebnisse der Sorten 50/70 sind in Bild 29 und die Prüfergebnisse der Sorte 70/100 in Bild 30 wiedergegeben. Zusätzlich ist der in *DIN EN 1427* (deutsche Einschränkung) festgelegte obere und untere Grenzwert (rote Linien) eingezeichnet. Bei der Gegenüberstellung zeigt sich, dass die Grenzen weder über- noch unterschritten werden. Weiterhin wurde, analog zur Untersuchung der Prüfergebnisse der Nadelpenetration, die Differenz zwischen den Prüfergebnissen des nicht aufgeschäumten und des mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens berechnet. Die Prüfergebnisse der untersuchten Proben der Sorte 50/70 sind in Bild 31 und die der untersuchten Proben der Sorte 70/100 in Bild 32 als Diagramm dargestellt. Zusätzlich wurden die Vergleichspräzision als blaue Linie und die Wiederholpräzision als grüne Linie eingetragen. Man kann erkennen, dass die Grenze Wiederholpräzision bei den Differenzen „2 Stunden nach Aufschäumzeitpunkt“ bei den Proben der Sorte 50/70 immer eingehalten und bei den Proben der Sorte 70/100 einmal überschritten werden. Die Grenzen der Wiederholpräzision werden weder über- noch unterschritten. Mit anderen Worten, im Rahmen der Aussagemöglichkeiten der Standarduntersuchung Erweichungspunkt Ring und Kugel ergibt sich, dass durch den Aufschäumprozess keine signifikanten Veränderungen am Bitumen hervorgerufen werden. Da jedoch alle Abweichungen positiv sind, bestätigt sich die schon bei den Vergleichsergebnissen der Nadelpenetration ermittelten Tendenz, dass das aufgeschäumte Bitumen im Vergleich zum nicht aufgeschäumten Bitumen geringfügig weicher ist.

Außerdem dient die Untersuchung zur Einschränkung der Bindemittelsorten für den nächsten Untersuchungsteil. Zur Herstellung des Mischguts der Untersuchungsteile 2 und 3 sollten aufgrund der Prüfergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel für die Sorten 50/70 und 70/100 die Bitumen der Lieferraffinerie 2 verwendet werden, da diese jeweils die geringste Abweichung zwischen nicht aufgeschäumtem und ohne Additiv aufgeschäumtem Bitumen aufweisen.

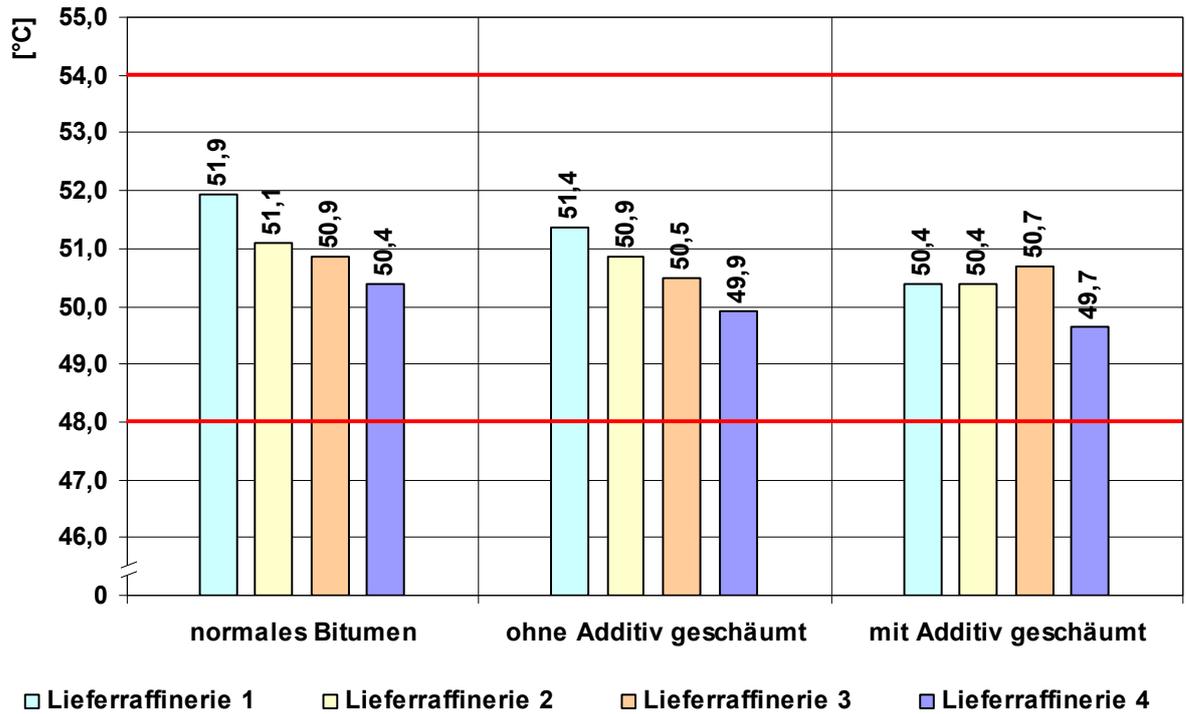


Bild 29: Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 50/70; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“

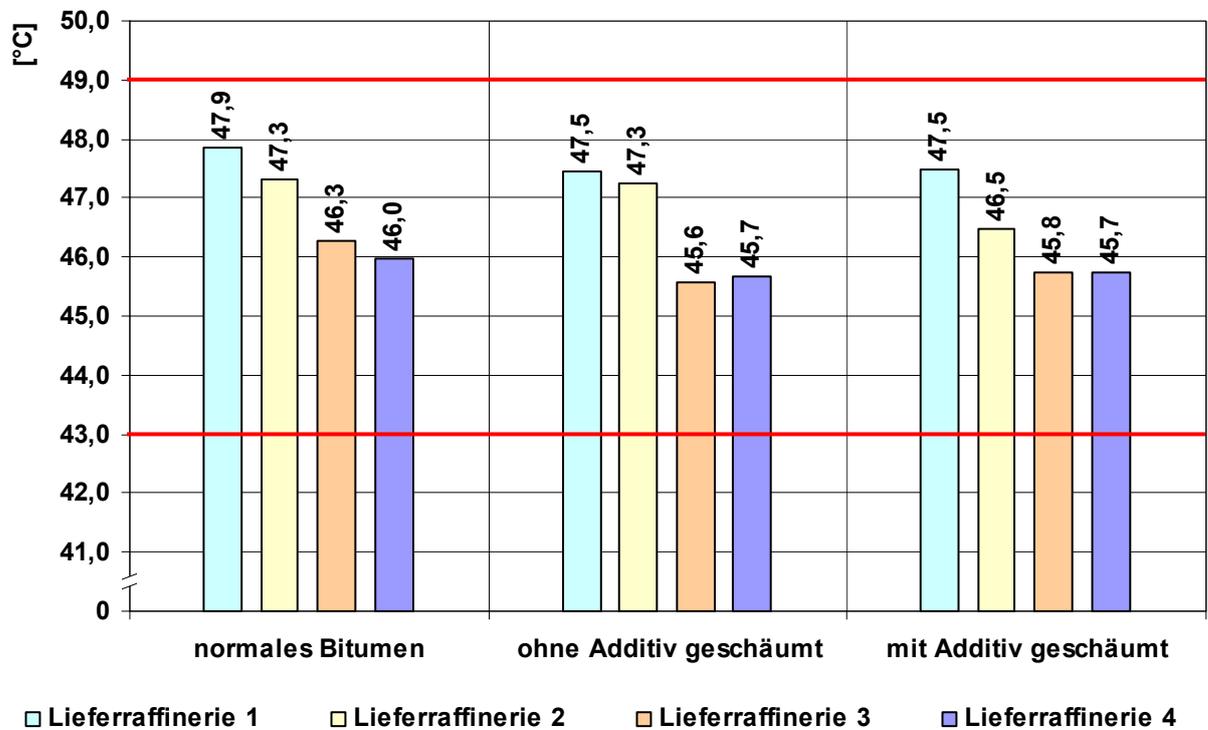


Bild 30: Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 70/100; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“

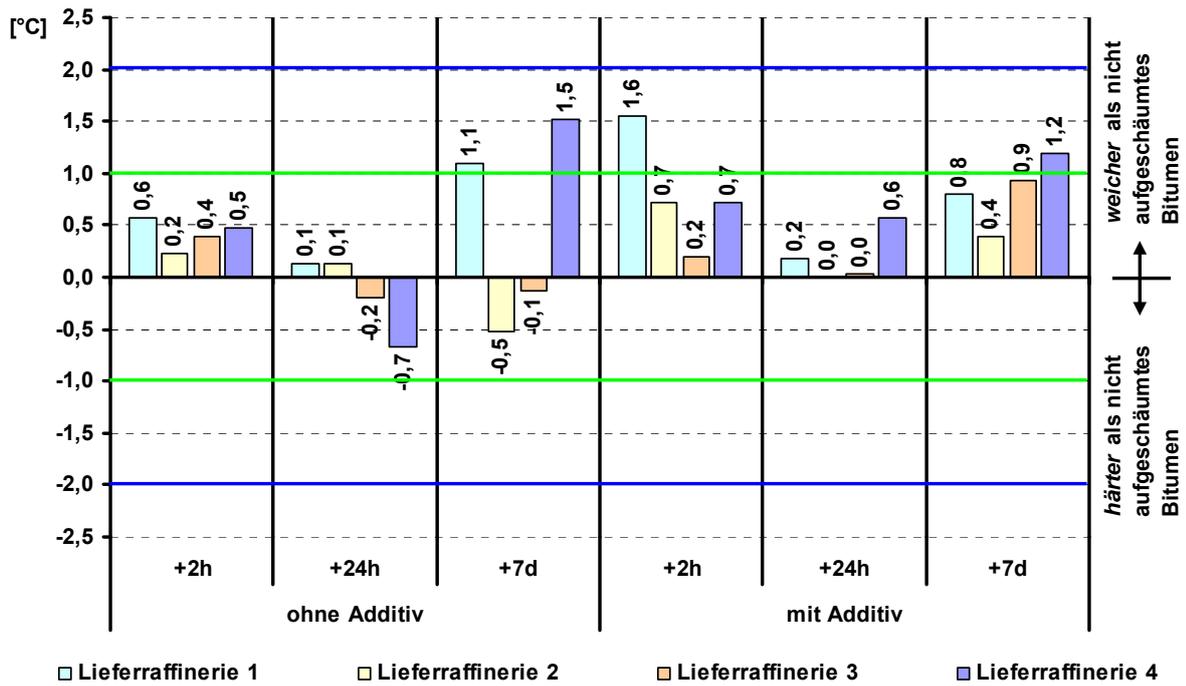


Bild 31: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 50/70

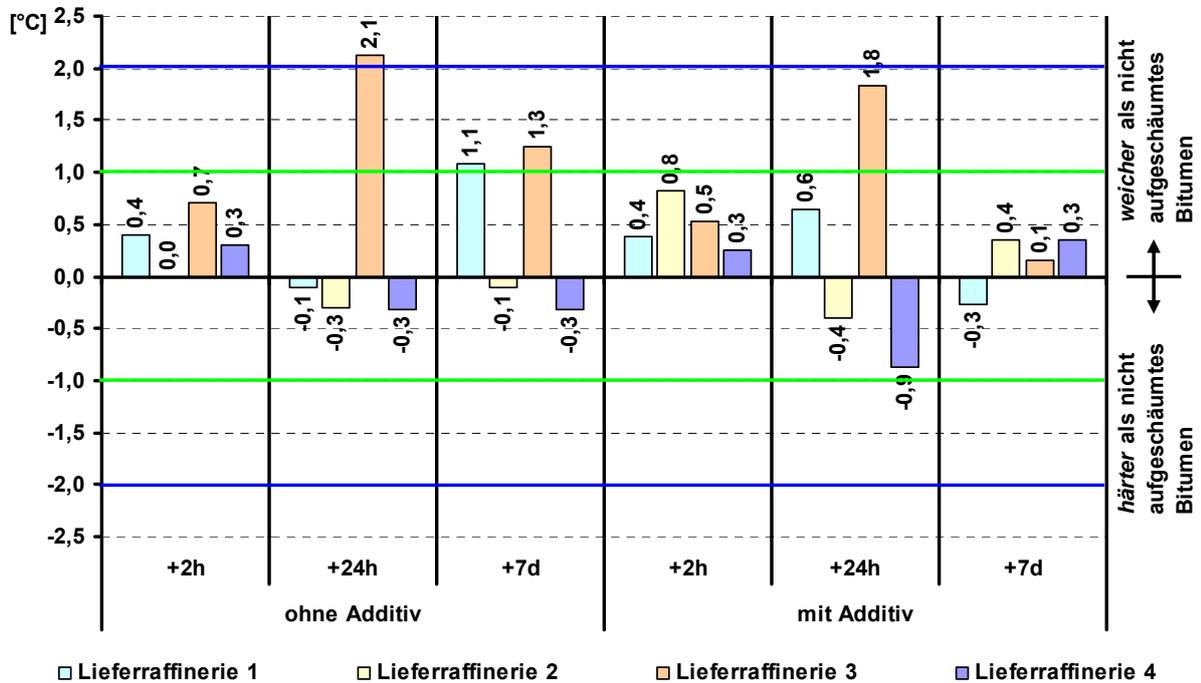


Bild 32: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 70/100

Die einzelnen Prüfergebnisse der Untersuchung Erweichungspunkt Ring und Kugel werden in Anhang 5 wiedergegeben.

Dynamische Viskosität

Zusätzlich zu den Standarduntersuchungen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel wurde je Probe die dynamische Viskosität ermittelt. Die Ergebnisse der untersuchten Proben der Sorte 50/70 sind in Bild 33, die Ergebnisse der untersuchten Proben der Sorte 70/100 in Bild 34 zusammengefasst. Die dynamische Viskosität der nicht aufgeschäumten Proben der Sorte 50/70 liegt im Bereich von 13,9 Pa·s bis 17,95 Pa·s und die der Sorte 70/100 zwischen 8,20 Pa·s und 11,15 Pa·s. Die dynamische Viskosität der mit/ohne Additiv aufgeschäumten Proben liegt bei der Sorte 50/70 im Bereich von 12,34 Pa·s bis 15,86 Pa·s und bei der Sorte 70/100 im Bereich von 7,56 Pa·s bis 10,25 Pa·s.

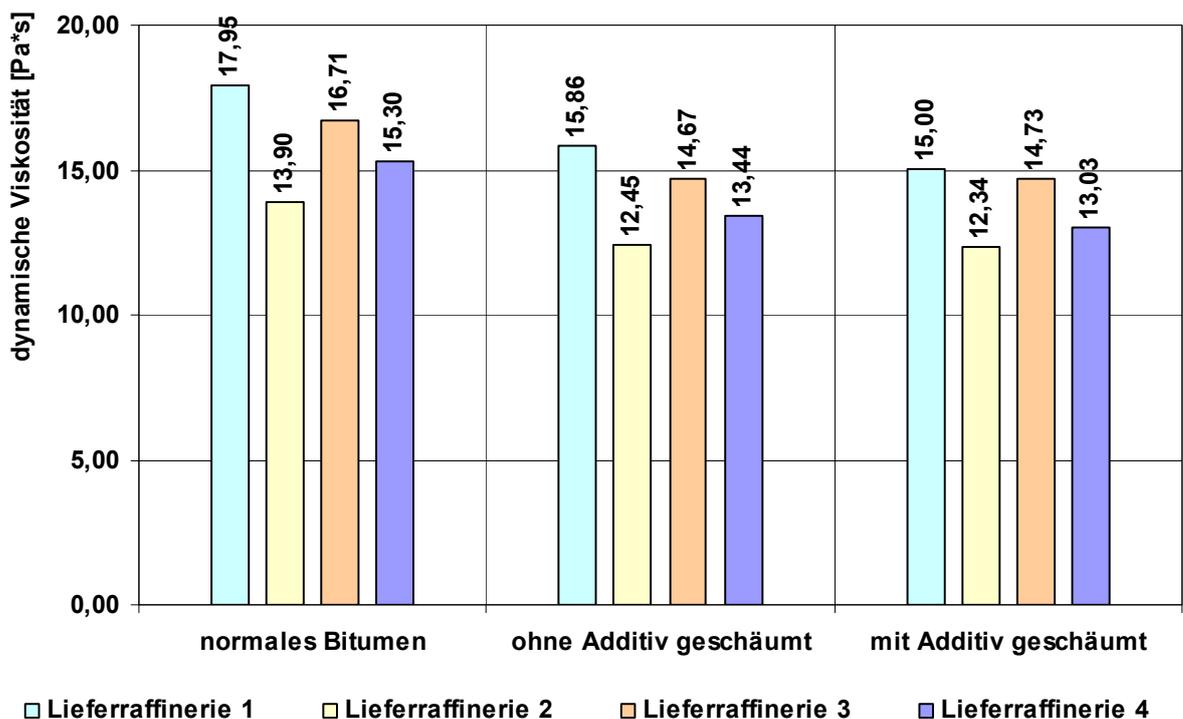


Bild 33: Dynamische Viskosität der Sorte 50/70; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“

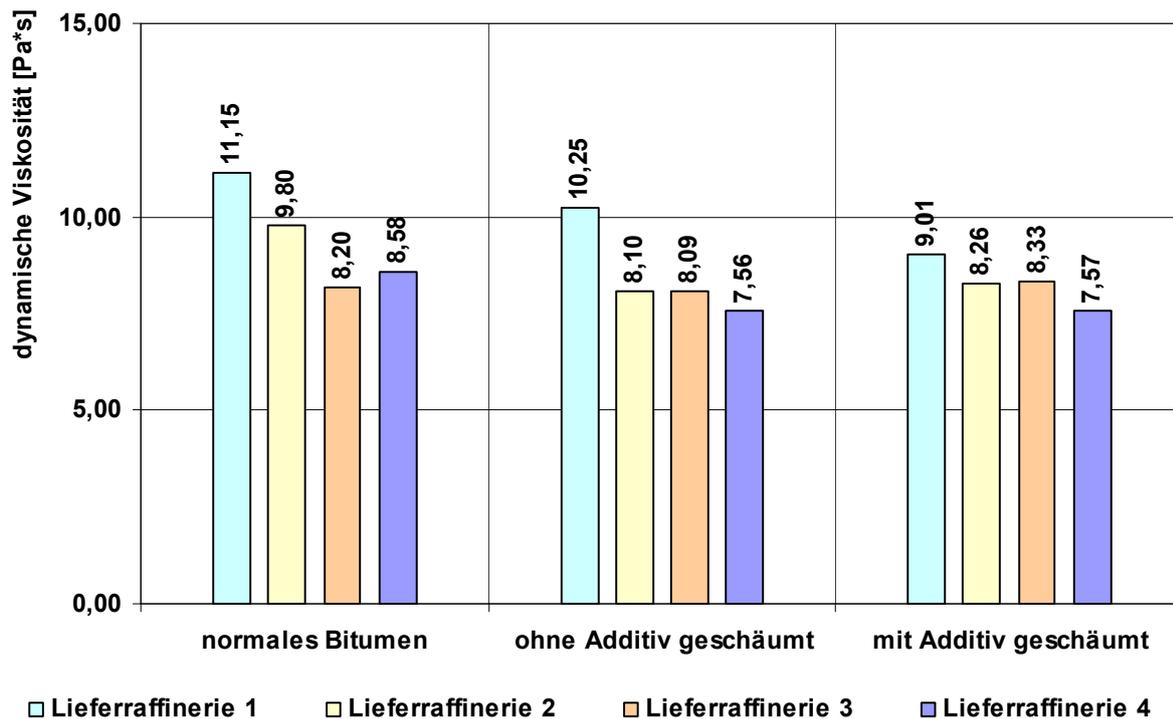


Bild 34: Dynamische Viskosität der Sorte 70/100; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“

Analog der Auswertung Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel wird außerdem je Probe die Differenz zwischen dem Prüfergebnis der dynamischen Viskosität des nicht aufgeschäumten und dem Prüfergebnis des mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens berechnet. Die Ergebnisse „2 Stunden“, „24 Stunden“ und „7 Tage“ nach dem Aufschäumzeitpunkt“ der Sorte 50/70 sind in Bild 35 und der Sorte 70/100 in Bild 36 als Diagramm dargestellt.

Die Einzelergebnisse der Untersuchung dynamische Viskosität sind in Anhang 6 zusammengefasst.

Im nächsten Schritt wird je Sorte und Lieferraffinerie das Prüfergebnis des nicht aufgeschäumten und mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens gegenübergestellt. Man erkennt, dass die Prüfgrößen des mit/ohne Additiv aufgeschäumten Bitumens kleiner sind als die des nicht aufgeschäumten Bitumens.

Eine Bewertung der Aussagekraft der Prüfergebnisse mit Hilfe der Vergleichs- und Wiederholpräzision ist, da diese für dieses Verfahren noch nicht vorliegen, nicht möglich. Die Gegenüberstellung der Prüfergebnisse zeigt jedoch, dass grundsätzlich

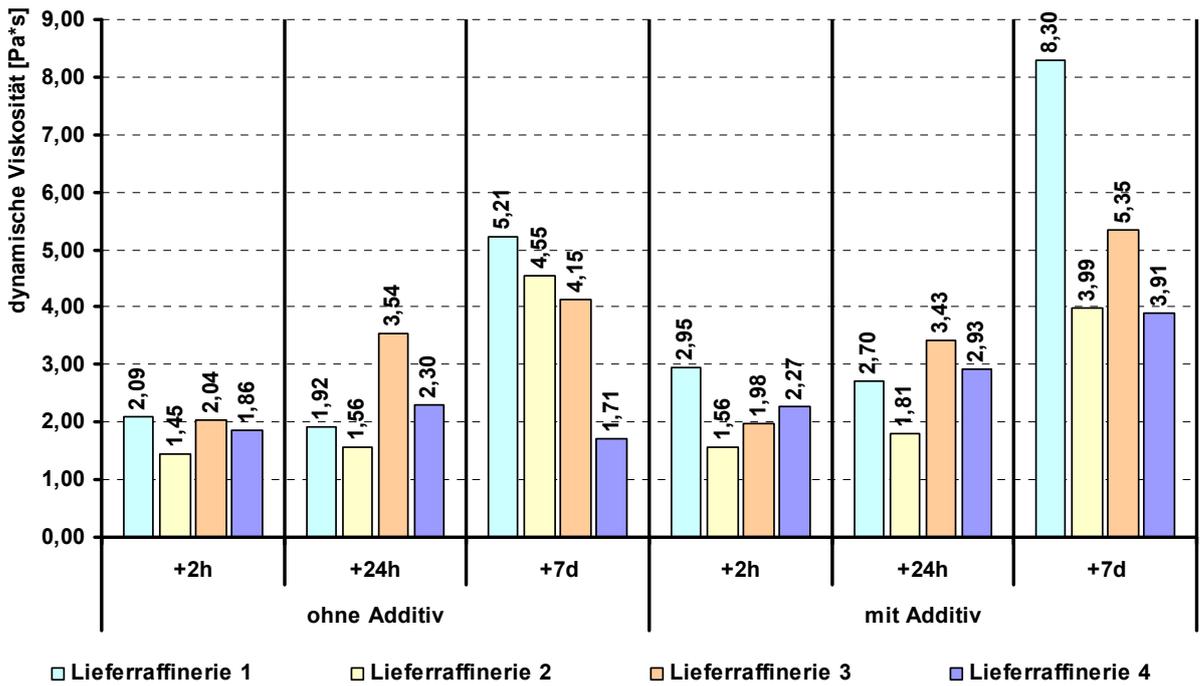


Bild 35: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv dynamische Viskosität der Sorte 50/70

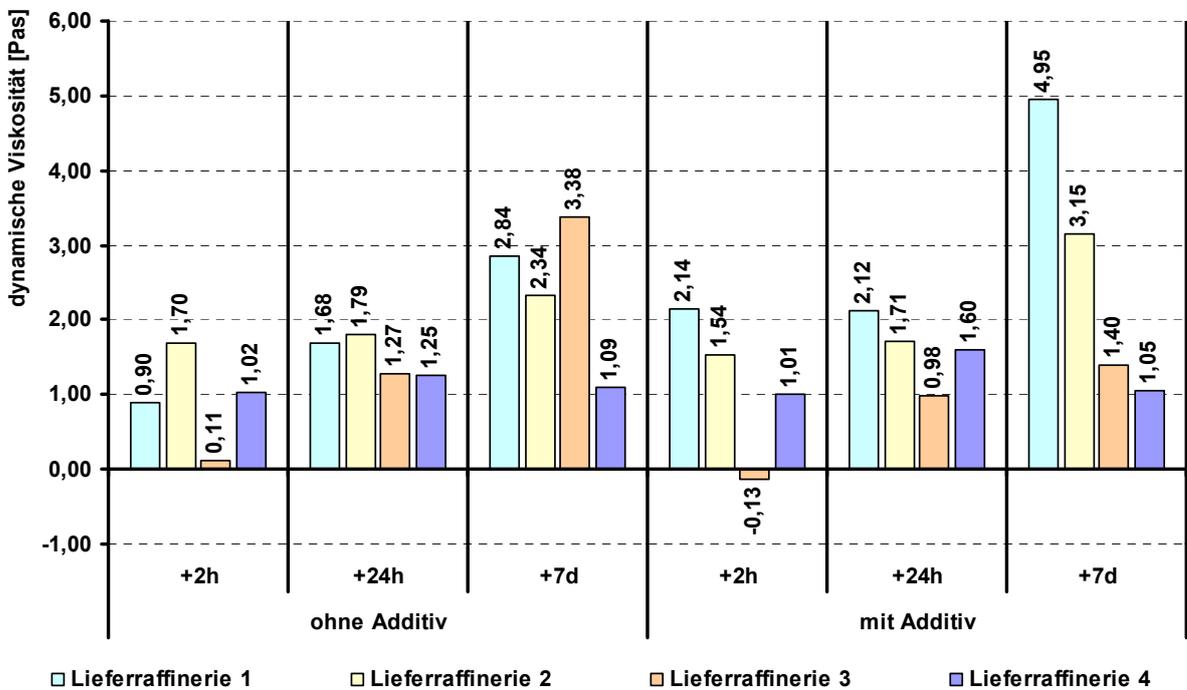


Bild 36: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv dynamische Viskosität der Sorte 70/100

davon ausgegangen werden kann, dass durch den Aufschäumprozess die Viskosität vermindert wird.

Wie die Standarduntersuchungen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel dient die Untersuchung mit dem Dynamischen Scherrheometer zur Einschränkung der Bindemittelsorten für die nächsten Untersuchungsteile. Zur Herstellung des Mischguts für den Untersuchungsteil 2 und 3 sollten aufgrund der Prüfergebnisse der Untersuchung der dynamischen Viskosität für die Sorte 50/70 das Bitumen der Lieferraffinerie 2 und für die Sorte 70/100 das Bitumen der Lieferraffinerie 3 verwendet werden, da diese die geringste Abweichung zwischen nicht aufgeschäumt und ohne Additiv aufgeschäumt aufweisen.

Für die weiterführenden Untersuchungen (Teil 2 und Teil 3) werden die Bitumensorten 50/70 und 70/100 der Lieferraffinerie 2 verwendet, da unter Berücksichtigung aller Einzelergebnisse in den meisten Untersuchungen die geringsten Abweichungen zwischen normalem Bitumen und *ohne* Additiv geschäumtem Bitumen auftreten.

7.2 Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor

7.2.1 Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts

Wie unter Ziffer 4 beschrieben soll im Schritt 1 des Untersuchungsteils 2 die minimal mögliche Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts ermittelt werden. Mit anderen Worten: Es sind die optimalen Herstellungsbedingungen für Schaumbitumenasphalt zu ermitteln, die einerseits möglichst geringe Abweichungen zum Vergleichsfall „mit nicht aufgeschäumtem Bitumen“, andererseits eine maximal mögliche Reduzierung der Misch- und Verdichtungstemperatur ergeben. Hierzu werden bei der Herstellung der Probekörper aus Schaumbitumenasphalt die Misch- und Verdichtungstemperaturen variiert (im Weiteren als „Variation“ bezeichnet) und für die Herstellung der Probekörper aus Referenzasphalt die Mischtemperatur auf 160 °C und die Verdichtungstemperatur auf 140 °C festgelegt (siehe Tabelle 15). Beim Referenzasphalt wird zusätzlich zum Straßenbaubitumen 70/100 das Straßenbaubitumen 50/70 untersucht, damit die Ergebnisse des Schaumbitumenasphalts besser beurteilt werden können.

Im Weiteren werden die Ergebnisse der Prüfgrößen Verdichtbarkeit, Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper und Hohlraumgehalt an Probeplatten wiedergegeben. Die Einzelergebnisse der Prüfgröße Verdichtbarkeit, Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper und Hohlraumgehalt an Probeplatten sind in den Anhängen 7, 8 und 9 zusammengestellt.

Tabelle 15: Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts

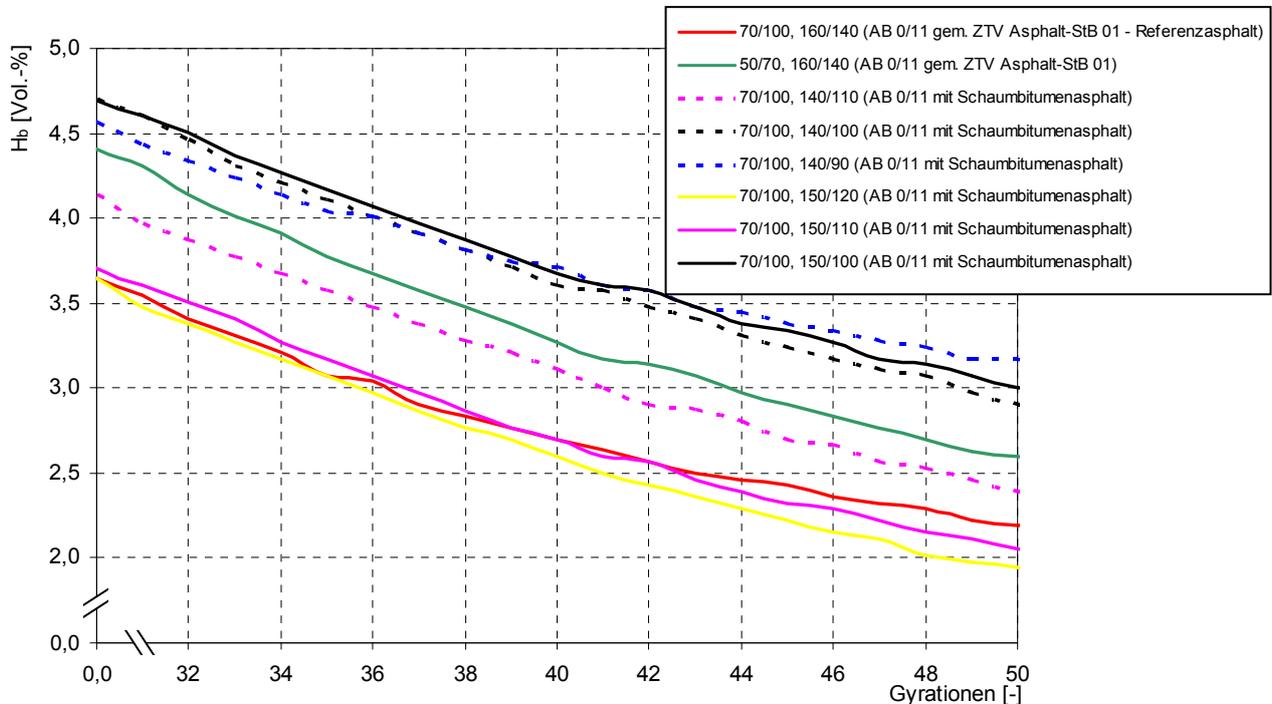
Untersuchungsteil 1 – Schritt 1			
Referenzasphalt gem. ZTV Asphalt-StB 01 (Misch-/Verdichtungstemperatur: 160 °C /140 °C)	Straßenbaubitumen 50/70		<i>Prüfgröße:</i> - Verdichtbarkeit mit dem Gyrator-Verdichter - Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper - Hohlraumgehalt an Probeplatten
	Straßenbaubitumen 70/100		
Fälle mit Schaumbitumen (Straßenbau- bitumen 70/100)	Mischtemperatur 140 °C	Verdichtungstemperatur 90 °C	
		Verdichtungstemperatur 100 °C	
		Verdichtungstemperatur 110 °C	
	Mischtemperatur 150 °C	Verdichtungstemperatur 100 °C	
		Verdichtungstemperatur 110 °C	
		Verdichtungstemperatur 120 °C	

Untersuchungsmaterial ist Asphaltbeton AB 0/11 für die Bauklasse IV, der mit dem in Untersuchungsteil 1 – Bindemitteluntersuchung – ermittelten optimalen Bindemittel im Labor hergestellt wurde.

Verdichtbarkeit

Im Bild 37 sind die Verdichtungskurven je Variation und die des Referenzasphalts mit Straßenbaubitumen 70/100 bzw. 50/70 dargestellt. Die gestrichelten Linien entsprechen den Verdichtungskurven des Schaumbitumenasphalts, der mit einer Mischtemperatur von 140 °C und einer Verdichtungstemperatur von 110 °C (rot gestrichelte Linien), 100 °C (schwarz gestrichelte Linien) und 90 °C (blau gestrichelte Linien) hergestellt wurde. Die gelbe, rosa und schwarze Verdichtungskurve entspricht dem mit Schaumbitumen hergestellten Mischgut, das mit einer Mischtemperatur von 150 °C und einer Verdichtungstemperatur von 120 °C, 110 °C und 100 °C hergestellt wurde.

Die grüne bzw. rote, durchgezogene Linie, entspricht dem Referenzasphalt der mit dem Straßenbaubitumen 50/70 bzw. 70/100 bei 160 °C gemischt und bei 140 °C verdichtet wurde.



Legende: Bitumensorte, Mischtemperatur/Verdichtungstemperatur; z. B. 70/100, 160/140

Bild 37: Verdichtungskurven – Gyrator-Verdichter

Damit die Verarbeitbarkeit des Schaumbitumenasphalts in etwa der des Referenzasphalts entspricht und beim Verdichten des Schaumbitumenasphalts kein höherer Energieaufwand als beim Referenzasphalt mit Straßenbaubitumen 50/70 notwendig wird, darf die Verdichtbarkeit des Schaumbitumenasphalts nicht schlechter sein als die des Referenzasphalts mit dem Straßenbaubitumen 50/70. Als optimale Misch- und Verdichtungstemperatur für Schaumbitumenasphalt sind somit die Verdichtungskurven anzusehen, die zwischen der roten und der grünen Verdichtungskurve liegen. Stellt man die Verdichtungskurven des Schaumbitumenasphalts denen des Referenzasphalts gegenüber, so können die Variationen 140/90, 140/100 und 150/100 (Misch-/Verdichtungstemperatur) aufgrund der schlechten Verdichtbarkeit als nicht geeignet eingestuft werden. Das heißt, dass die Verdichtungskurven des Schaumbitumenasphalts mit einer Mischtemperatur von 140°C und 150°C und einer Verdichtungstemperatur von 110°C und 120°C in etwa den Verdichtungskurven des Referenzasphalts entsprechen. Somit beträgt aufgrund dieser Untersuchung für den

Schaumbitumenasphalt die minimale Mischtemperatur 140 °C und die minimale Verdichtungstemperatur 110 °C.

Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper

Eine weitere Prüfgröße in diesem Untersuchungsteil war der Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper mit dem die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Untersuchung der Verdichtbarkeit bestätigt oder weiter präzisiert werden können.

Hierzu ist in Bild 38 der Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper (siehe Ziffer 6.2.3) je Variation und in Abhängigkeit von der Bindemittelsorte (50/70, 70/100, 70/100 geschäumt) sowie der Misch- und Verdichtungstemperatur wiedergegeben. Zusätzlich ist der Hohlraumgehalt der Eignungsprüfung (siehe Anhang 2) angegeben.

Der Hohlraumgehalt der Mischgutsorte AB 0/11 für die Bauklasse IV muss gem. *ZTV Asphalt-StB 01* im Bereich zwischen 2,0 Vol.-% und 4,0 Vol.-% liegen (siehe rot hinterlegter Bereich). Stellt man die je Variation ermittelten Prüfergebnisse dem geforderten Hohlraumgehalt gegenüber, so können die Verdichtungstemperaturen 90 °C und 100 °C ausgeschlossen werden, da bei beiden Verdichtungstemperaturen der maximal zulässige Hohlraumgehalt von 4 Vol.-% überschritten wird. Das heißt, unabhängig von der Mischtemperatur beträgt die minimal mögliche Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts 110 °C, da bei dieser Verdichtungstemperatur die zulässige Obergrenze des Hohlraumgehalts „noch“ nicht überschritten wird. Inwieweit sich die bei der Herstellung der Marshall-Probekörper anzuwendende Schlagverdichtung für Schaumbitumenasphalt eignet und inwieweit dadurch die Prüfergebnisse beeinflusst werden, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung und sollte in einem weiteren Forschungsvorhaben untersucht werden.

Hohlraumgehalt an Probepplatten

Mit der Prüfung des Hohlraumgehalts an Probepplatten soll untersucht werden, ob der Schaumbitumenasphalt wie der Referenzasphalt durch Walzen verdichtet werden kann oder ob beim Einbau und Verdichten des Schaumbitumenasphalts evtl. besondere Maßnahmen, z. B eine größere Anzahl an Walzübergängen, notwendig sind und somit beim großtechnischen Einbau des Schaumbitumenasphalts zu berücksichtigen wären. Die in der Praxis übliche Walzverdichtung wird im Labor durch einen Walzsektorverdichter nachgestellt.

Der Hohlraumgehalt an Probepplatten, die mit einem Walzsektorverdichter bei verschiedenen Misch- und Verdichtungstemperaturen hergestellt wurden, ist in Bild 39 als Histogramm dargestellt. Eine Abhängigkeit des Hohlraumgehalts von der

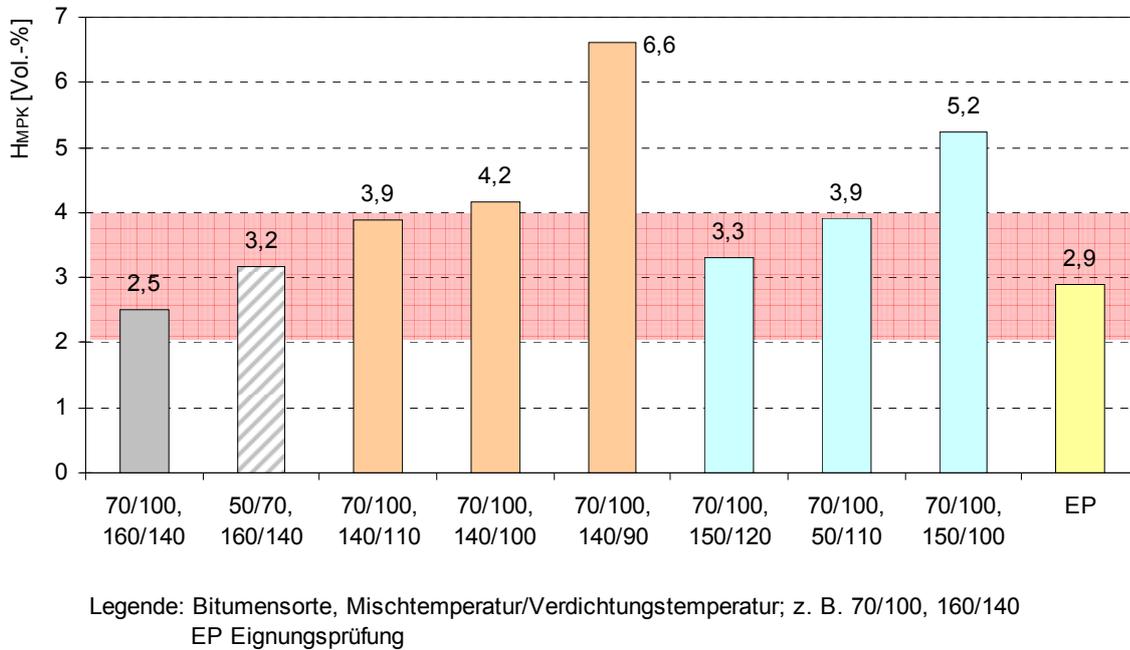


Bild 38: Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper H_{MPK}

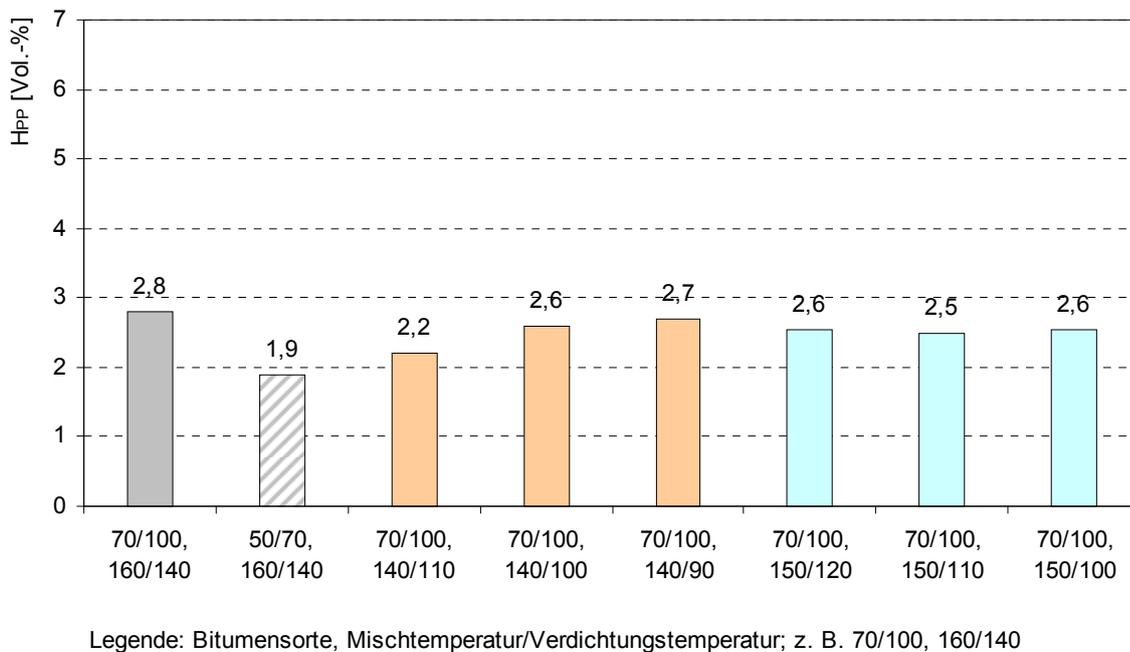


Bild 39: Hohlraumgehalt an Probepplatten H_{PP}

Misch- und Verdichtungstemperatur ist nicht festzustellen. Unabhängig von der Misch- und Verdichtungstemperatur liegt der Hohlraumgehalt der Variationen zwischen 2,2 Vol.-% und 2,7 Vol.-%. Eine Einschränkung der Verdichtungstemperatur wie bei den Untersuchungen Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper und Verdichtbarkeit ist somit nicht möglich. Es zeigt sich jedoch, dass die bei der Untersuchung Verdichtbarkeit und Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper ermittelten minimal möglichen Misch- und Verdichtungstemperaturen bei der Verdichtung mit dem Walzsektorverdichter evtl. weiter reduziert werden könnten. Beim großtechnischen Einbau und Verdichten des Schaumbitumenasphalts müssen somit keine besonderen Maßnahmen getroffen werden.

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse der o. g. Prüfverfahren Verdichtbarkeit, Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper und Hohlraumgehalt an Probepplatten macht deutlich, dass zum einen eine Mischtemperatur zwischen 140 °C und 150 °C zur Herstellung des Schaumbitumenasphalts ausreicht und zum anderen Schaumbitumenasphalt bei einer minimalen Verdichtungstemperatur von 110 °C eingebaut werden kann; auch unter Praxisbedingungen wird der geforderte Verdichtungsgrad der eingebauten Schicht erreicht.

7.2.2 Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts

Wie unter Ziffer 4 beschrieben, werden, um eine sichere Prognose über die Gebrauchseigenschaften des Schaumbitumenasphalts machen zu können, alle standardmäßigen und unter den gegebenen Untersuchungsbedingungen praktikablen Prüfverfahren für Walzasphalt-Heißmischgut durchgeführt. Das Versuchsprogramm und die Prüfverfahren des Schritts 2, wie Marshall-Prüfung, einaxialer Druckschwellversuch, Spurbildungsversuch, indirekte Zugprüfung und Prüfung der Wasserempfindlichkeit, sind in Tabelle 16 wiedergegeben.

Wie unter Ziffer 4 erwähnt, zeigen erste Erfahrungen mit Schaumbitumen, dass die Probekörper-Lagerzeit (abgekürzt PZ) die Versuchsergebnisse beeinflusst. Hierzu wird, um mögliche Hinweise auf das Abklingverhalten des Aufschäumeffekts zu gewinnen, die Probekörper-Lagerzeit als zusätzliches Variationsmerkmal herangezogen: Die Probekörper des Schaumbitumenasphalts und des Referenzasphalts wer-

den nach ihrer Herstellung unterschiedlich lang bis zur Versuchsdurchführung gelagert. Die Probekörper-Lagerzeit 1 (PZ 1) entspricht – sofern in den Normen oder Regelwerken für die einzelnen Versuche angegeben – dem gemäß Norm oder Regelwerk festgelegten „Prüfalter“. Die Probekörper-Lagerzeit 2 (PZ 2) wurde mit 7 Tagen und die Probekörperlagerzeit 3 (PZ 3) mit 21 Tagen entsprechend höher angesetzt (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Versuchsprogramm zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts

Schritt 2		
Referenzasphalt gem. ZTV Asphalt-StB 01 (Mischtemperatur: 160 °C, Verdichtungstemperatur: 140 °C)	PZ 1 gem. Norm, Prüfvorschrift	<i>Prüfverfahren und -größen:</i> - Marshall-Prüfung + Marshall-Stabilität S_M + Marshall-Fließwert F_M - Spurbildungsversuch + Mittlere Spurbildungsrate WTS_{Luft} + Proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft} - Indirekte Zugprüfung + Indirekte Zugfestigkeit ITS
	PZ 2 7 d	
	PZ 3 21 d	
Schaumbitumenasphalt (Mischtemperatur: 150 °C, Verdichtungstemperatur: 110 °C)	PZ 1 gem. Norm, Prüfvorschrift	- Einaxialer Druckschwellversuch + Dehnung ϵ - Prüfung der Wasserempfindlichkeit + Wasserempfindlichkeit ITS
	PZ 2 7 d	
	PZ 3 21 d	

Legende:

PZ Probekörperlagerzeit (Zeitspanne zwischen Probekörperherstellung und Versuchsbeginn)
 d Tag

Um eine Aussage über die Gebrauchseigenschaften des Schaumbitumenasphalts machen zu können, werden je Prüfverfahren die Untersuchungsergebnisse des Schaumbitumenasphalts und des Referenzasphalts gegenübergestellt.

Der Schaumbitumenasphalt wird hierzu bei der in Schritt 1 ermittelten Mischtemperatur von 140 °C bis 150 °C und der minimal möglichen Verdichtungstemperatur von 110 °C und der Referenzasphalt bei den in den „Regelwerken“ (z. B. *ALP A-StB, Teil 11, DIN 1996, Teil 4* usw.) festgelegten Misch- und Verdichtungstemperaturen hergestellt.

Marshall-Prüfung

Stellt man die je Probekörperlagerzeit ermittelte Marshall-Stabilität S_M des Schaumbitumenasphalts der des Referenzasphalts gegenüber, so wird deutlich, dass unabhängig von der Probekörperlagerzeit die Marshall-Stabilität des Referenzasphalts höher ist als die des Schaumbitumenasphalts (siehe Bild 40). Die Marshall-Stabilität des Referenzasphalts liegt anfangs (PZ 1) bei 12,1 kN und steigt nach 21-tägiger Probekörperlagerzeit (PZ 3) auf 15,7 kN an. Im Gegensatz dazu liegt die Marshall-Stabilität des Schaumbitumenasphalts mit 8,1 kN (PZ 1) und 9,3 kN (PZ 3) deutlich unterhalb der des Referenzasphalts. Die Marshall-Stabilität des Schaumbitumenasphalts (nach PZ 1) unterschreitet jedoch die für dieses Mischgut in der Praxis üblichen Marshall-Stabilitäten, die im Bereich von 8 kN bis 15 kN liegen, nicht. Berücksichtigt man zusätzlich die Erkenntnis, dass die Gebrauchstauglichkeit des Mischguts allein durch die Marshall-Stabilität nicht beurteilt werden kann, ist davon auszugehen, dass der Schaumbitumenasphalt trotz seiner geringeren Marshall-Stabilität für die Praxis geeignet ist.

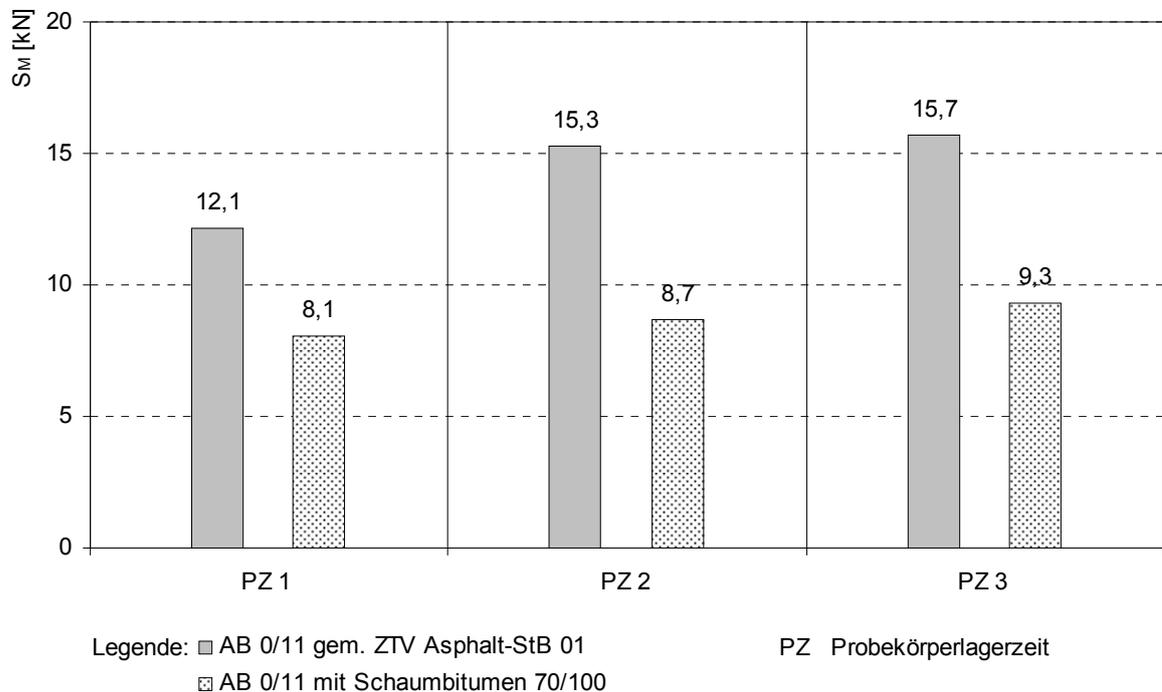


Bild 40: Marshall-Stabilität S_M

Ein weiterer bei der Marshall-Prüfung ermittelter Kennwert ist der Marshall-Fließwert (F_M). Die Untersuchungsergebnisse des Fließwerts sind in Bild 41 wiedergegeben.

Eine Abhängigkeit des Fließwerts von der Probekörperlagerzeit ist weder beim Referenzasphalt mit einem Fließwert von 5,6 mm noch beim Schaumbitumenasphalt mit einem Fließwert zwischen 4,8 mm und 5,2 mm nachweisbar. Stellt man die Marshall-Fließwerte des Referenzasphalts denen des Schaumbitumenasphalts gegenüber, so stellt man fest, dass die Werte des Schaumbitumenasphalts zwar im Mittel die des Referenzasphalts um ca. 6 mm unterschreiten, aber dennoch im praxisüblichen Wertebereich von 3 mm bis 7 mm liegen.

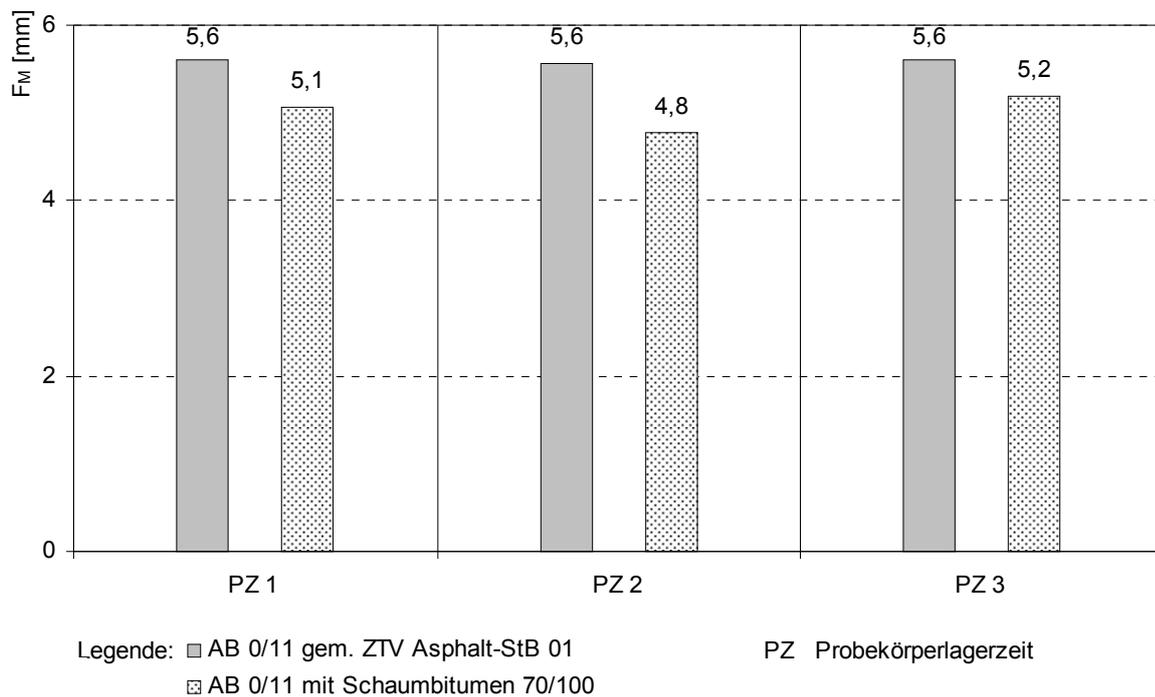


Bild 41: Marshall-Fließwert F_M

Die Einzelergebnisse der Marshall-Prüfung sind in Anhang 10 wiedergegeben.

Aufgrund dieser Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass der Schaumbitumenasphalt grundsätzlich für die Verwendung als Deckschicht geeignet ist, da die in der Praxis üblichen Werte der Marshall-Prüfung eingehalten werden.

Spurbildungsversuch

Die Ergebnisse der Spurbildungsrate WTS_{Luft} sind im Bild 42 und die Ergebnisse der proportionalen Spurrinnentiefe PRD_{Luft} in Bild 43 wiedergegeben.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass die Untersuchungsergebnisse des Referenzasphalts, im Gegensatz zu denen des Schaumbitumenasphalts, nicht von der Probekörperlagerzeit abhängen. Die Spurbildungsrate des Referenzasphalts liegt anfangs (PZ 1) bei 0,19 mm/1.000, die des Schaumbitumenasphalts bei 0,24 mm/1.000 und somit oberhalb der des Referenzasphalts. Nach 21-tägiger Probekörperlagerzeit verringert sich die Spurbildungsrate des Schaumbitumenasphalts auf 0,14 mm/1.000 und liegt unterhalb der des Referenzasphalts (0,18 mm/1.000). Die Spurbildungsrate des Schaumbitumenasphalts nach einer 21-tägigen Probekörperlagerzeit kann mit der des Referenzasphalts gleichgesetzt werden.

Erwartungsgemäß ist das Untersuchungsergebnis „proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} “ beim Schaumbitumenasphalt von der Probekörperlagerzeit abhängig. Eine Abhängigkeit der proportionalen Spurrinnentiefe des Referenzasphalts konnte, wie schon bei der Spurbildungsrate, nicht nachgewiesen werden. Die proportionale Spurrinnentiefe beträgt nach der Probekörperlagerzeit 1 beim Schaumbitumenasphalt 18,3 % und beim Referenzasphalt 13,6 %. Nach 21-tägiger Probekörperlagerzeit beträgt die proportionale Spurrinnentiefe des Schaumbitumenasphalts 13,6% und die des Referenzasphalts 12,9 %. Das heißt, die proportionale Spurrinnentiefe des Schaumbitumenasphalts hat sich nach 21 Tagen der des Referenzasphalts angeglichen.

Ob aufgrund der zeitlich verzögerten „Standfestigkeit“ des Schaumbitumenasphalts die Zeitspanne vom Einbau bis zur Verkehrsfreigabe verlängert werden muss, kann mit Hilfe des im Labor durchgeführten Spurbildungsversuchs nicht endgültig geklärt werden. Hierzu wären vor allem – im Labor nicht durchführbare – Praxisversuche, wie tatsächliche Verkehrsbelastung oder tatsächliche Beanspruchung der eingebauten Deckschicht kurz nach der Verkehrsfreigabe, notwendig. Mit dem Spurbildungsversuch im Labor wird jedoch deutlich, dass der Einfluss der Probekörperlagerzeit beim Schaumbitumenasphalt nicht vernachlässigt werden darf.

Im Anhang 11 sind alle Einzelergebnisse des Spurbildungsversuchs wiedergegeben.

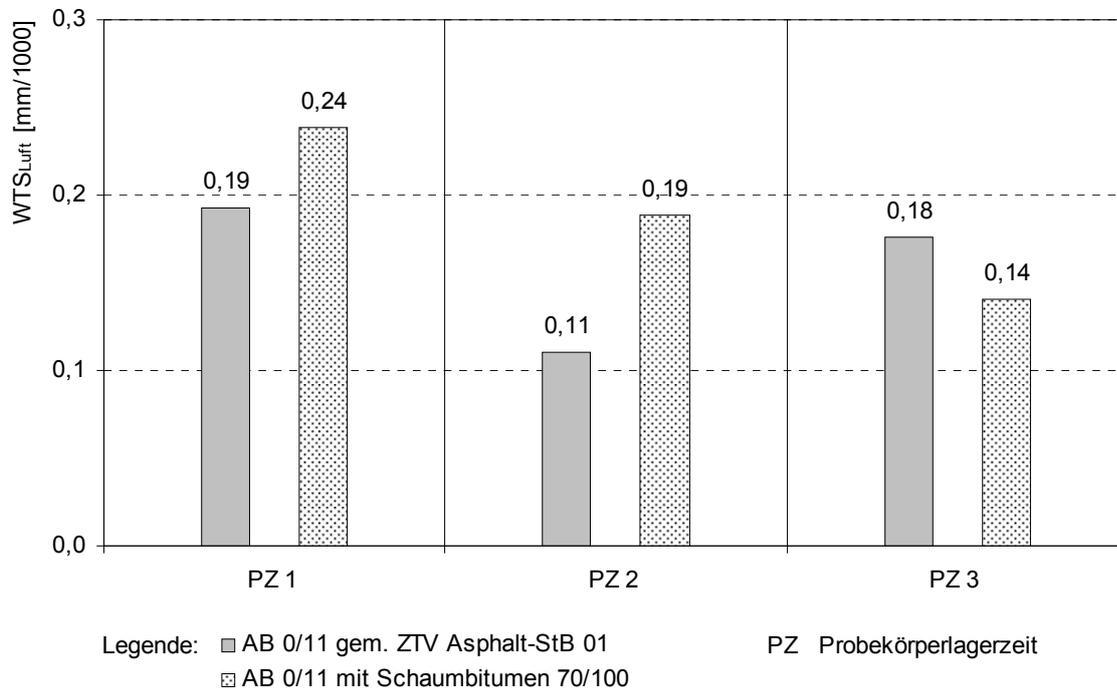


Bild 42: Mittlere Spurbildungsrate WTS_{Luft}

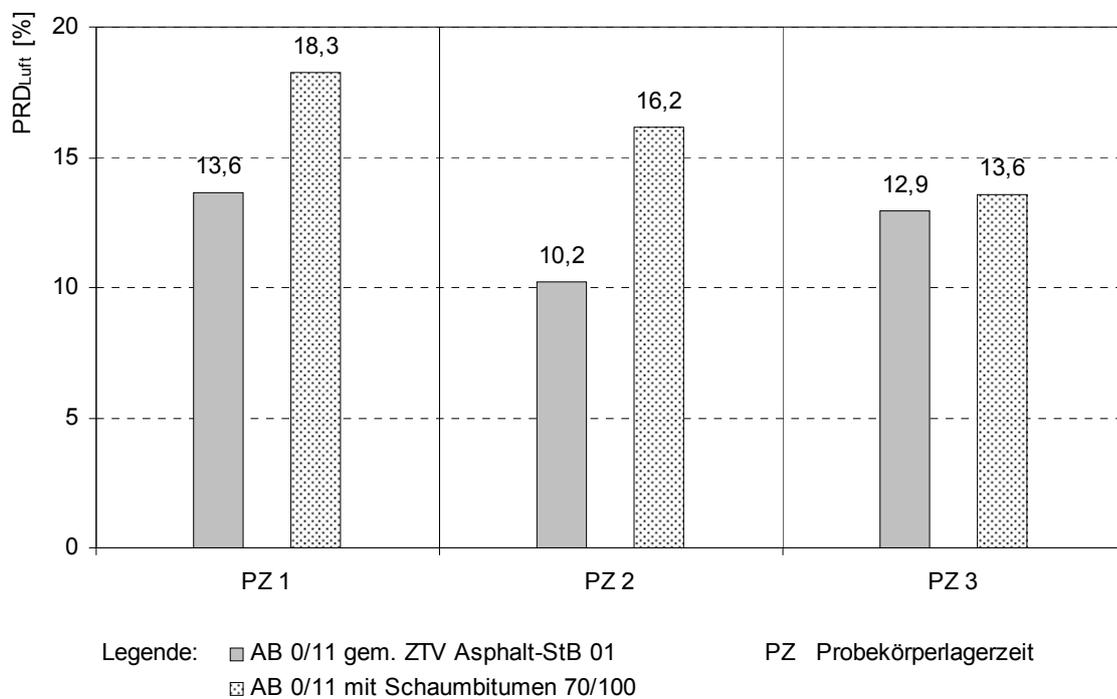


Bild 43: Proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft}

Indirekte Zugprüfung

Die Gegenüberstellung der indirekten Zugfestigkeit ITS des Schaumbitumenasphalts und der des Referenzasphalts zeigt, dass sich beide Mischgutsorten geringfügig unterscheiden (siehe Bild 44).

Eine Abhängigkeit der indirekten Zugfestigkeit des Referenzasphalts, die im Bereich zwischen 3,52 MPa (PZ 1) und 3,66 MPa (PZ 2) liegt, ist nicht erkennbar. Beim Schaumbitumenasphalt steigt jedoch die indirekte Zugfestigkeit von 3,21 MPa (PZ 1) auf 3,48 MPa (PZ 3). Beträgt der Unterschied zwischen Referenz- und Schaumbitumenasphalt anfangs noch bei 0,37 MPa, so vermindert sich die Differenz nach 21 Tagen auf 0,18 MPa. Aufgrund der geringen Unterschiede können beide Mischgutsorten, Schaumbitumenasphalt und Referenzasphalt, als gleichwertig betrachtet werden.

Die einzelnen Untersuchungsergebnisse der indirekten Zugprüfung sind in Anhang 12 zusammengefasst.

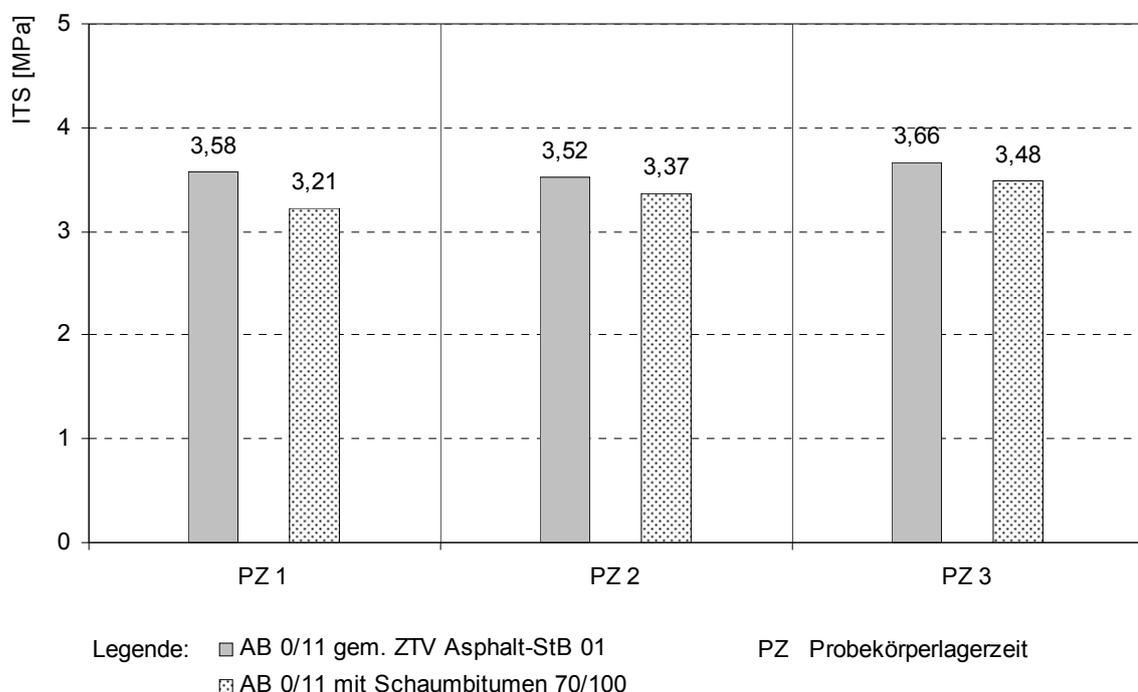


Bild 44: Indirekte Zugfestigkeit ITS

Wasserempfindlichkeit

Die Ergebnisse der Untersuchung Prüfung der Wasserempfindlichkeit sind in Bild 45 dargestellt. Eine Abhängigkeit der Prüfergebnisse der Wasserempfindlichkeit ITSR ist beim Referenzasphalt und beim Schaumbitumenasphalt erkennbar. Das Prüfergebnis des Referenzasphalts liegt anfangs bei 96,8 % (PZ 1) und fällt mit zunehmender Probekörperlagerzeit auf 76,1 % (P 3). Beim Schaumbitumenasphalt liegt die Prüfergebnis bei 97,1 % (PZ 1) und 65,0 % (PZ 3). Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass der Differenzbetrag zwischen den Ergebnissen der beiden Mischgutsorten nach den Probekörperlagerzeiten 1 und 2 0,3 % und nach Probekörperlagerzeit 3 11,1 % beträgt. Warum nach PZ 3 der Differenzbetrag zwischen Referenzasphalt und Schaumbitumenasphalt auf 11,1 % ansteigt, kann nicht geklärt werden. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig, die in diesem Forschungsvorhaben weder vom Budget noch vom Zeitrahmen her untergebracht werden konnten.

Unabhängig von den Prüfergebnissen nach 21-tägiger Probekörperlagerzeit (PZ 3) können aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den untersuchten Mischgutsorten nach „norm- bzw. regelgerechter“ Probekörperlagerzeit (PZ 2) und 7-tägiger Probekörperlagerzeit (PZ 2) beide als gleichwertig betrachtet werden.

Im Anhang 13 sind die Einzelergebnisse der Untersuchung Prüfung der Wasserempfindlichkeit zusammengefasst.

Einaxialer Druckschwellversuch

Bild 46 zeigt die Ergebnisse des Druckschwellversuchs. Bei beiden Mischgutsorten ist eine Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse von der Probekörperlagerzeit erkennbar. Beim Referenzasphalt nimmt die Dehnung ϵ nach 10.000 Belastungsimpulsen von 17,4 ‰ (PZ 1) auf 14,1 ‰ (PZ 2) und somit um 3,3 ‰ ab. Im Gegensatz dazu ist die Abhängigkeit der ermittelten Dehnung des Schaumbitumenasphalts von der Probekörperlagerzeit deutlicher ausgeprägt. Die Dehnung nach 10.000 Belastungsimpulsen liegt beim Schaumbitumenasphalt anfangs bei 24,0 ‰ und nach einer 21-tägigen Probekörperlagerzeit bei 17,4 ‰. Die Differenz beträgt beim Schaumbitumenasphalt somit 6,6 ‰ und ist im Vergleich zum Referenzasphalt (3,3 ‰) doppelt

so groß. Das heißt, der Einfluss der Probekörperlagerzeit ist beim Schaumbitumen-
 asphalt deutlich größer als beim Referenzasphalt.

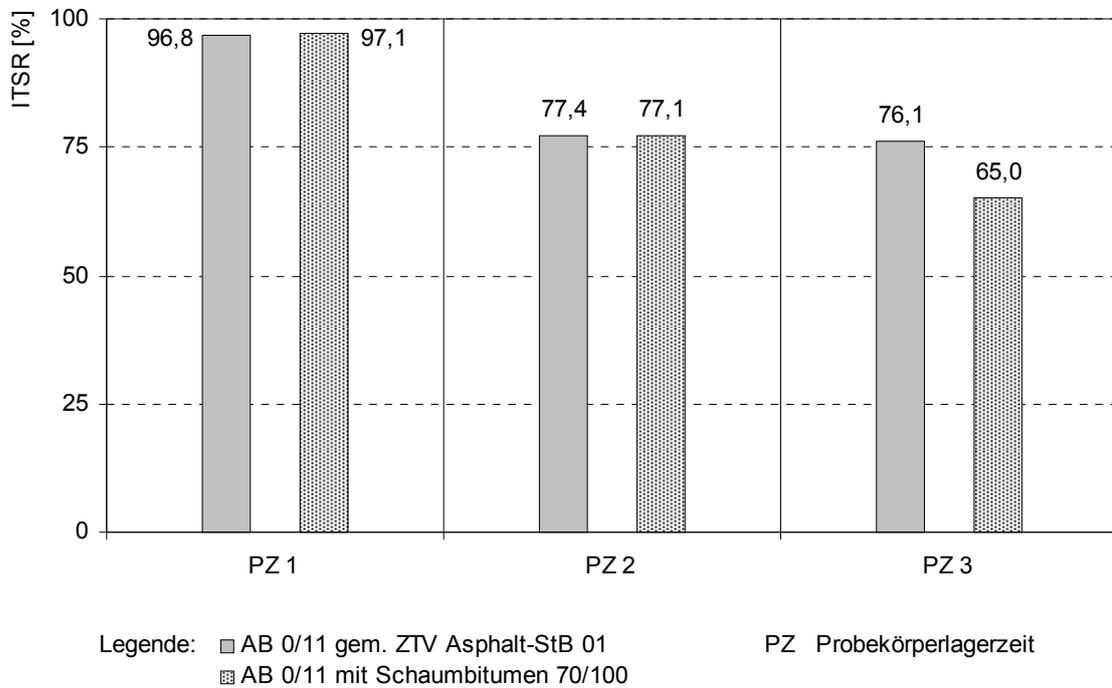


Bild 45: Wasserempfindlichkeit ITSR

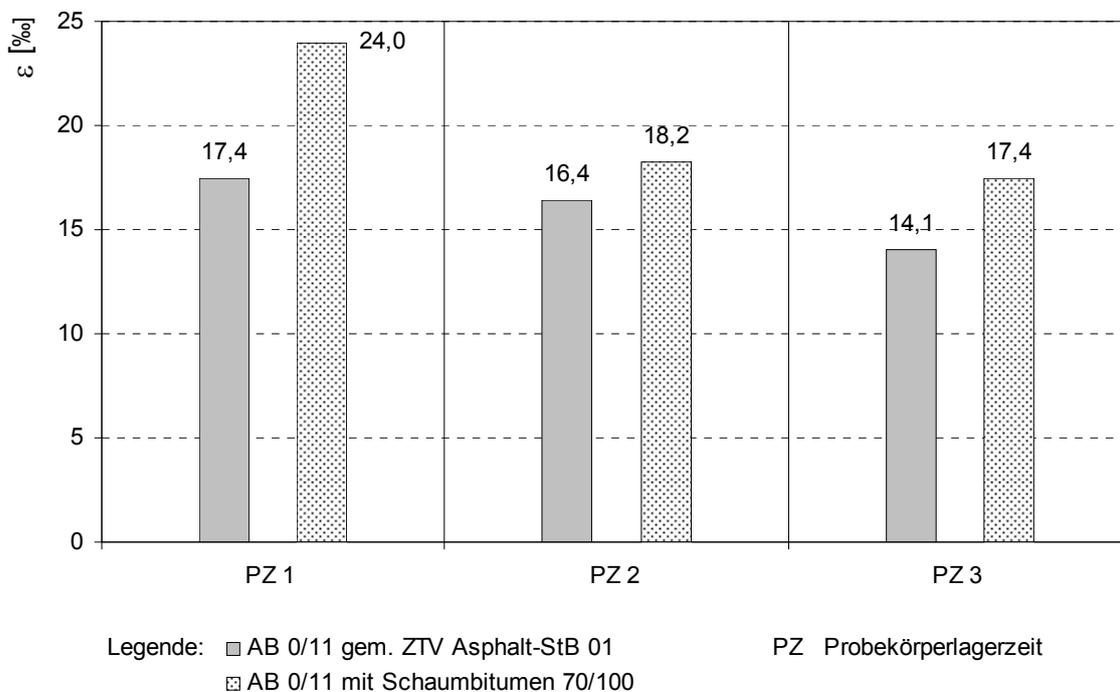


Bild 46: Dehnung ϵ nach 10.000 Belastungsimpulsen

Vergleicht man je Probekörperlagerzeit die ermittelte Dehnung des Referenzasphalts und des Schaumbitumenasphalts, so wird deutlich, dass der Unterschied von 6,6 ‰ (PZ 1) auf 3,3 ‰ (PZ 3) abnimmt und sich die Ergebnisse des Schaumbitumenasphalts mit zunehmender Probekörperlagerzeit denen des Referenzasphalts immer mehr annähern.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Gebrauchseigenschaften des Schaumbitumenasphalts nach einer bestimmten Zeitspanne denen des Referenzasphalts entsprechen. Angaben bezüglich der Zeitspanne zwischen Einbau und Verkehrsfreigabe können noch nicht gemacht werden. Hierzu wären weiterführende, großtechnische Untersuchungen, das heißt, keine praxisnahe Prüfung des Asphaltmischguts im Labormaßstab, sondern Untersuchungen an großtechnisch mit Schaumbitumenasphalt hergestellten Deckschichten, erforderlich. Um belastbare Aussagen zu gewinnen, wären mehrere Teststrecken notwendig.

Die Einzelergebnisse des einaxialen Druckschwellversuchs werden in Anhang 14 wiedergegeben.

7.3 Großtechnische Herstellung und Einbau

Wie unter Ziffer 4 beschrieben, dient der Untersuchungsteil 3 (Untersuchungen an großtechnisch hergestelltem Schaumbitumenasphalt und Einbau des Asphalts) zum einen der Beantwortung der Frage, ob die im Teil 2 ermittelten Befunde auch bei großtechnischer Herstellung des Schaumbitumenasphalts in einer Asphaltmischanlage gültig sind bzw. welche Einschränkungen ggf. gemacht werden müssen, zum anderen der Überprüfung, ob Schaumbitumenasphalt großtechnisch eingebaut werden kann und ob die Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts in der Praxis gegeben ist.

Da bei der großtechnischen Herstellung des Schaumbitumenasphalts, im Gegensatz zur Herstellung im Labor, das Mischgut vor der weiteren Verarbeitung in wärmege-
dämmten Mischgutsilos gelagert wird und hieraus ein Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts resultieren kann, wurden dem Mischgutsilo nach der Herstellung sowie nach einer Silolagerzeit von 3 und

6 Stunden Schaumbitumenasphaltproben entnommen und die für die weitere Untersuchung notwendigen Marshall-Probekörper und Probeplatten hergestellt. Die Probekörper wurden nach einer 7-tägigen Probekörper-Lagerzeit – die Probekörper-Lagerzeit konnte aufgrund der Ergebnisse des Untersuchungsteils 2 auf 7 Tage beschränkt werden – untersucht. Um einen möglichen Einfluss der Silolagerzeit zu erfassen, wurden je Silolagerzeit am großtechnisch hergestellten Schaumbitumenasphalt der Hohlraumgehalt an Marshall-Probekörpern ermittelt sowie die Marshall-Prüfung (Ziffer 6.2.5) und an Probeplatten der Spurbildungsversuch (Ziffer 6.2.6) durchgeführt. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 17 wiedergegeben

Tabelle 17: Versuchsprogramm zur Ermittlung des Einflusses der Silolagerzeit auf die Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts

großtechnisch hergestellter Schaumbitumenasphalt	
SZ 1 (Nach Herstellung)	<i>Prüfgrößen/-verfahren:</i> - Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper
SZ 2 (3 h)	- Marshall-Prüfung + Marshall-Stabilität S_M + Marshall-Fließwert F_M
SZ 3 (6 h)	- Spurbildungsversuch + Mittlere Spurbildungsrate WTS_{Luft} + Proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft}

Erläuterungen:

SZ Silolagerzeit (Lagerzeit des Mischguts im Silo)
 h Stunde

Um die im Labor ermittelte Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts in einem Großversuch prüfen zu können, wurde auf einer von der Bayerischen Staatsbauverwaltung zur Verfügung gestellten Teststrecke, die im Landkreis Starnberg und somit im Zuständigkeitsbereich des Staatlichen Bauamts Weilheim liegt, Schaumbitumenasphalt eingebaut (siehe Ziffer 4).

In Tabelle 18 sind die je Probenahmeort am Mischgut durchgeführten Prüfungen zusammengefasst.

Tabelle 18: Versuchsprogramm – Teststrecke

Probenart Probe- Nahmeort	Mischgutprobe	Bohrkern		
		Ø 150 mm	Ø 200 mm	Ø 300 mm
0 (Probefeld)	<i>Prüfverfahren/-größen:</i> - Marshall-Prüfung - Indirekte Zugprüfung - Spurbildungsversuch	<i>Prüfverfahren/-größen:</i> - Verdichtungsgrad - Schichtdicke Je Probenahmeort <i>zwei</i> Bohrkerne!	Keine Entnahme!	Keine Entnahme!
1			<i>Prüfverfahren/-größe:</i> - Verdichtungsgrad - Schichtdicke Je Probenahmeort <i>zwei</i> Bohrkerne!	<i>Prüfverfahren/-größe:</i> - Verdichtungsgrad - Schichtdicke Je Probenahmeort <i>ein</i> Bohrkern!
2				
3				
4				
5				
6				

Außerdem wurde während des gesamten Einbaus je Lkw die Mischguttemperatur beim Verladen an der Mischanlage, beim Entladen in den Straßenfertiger und die Verdichtungstemperatur nach der Bohle bzw. vor dem ersten Walzübergang gemessen und aufgezeichnet. Des Weiteren wurden, um den Verdichtungsgrad der eingebauten Schicht sofort prüfen zu können, „einbaubegleitend“ zerstörungsfreie Dichtemessungen durchgeführt.

Im Juni 2008 wurden zusätzlich zum o. g. Versuchsprogramm Griffigkeitsmessungen nach dem SKM durchgeführt.

Einfluss der Silolagerzeit

Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper

Um einen Einfluss der Silolagerzeit auf die Verarbeitbarkeit des Schaumbitumenasphalts zu erfassen, werden die je Silolagerzeit ermittelten Hohlraumgehalte am Marshall-Probekörper verglichen. Die Ergebnisse sind in Bild 47 wiedergegeben. Mit der Gegenüberstellung ist eine Abhängigkeit des Hohlraumgehalts von der Silolagerzeit nicht nachweisbar. Unabhängig von der Silolagerzeit liegen die ermittelten Hohlraumgehalte H_{MPK} zwischen 3,2 Vol.-% und 3,6 Vol.-% und somit in dem gemäß *ZTV Asphalt-StB 01* geforderten Bereich (2,0 Vol.-% bis 4,0 Vol.-%).

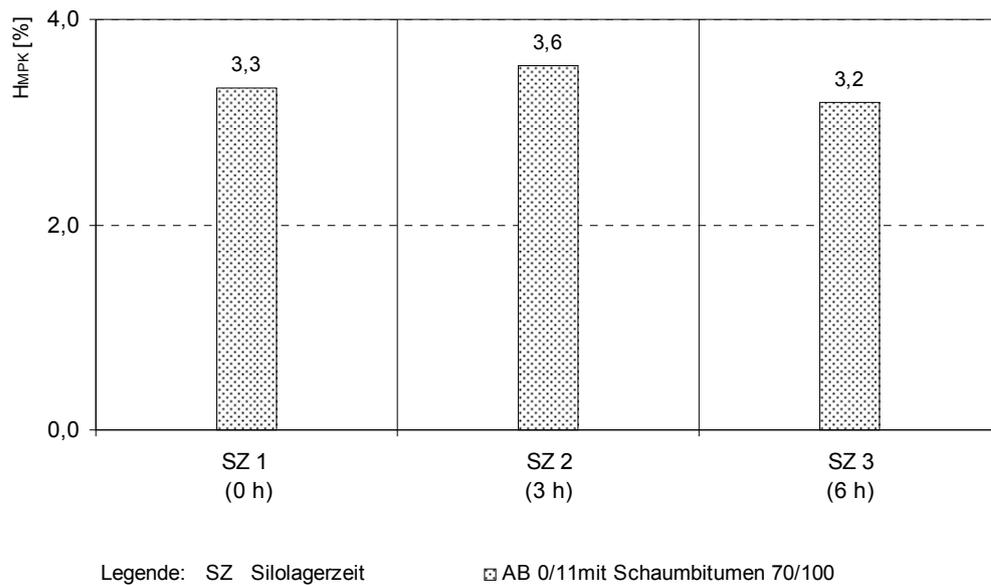


Bild 47: Silolagerzeit – Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper H_{MPK}

Marshall-Prüfung

In Bild 48 werden die Ergebnisse Marshall-Stabilität und in Bild 49 die Ergebnisse Marshall-Fließwert wiedergegeben. Weder bei der Marshall-Stabilität, mit Werten zwischen 12,5 kN (SZ 2) und 13,1 kN (SZ 3), noch beim Marshall-Fließwert, mit Werten zwischen 4,1 mm (SZ 1 und 2) und 4,5 mm (SZ 3), ist eine Abhängigkeit von der Silolagerzeit erkennbar.

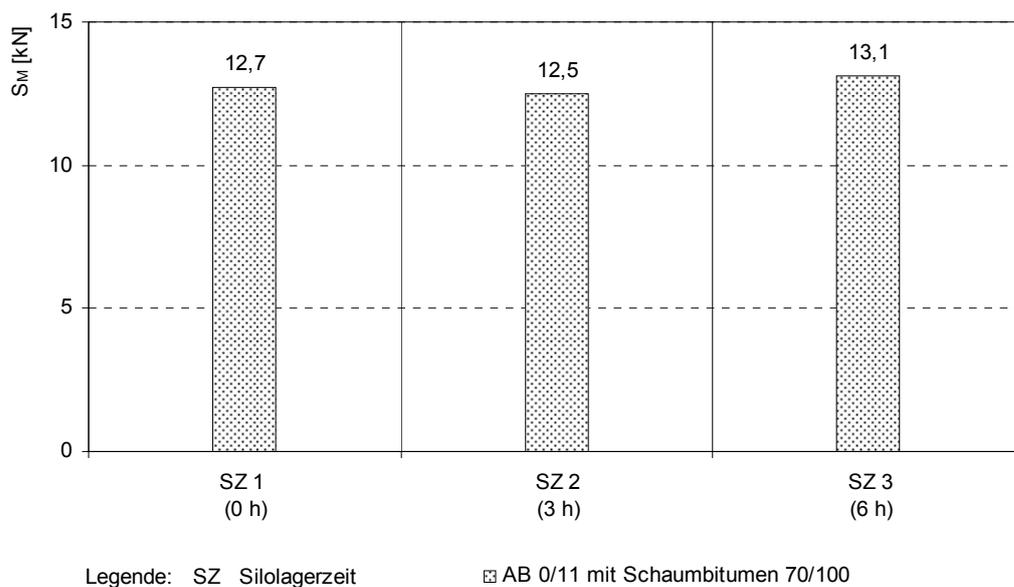


Bild 48: Silolagerzeit – Marshall-Stabilität S_M

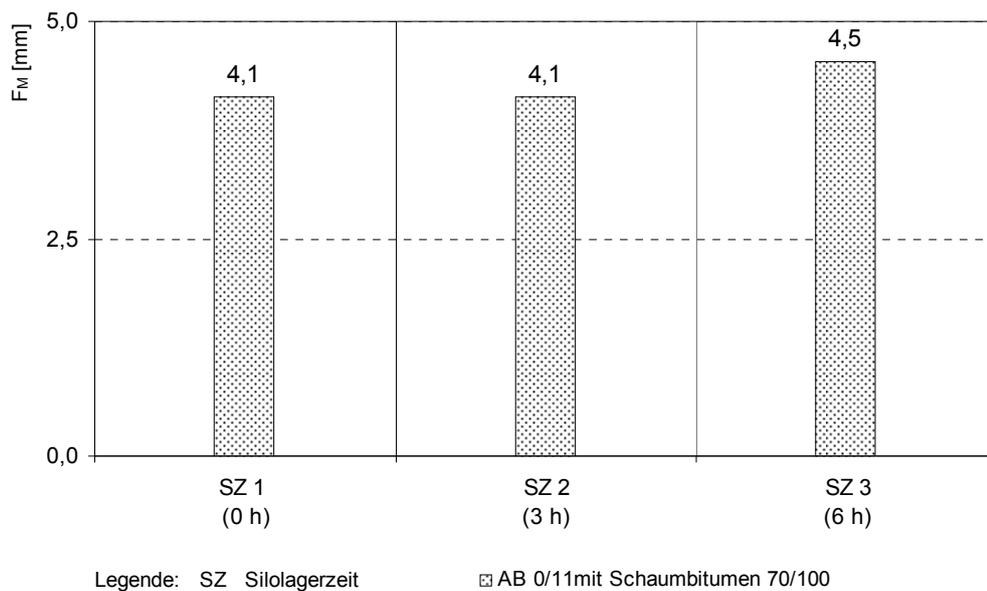


Bild 49: Silolagerzeit – Marshall-Fließwert F_M

Spurbildungsversuch

Die Ergebnisse der Spurbildungsrate WTS_{Luft} sind in Bild 50 und die der proportionalen Spurrinnentiefe PRD_{Luft} in Bild 51 dargestellt. Wie bei den Untersuchungen Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper und Marshall-Prüfung kann bei dem Spurbildungsversuch keine Abhängigkeit der Gebrauchseigenschaften von der Silolagerzeit festgestellt werden. Die Ergebnisse der Spurbildungsrate WTS_{Luft} liegen zwischen 0,097 mm/1.000 (SZ 3) und 0,11 mm/1.000 (SZ 1) und die der proportionalen Spurrinnentiefe zwischen 10,3 % (SZ 3) und 12,7 % (SZ 2).

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass weder die Verarbeitbarkeit noch die Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts durch eine Silolagerzeit von bis zu 6 Stunden beeinflusst wird.

Die einzelnen Ergebnisse der Untersuchung Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper, Marshall-Prüfung und Spurbildungsversuch sind in Anhang 15 zusammengefasst.

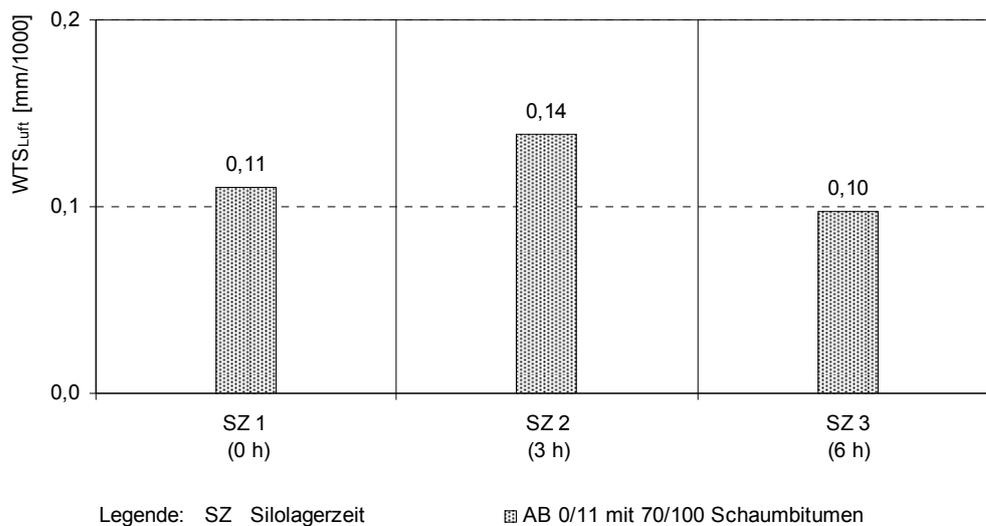


Bild 50: Silolagerzeit – Spurbildungsrate WTS_{Luft}

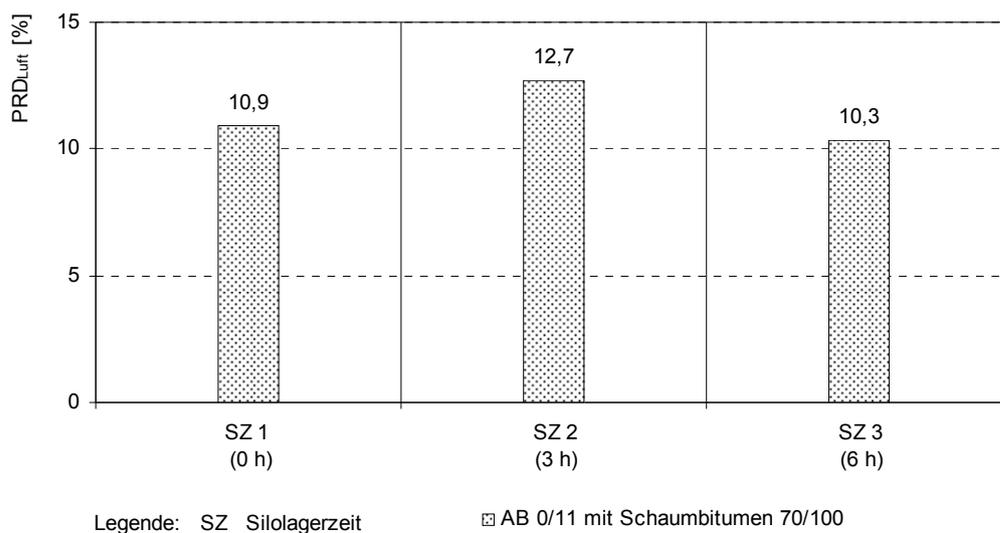


Bild 51: Silolagerzeit – Proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft}

Verdichtungsgrad und Misch-, Verdichtungstemperaturen – Teststrecke

In Bild 52 ist der mittlere Verdichtungsgrad aus 4 Bohrkernen, die je Probenahmeort entnommen wurden, dargestellt. Der Verdichtungsgrad des Referenzasphalts liegt im Bereich von 97,7 % und 98,7 % und der des Schaumbitumenasphalts zwischen 95,8 % und 99,7 %. Bei den mit Schaumbitumenasphalt hergestellten Deckenabschnitten wurde in 4 von 5 Abschnitten der gemäß *ZTV Asphalt-StB 01* geforderte Mindestverdichtungsgrad von 97,0 % eingehalten. Lediglich in einem Abschnitt wurde der geforderte Verdichtungsgrad unterschritten.

Der mit der Isotopsonde ermittelte Verdichtungsgrad liegt in den mit Schaumbitumenasphalt hergestellten Abschnitten 1 und 2 im Mittel bei 98,4 % und in den Abschnitten 4 und 5 im Mittel bei 98,0 %. Im Vergleich dazu liegt der Verdichtungsgrad der mit Referenzasphalt hergestellten Deckschicht im Abschnitt 3 bzw. 6 bei 98,2 % bzw. 98,9 %. Die Messergebnisse der Isotopsonde sind in Anhang 16 wiedergegeben.

Inwieweit die Verdichtung des Schaumbitumenasphalts optimiert werden kann, wäre in einer weiteren Untersuchung, die nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens ist, zu ermitteln.

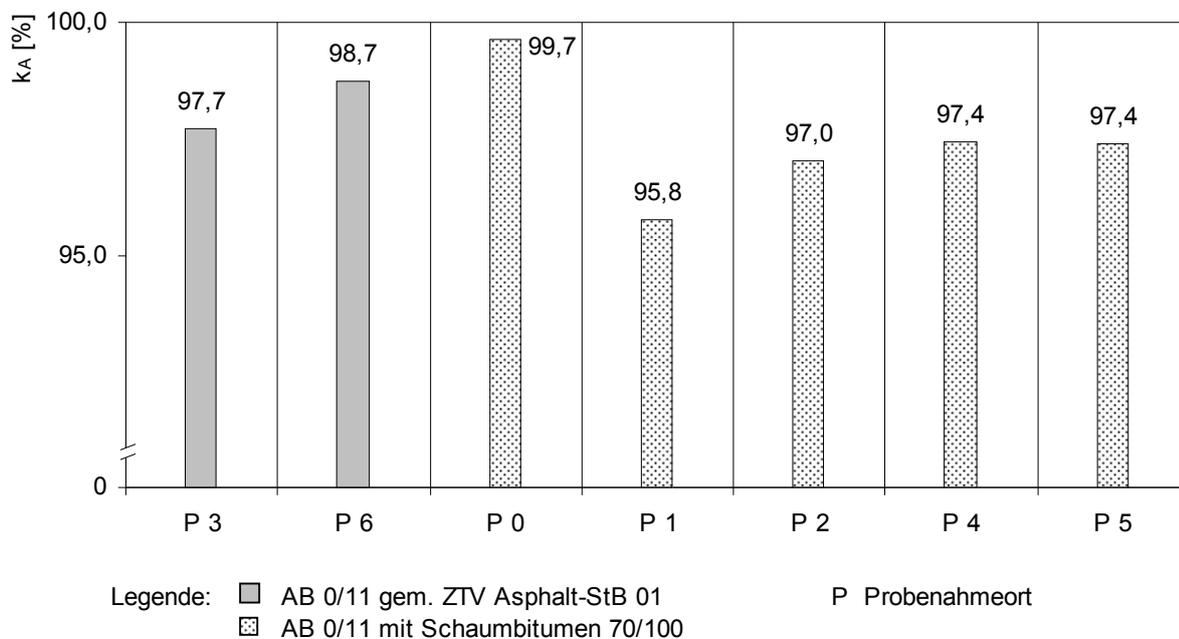


Bild 52: Teststrecke – Verdichtungsgrad

Bezieht man die je Abschnitt aus den Chargenprotokollen gewonnenen Mischtemperaturen der einzelnen Abschnitte (Bild 53) und des Probefelds sowie die je Probenahmeort gemessenen Verdichtungstemperaturen (Bild 54) in die Untersuchung ein, so stellt man fest, dass durch den Einsatz von Schaumbitumen die Misch- und Verdichtungstemperatur reduziert werden können. Im Gegensatz zur Mischtemperatur des Referenzasphalts, die im Bereich von 176 °C bis 180 °C lag, konnte die Mischtemperatur durch Einsatz von Schaumbitumen – die Mischtemperatur des Schaumbi-

tumenasphalts lag zwischen 146 °C und 149 °C – um ca. 30 °C (16 %) reduziert werden.

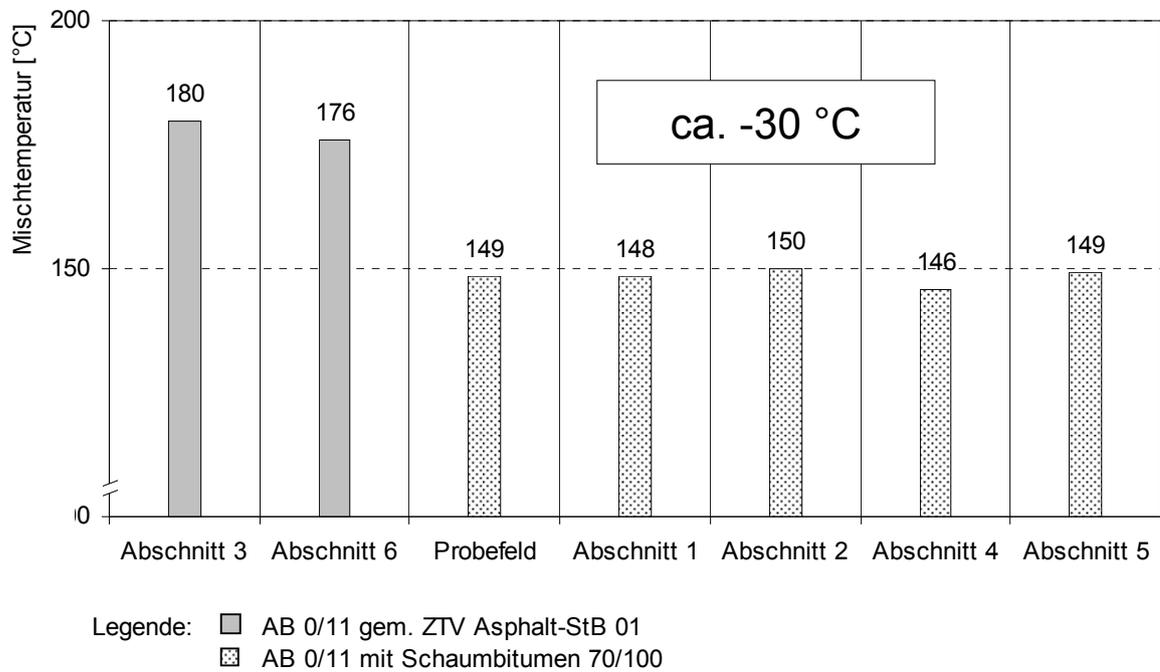


Bild 53: Teststrecke – Mischtemperatur je Abschnitt

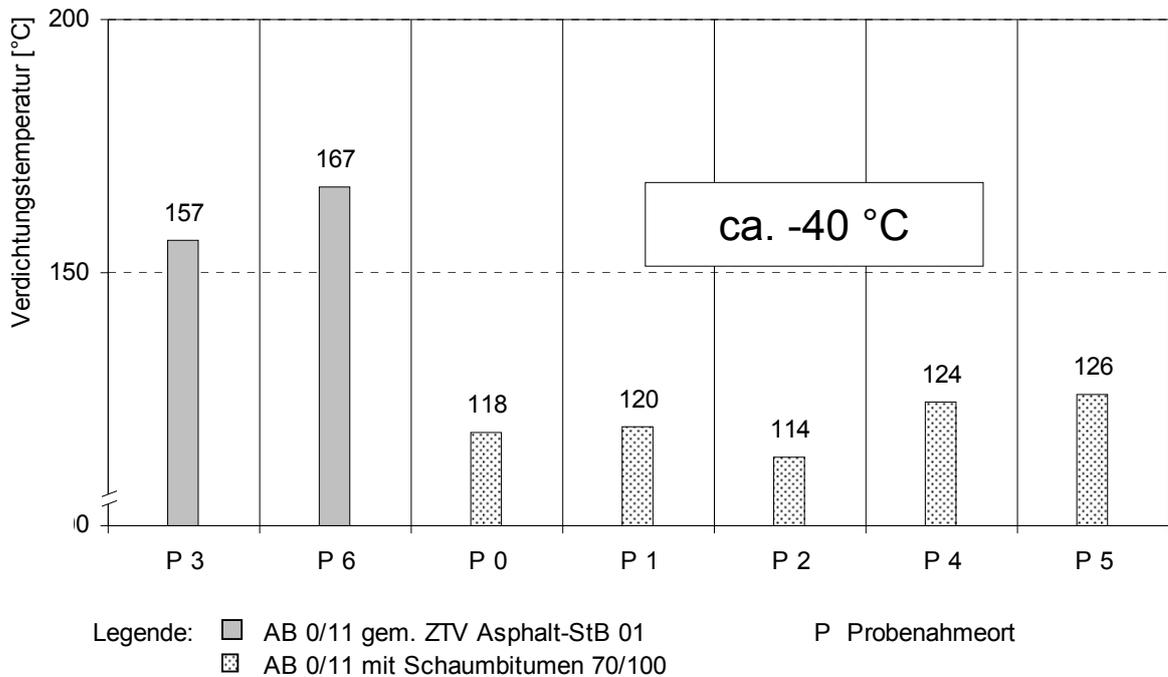


Bild 54: Teststrecke – Verdichtungstemperatur je Probenahmeort

Der Vergleich der Verdichtungstemperaturen des Referenzasphalts (157 °C bis 167 °C) und des Schaumbitumenasphalts (114 °C und 126 °C) zeigt, dass durch den Einsatz von Schaumbitumen eine Reduzierung der Verdichtungstemperatur um ca. 40 °C (26 %) möglich ist, ohne dabei den geforderten Verdichtungsgrad zu unterschreiten.

Die mittleren Schichtdicken je Probenahmeort werden in Bild 55 wiedergegeben. Stellt man die geforderte Schichtdicke von 40 mm den ermittelten Schichtdicken gegenüber, so stellt man fest, dass die Schichtdicken bei den mit Schaumbitumenasphalt hergestellten Abschnitten in 3 von 5 Fällen die geforderte Schichtdicke unterschritten. Im Gegensatz dazu wird bei den mit Referenzasphalt hergestellten Abschnitten die geforderte Schichtdicke eingehalten. Der Grund für die Unterschreitung der geforderten Schichtdicke beim Schaumbitumenasphalt liegt nicht am Einsatz von Schaumbitumen (eine „Überverdichtung“ kann ausgeschlossen, siehe Bild 52), sondern am Einbau selbst.

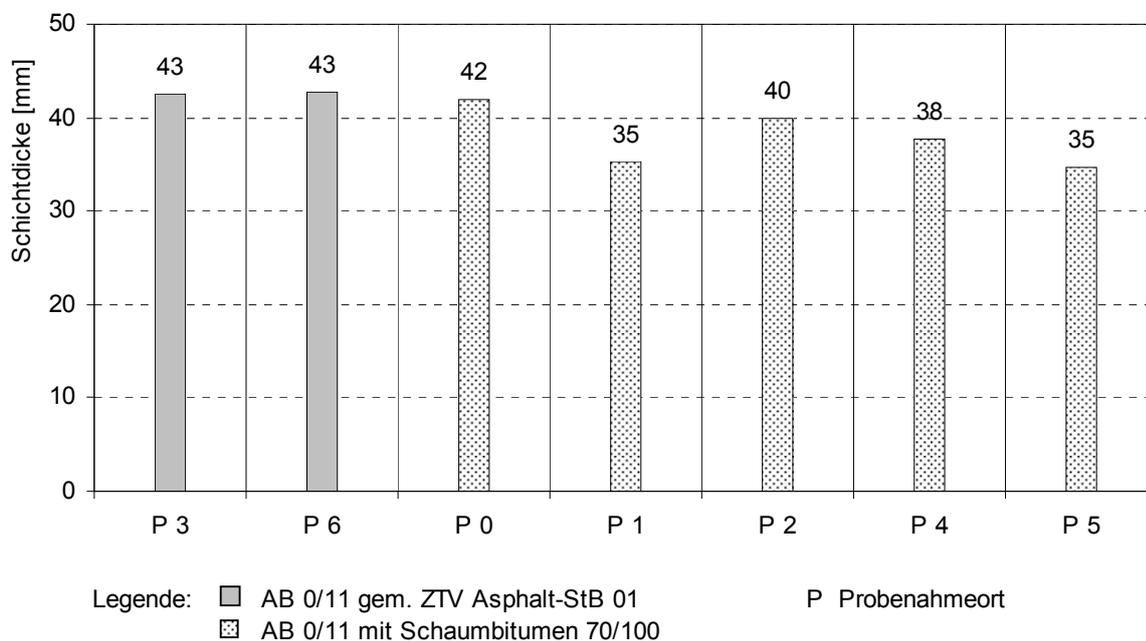


Bild 55: Bohrkerne – Mittlere Schichtdicke

Außerdem wurden an den je Probenahmeort (mit Ausnahme P 0 im Probefeld) entnommenen großen Bohrkernen (Ø 300 mm) ein Spurbildungsversuch durchgeführt. Die je Bohrkern ermittelte Spurbildungsrate WTS_{Luft} ist in Bild 56 und die proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} in Bild 57 dargestellt.

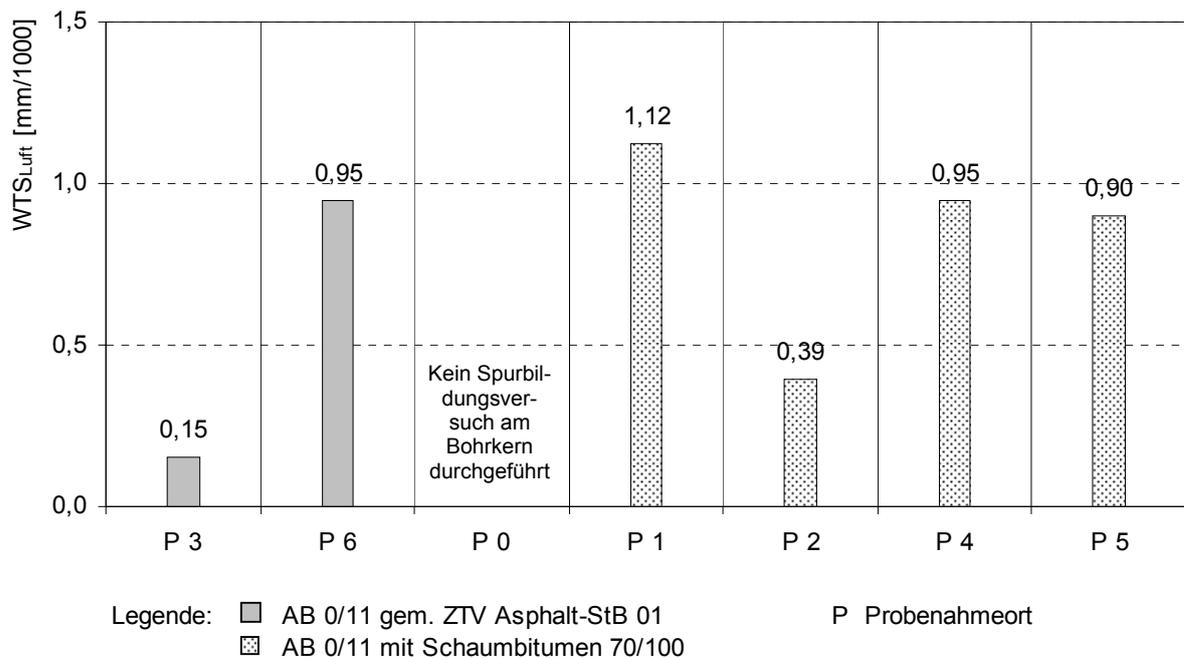


Bild 56: Bohrkern – Spurbildungsrate WTS_{Luft}

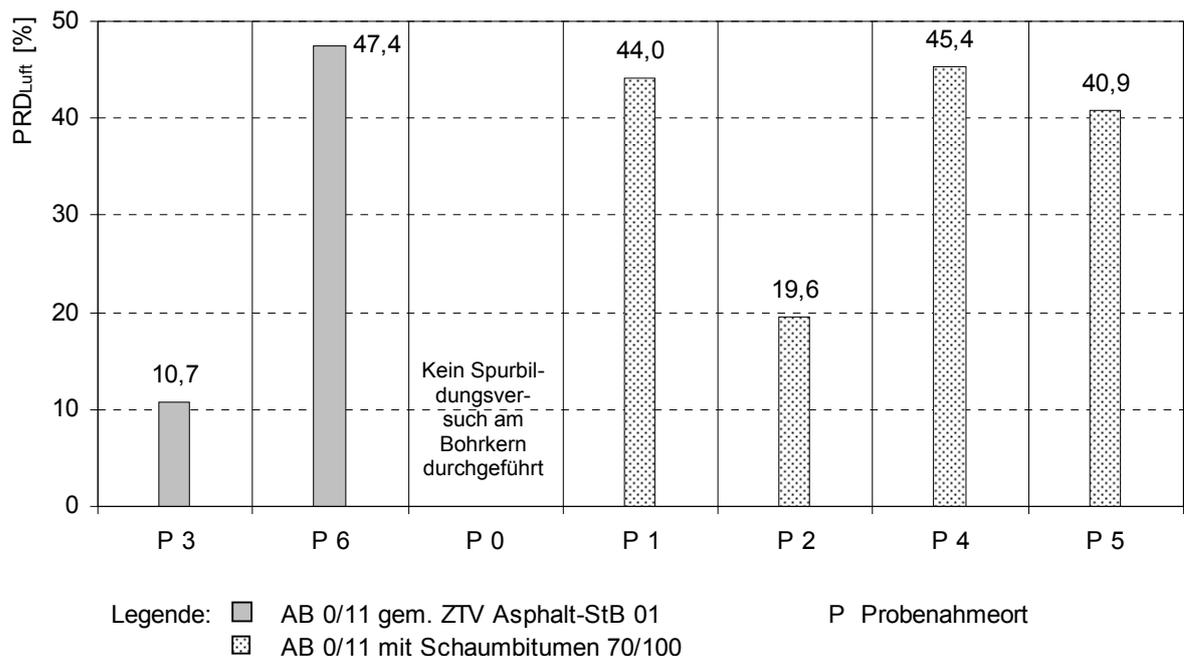


Bild 57: Bohrkern – Proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft}

Auf der Teststrecke ist ein Jahr nach dem Einbau beim Gebrauchsverhalten kein Unterschied zwischen dem Referenzasphalt und dem Schaumbitumenasphalt erkennbar.

Die an den einzelnen Bohrkernen ermittelten Untersuchungsergebnisse sind in Anhang 17 zusammengefasst.

Untersuchungen am großtechnisch hergestellten Mischgut

Ein weiteres Ziel war die Überprüfung, ob die im Labor ermittelten Befunde auch bei großtechnisch hergestelltem Schaumbitumenasphalt gültig sind. Hierzu wurden je Probenahmeort Mischgutproben entnommen, die notwendigen Probekörper hergestellt und an diesen nach einer 7-tägigen Probekörperlagerzeit (aufgrund der Befunde des Untersuchungsteils 1, Schritt 2) die Untersuchungen Marshall-Prüfung, Spurbildungsversuch und indirekte Zugprüfung durchgeführt. Die Einzelergebnisse sind in Anhang 18 wiedergegeben.

Marshall-Prüfung

Bild 58 und Bild 59 zeigen die Untersuchungsergebnisse der Marshall-Prüfung an großtechnisch hergestelltem Mischgut.

Beim Referenzasphalt liegt die Marshall-Stabilität im Bereich von 13,9 kN bis 14,8 kN. Stellt man die am Schaumbitumenasphalt ermittelten Marshall-Stabilitäten, die im Bereich von 11,9 kN und 13,9 kN liegen, denen des Referenzasphalts gegenüber, so liegt die Stabilität des Schaumbitumenasphalts geringfügig unterhalb der des Referenzasphalts. Die unterschiedlichen Marshall-Stabilitäten beim großtechnisch hergestellten Mischgut sind, im Gegensatz zum im Labor hergestellten Mischgut (siehe Ziffer 6.2.5), wesentlich kleiner. Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den großtechnisch hergestellten Mischgutsorten (Referenzasphalt und Schaumbitumenasphalt) kann der Schaumbitumenasphalt als ein für die Praxis geeignetes Mischgut definiert werden. Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass durch die Marshall-Stabilität allein die Gebrauchstauglichkeit nicht beurteilt werden kann.

Die Marshall-Fließwerte des Referenzasphalts (3,8 mm bis 5,1 mm) und die des Schaumbitumenasphalts (4,5 mm bis 5,8 mm) unterscheiden sich nicht und liegen bei beiden Mischgutsorten im praxisüblichen Wertebereich von 3 mm bis 7 mm.

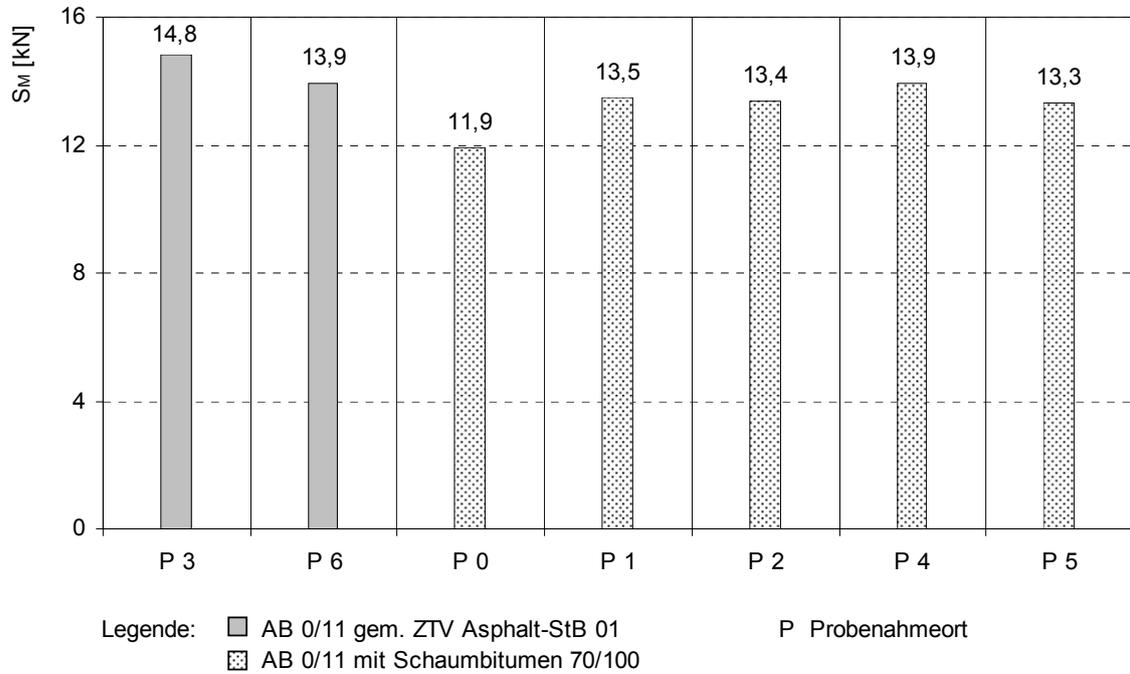


Bild 58: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Marshall-Stabilität S_M

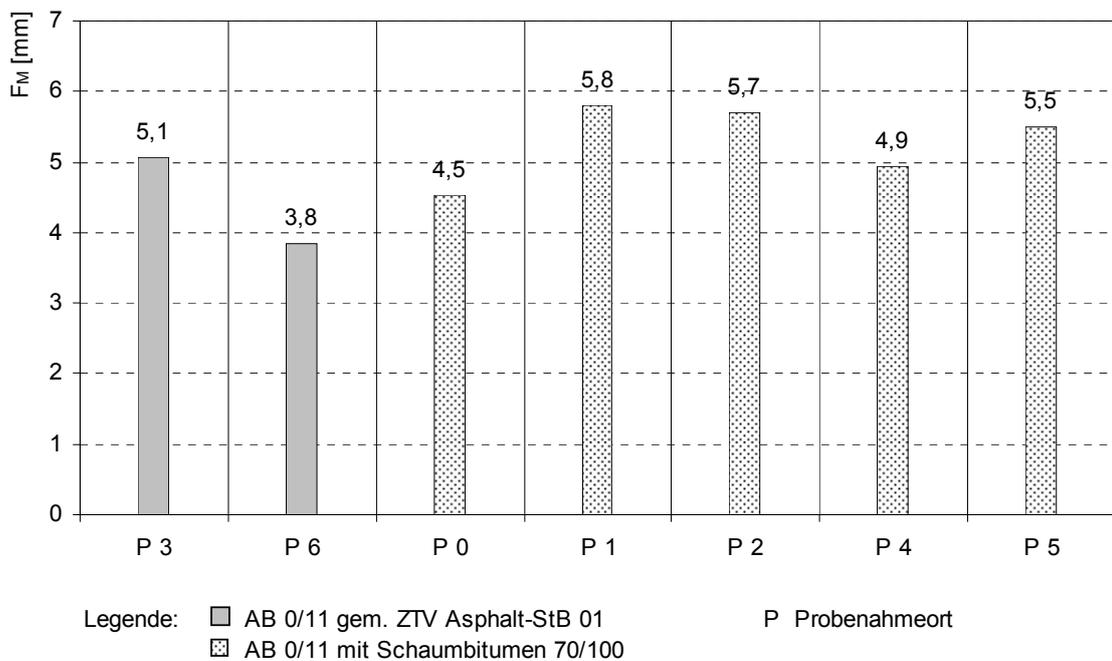


Bild 59: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Marshall-Fließwert F_M

Indirekte Zugprüfung

Die indirekte Zugfestigkeit des Referenzasphalts (3,45 MPa bis 3,51 MPa) unterscheidet sich nicht von der indirekten Zugfestigkeit des Schaumbitumenasphalts (3,41 MPa bis 3,78 MPa, siehe Bild 60). Beim großtechnisch hergestellten Mischgut ist somit eine Abhängigkeit der indirekten Zugfestigkeit von der Mischgutsorte nicht erkennbar. Auch in diesem Punkt kann der Schaumbitumenasphalt dem Referenzasphalt gleichgesetzt werden.

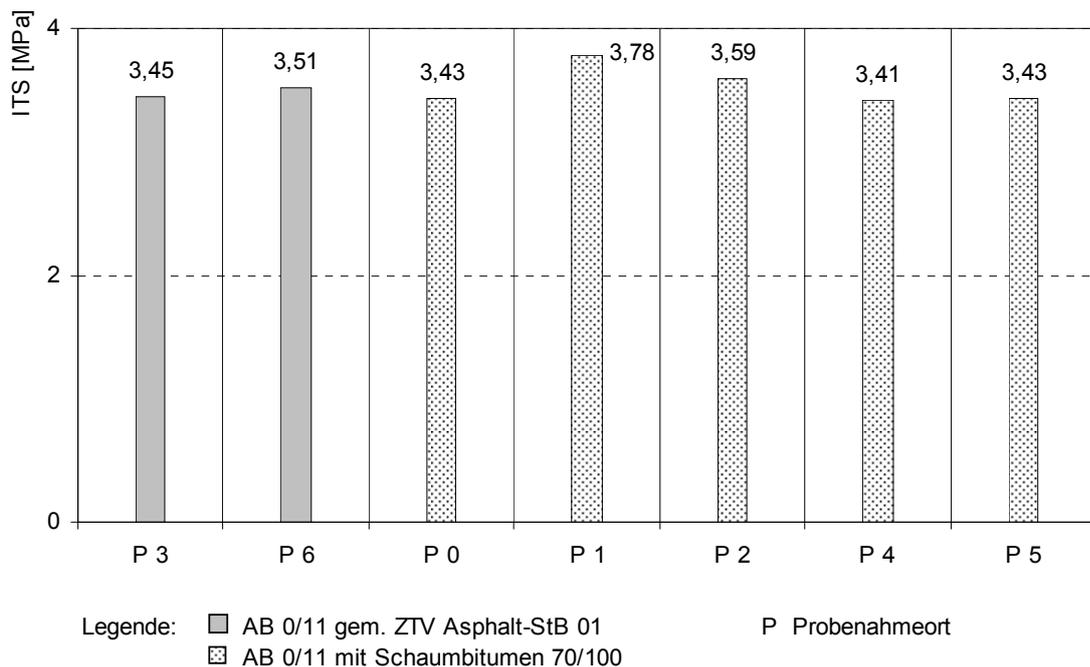


Bild 60: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Indirekte Zugfestigkeit IST

Spurbildungsversuch

Bild 61 zeigt die Ergebnisse Spurbildungsrate WTS_{Luft} und Bild 62 zeigt die Ergebnisse proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} , die an der, je Probenahmeort, entnommenen Mischgutprobe ermittelt wurden.

Die Spurbildungsrate WTS_{Luft} des Referenzasphalts liegt zwischen 0,09 mm/1.000 und 0,15 mm/1.000 und die des Schaumbitumenasphalts (ohne P 1) zwischen 0,09 mm/1.000 und 0,18 mm/1.000. Die proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} beim Referenzasphalt ist im Bereich von 9,7 % und 13,0 % und beim Schaumbitumenasphalt (ohne P 1) im Bereich von 9,0 % und 14,1 %

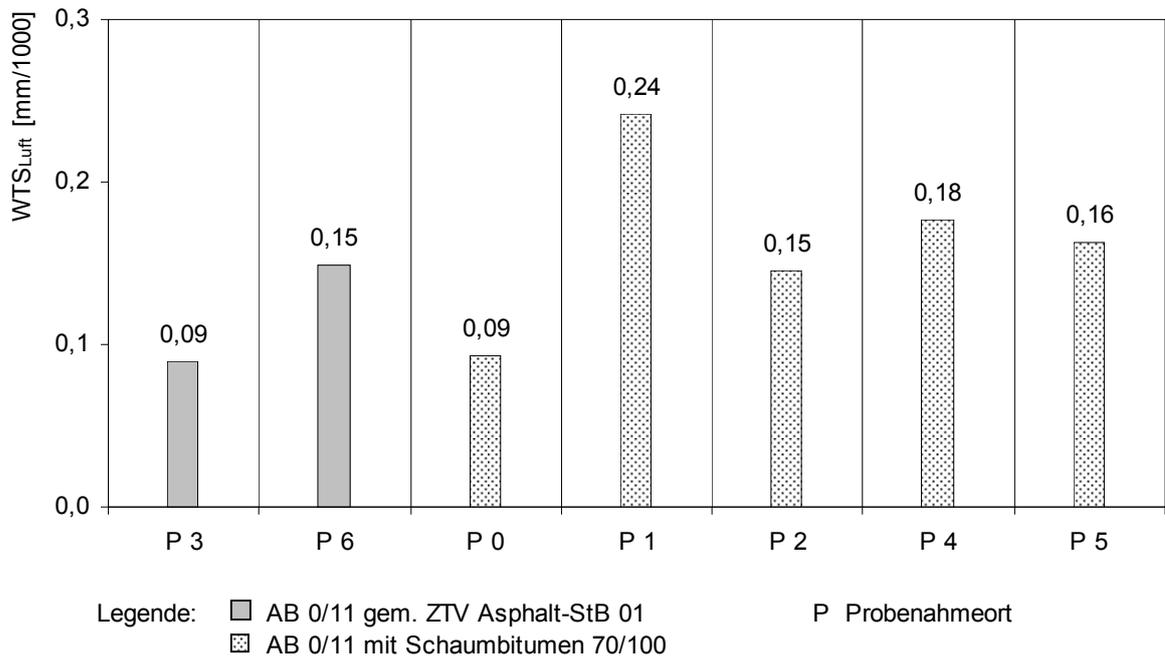


Bild 61: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Spurbildungsrate WTS_{Luft}

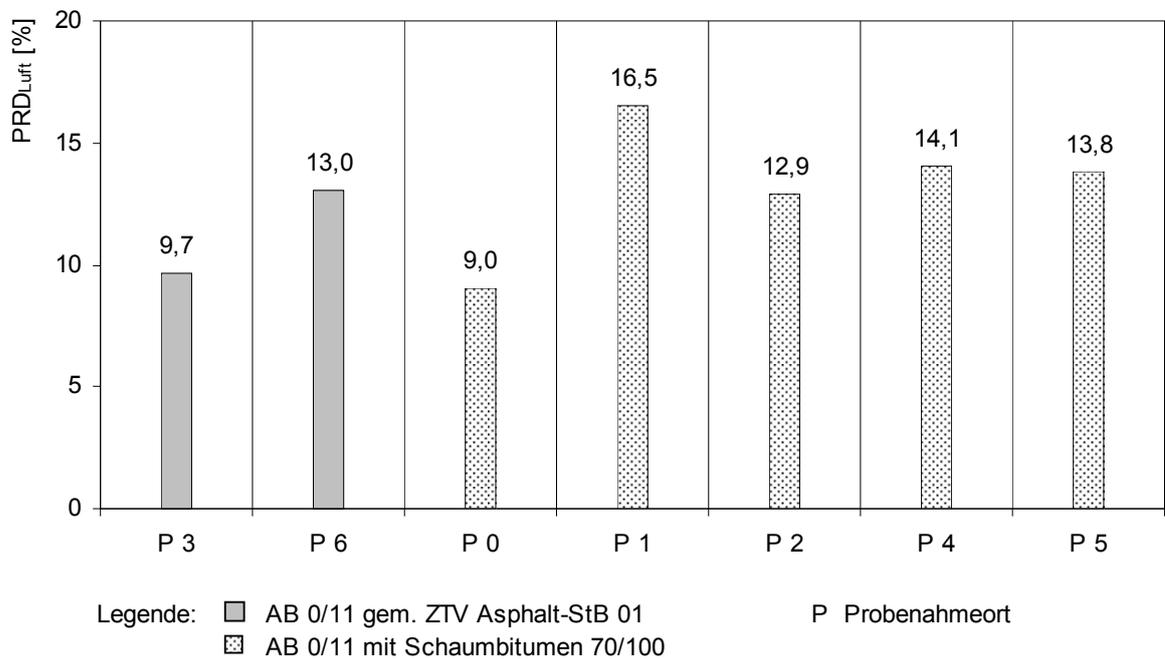


Bild 62: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft}

Mit Ausnahme der Untersuchungsergebnisse der Mischgutprobe des Probenahmeorts 1 sind demnach die Werte der Spurbildungsrate WTS_{Luft} und die der proportionalen Spurrinnentiefe PRD_{Luft} des Referenzasphalts und des Schaumbitumenasphalts

identisch, und das Gebrauchsverhalten des großtechnisch hergestellten Schaumbitumenasphalts entspricht somit dem des Referenzasphalts.

Wie bereits oben erwähnt, ist ein Jahr nach dem Einbau beim Gebrauchsverhalten kein Unterschied zwischen dem Referenzasphalt und dem Schaumbitumenasphalt erkennbar.

Griffigkeit

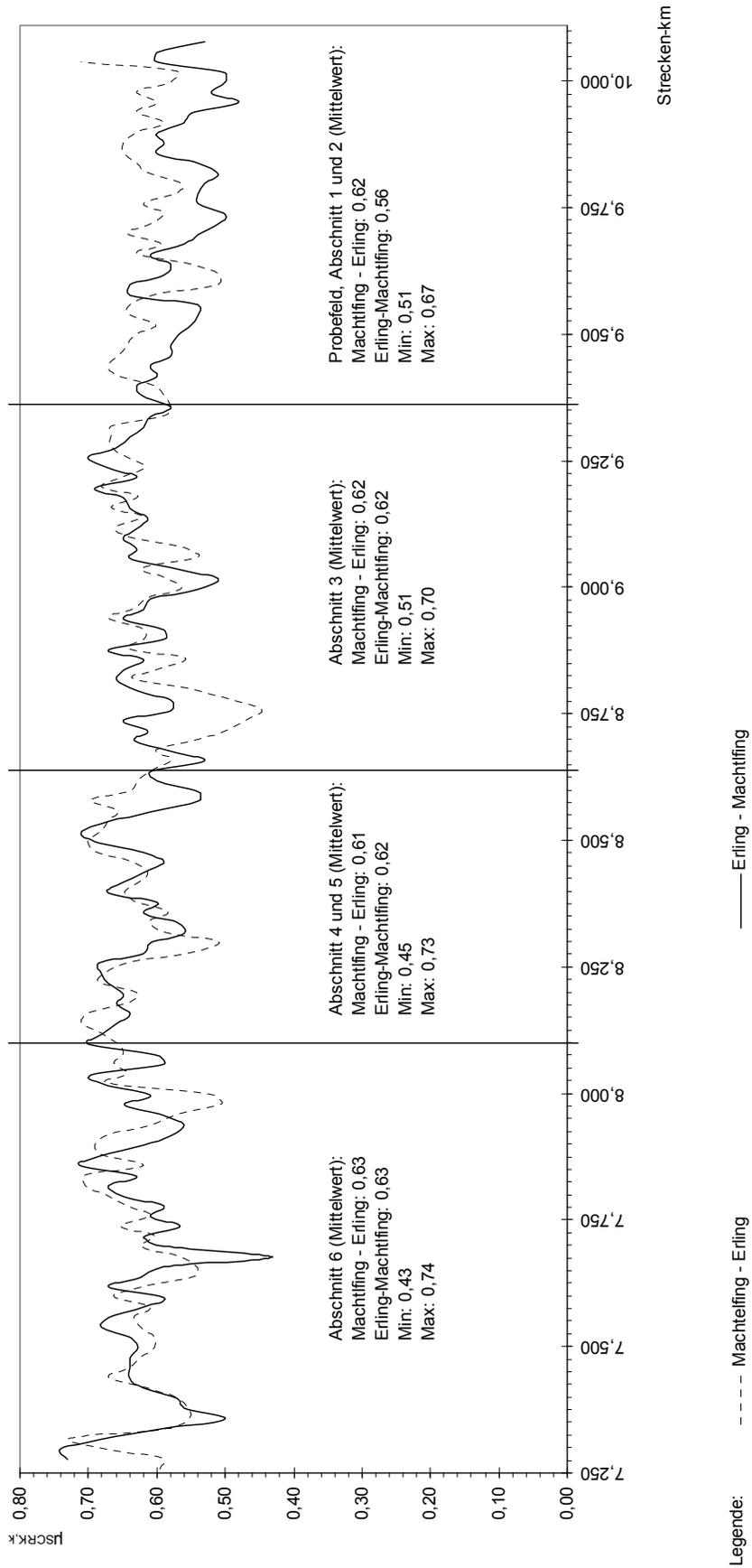
Zusätzlich wurden an der Teststrecke Griffigkeitsmessungen nach dem SKM durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind je Abschnitt (siehe Bild 2) in Bild 63 wiedergegeben.

Die Griffigkeitswerte der „Schaumbitumenasphalt-Fahrbahnoberfläche“ entsprechen mit 0,56 (Probefeld, Abschnitt 1 und 2) und 0,62 (Abschnitt 4 und 5) den Griffigkeitswerten der „Referenzasphalt-Fahrbahnoberfläche“, die zwischen 0,61 (Abschnitt 3) und 0,63 (Abschnitt 6) liegen.

Bezieht man die minimalen und maximalen Griffigkeitswerte mit ein, so ist kein Unterschied zwischen der Fahrbahnoberfläche aus Schaumbitumenasphalt und der aus Referenzasphalt erkennbar. Beim Referenzasphalt liegt der maximale Griffigkeitswert der Oberfläche bei 0,74, der minimale Wert bei 0,43 und beim Schaumbitumenasphalt bei 0,73 bzw. 0,45.

Eine weitere vor Ablauf der Gewährleistung vorgeschlagene Griffigkeitsmessung wird zeigen, ob zwischen der Fahrbahnoberfläche des Schaumbitumenasphalts und der des Referenzasphalts Unterschiede auftreten, beispielsweise aufgrund von Bindemittelanreicherungen an der Oberfläche durch Nachverdichtung unter Verkehr.

Die Einzelmessergebnisse sind in Anhang 19 zusammengefasst.



8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die wichtigsten Untersuchungsbefunde des Forschungsvorhabens stichpunktartig zusammengefasst:

Teil 1: Bindemitteluntersuchung

- Die maximale Expansionsrate und die längste Halbwertszeit konnte bei den Proben ohne Additiv bei der Prozessparametereinstellung: 5 bar Luftdruck, 6 bar Wasserdruck und 4 % Wasserzugabe, erreicht werden.
- Die von der Lieferraffinerie und Bitumensorte abhängige Expansionsrate liegt bei den ohne Additiv untersuchten Proben der Sorte 50/70 im Bereich von 18,3 bis 23,7 und bei den ohne Additiv untersuchten Proben der Sorte 70/100 im Bereich von 16,0 bis 24,7.
- Die von der Lieferraffinerie und Bitumensorte abhängige Halbwertszeit liegt bei den ohne Additiv untersuchten Proben der Sorte 50/70 zwischen 5,3 Sekunden und 8,2 Sekunden und bei den ohne Additiv untersuchten Proben der Sorte 70/100 zwischen 4,1 Sekunden und 5,9 Sekunden.
- Durch die Zugabe des Additivs konnte die Expansionsrate geringfügig erhöht und die Halbwertszeit wesentlich verlängert werden.
- Eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss des Aufschäumens auf die Prüfergebnisse „Nadelpenetration“ ist nicht möglich, da die Unterschiede der Prüfergebnisse innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision und innerhalb der Vergleichspräzision liegen. Da aber die Prüfgröße bei allen untersuchten aufgeschäumten Proben im Vergleich zu den nicht aufgeschäumten Proben größer ist, kann man davon ausgehen, dass durch den Aufschäumprozess die Bitumenhärte geringfügig reduziert wird.
- Die Standarduntersuchung Erweichungspunkt Ring und Kugel lässt keine grundsätzlichen Aussagen über mögliche, durch den Aufschäumprozess hervorgerufene,

Veränderungen am Bitumen zu, da die Unterschiede der Prüfgrößen innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision und innerhalb der Grenzen der Vergleichspräzision liegen. Die Tatsache, dass alle Abweichungen positiv sind, bestätigt den unter dem vorangegangenen Spiegelstrich beschriebenen Befund.

- Die dynamische Viskosität der nicht aufgeschäumten Proben der Sorte 50/70 liegt im Bereich von 13,90 Pa·s bis 17,95 Pa·s und ist im Vergleich zu den Prüfergebnissen der Sorte 70/100 – diese liegen zwischen 8,20 Pa·s und 11,15 Pa·s – größer. Die dynamische Viskosität der mit/ohne Additiv aufgeschäumten Proben liegt bei der Sorte 50/70 im Bereich von 12,34 Pa·s bis 15,86 Pa·s und bei der Sorte 70/100 im Bereich von 7,56 Pa·s bis 10,25 Pa·s, das heißt, die Viskosität des Bitumens wird durch das Aufschäumen reduziert, was wiederum die oben beschriebenen Befunde bestätigt.
- Zur Herstellung des Mischguts der Untersuchungsteile 2 und 3 wurden die Sorte 50/70 und die Sorte 70/100 der Lieferraffinerie 2 verwendet, da diese unter Berücksichtigung aller Teilergebnisse die kleinsten Abweichungen zwischen nicht aufgeschäumten Bitumen und *ohne* Additiv aufgeschäumten Bitumen aufweisen.
- Stellt man je Lieferraffinerie und Sorte das Untersuchungsergebnis Expansionsrate und Halbwertszeit der im Schaumtest ermittelten Kenngröße gegenüber, so zeigt sich, dass die Ergebnisse des Schaumtests keinen Hinweis für eine Einteilung der Bindemittelsorten nach den Gruppen „für die Schaumbitumenherstellung gut geeignet“, „... geeignet“ und „... nicht geeignet“ liefern. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Ergebnis des Schaumtests und der bei der Schaumbitumenherstellung ermittelten Expansionsrate bzw. der Halbwertszeit abgeleitet werden. Somit eignet sich ein Prüfverfahren in Anlehnung an den Schaumtest der Firma STRABAG nicht zur Eingruppierung der Bindemittelsorten.

Teil 2: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor

- Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse der Prüfverfahren Verdichtbarkeit, Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper und Hohlraumgehalt an Probepplatten macht deutlich, dass zum einen eine Mischtemperatur zwischen 140 °C und 150 °C zur Herstellung des Schaumbitumenasphalts ausreicht und zum anderen bei einer

Verdichtungstemperatur von 110 °C bei den Marshall-Probekörpern der zulässige Hohlraugehalt nicht überschritten und bei den Probeplatten der erforderliche Verdichtungsgrad von 100 (± 1) % erreicht wird.

- Beim Referenzasphalt steigt die Marshall-Stabilität von 12,1 kN (PZ1) auf 15,7 kN (PZ 3) an, während beim Schaumbitumenasphalt die Stabilitäts-Werte von 8,1 kN (PZ 1) auf 9,3 kN ansteigen. Die Marshall-Stabilität S_M des im Labor hergestellten Schaumbitumenasphalts ist somit bei allen untersuchten Probekörperlagerzeiten niedriger als die Marshall-Stabilität des Referenzasphalts, liegen aber im praxisüblichen Bereich (8 bis 15 kN). Eine Aussage zur Gebrauchstauglichkeit ist mit diesen Befunden nicht möglich.
- Eine Abhängigkeit des Marshall-Fließwerts ist weder beim Schaumbitumenasphalt mit Fließwerten zwischen 4,8 mm (PZ 2) und 5,2 mm (PZ 3) noch beim Referenzasphalt mit einem bei allen Probekörperlagerzeiten gleichen Fließwert von 5,6 mm nachweisbar. Bei beiden Mischgutsorten liegen die Marshall-Fließwerte im praxisüblichen Wertebereich von 3 mm bis 7 mm.
- Im Gegensatz zum Referenzasphalt sind die Untersuchungsergebnisse des Schaumbitumenasphalts, wie Spurbildungsrate WTS_{Luft} und proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} von der Probekörperlagerzeit abhängig. Die Spurbildungsrate WTS_{Luft} liegt beim Referenzasphalt zwischen 0,11 mm/1.000 (PZ 2) und 0,19 mm/1.000 (PZ 1) und die des Schaumbitumenasphalts beträgt anfangs (PZ 1) bei 0,24 mm/1.000 und nach 21-tägiger Probekörperlagerzeit (PZ 3) 0,14 mm/1.000. Beim Referenzasphalt liegt die proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} unabhängig von der Probekörperlagerzeit im Bereich von 10,2 % (PZ 2) und 13,6 % (PZ 3), während beim Schaumbitumenasphalt die proportionale Spurrinnentiefe von 18,3 % (PZ 1) auf 13,6% (PZ 3) abnimmt. Hieraus folgt, dass die bei einer 21-tägigen Probekörperlagerzeit am Schaumbitumenasphalt ermittelte Spurbildungsrate und proportionale Spurrinnentiefe mit den Untersuchungsergebnissen des Referenzasphalts gleichgesetzt werden können.
- Beim Schaumbitumenasphalt steigt die indirekte Zugfestigkeit von 3,21 MPa (PZ 1) auf 3,48 MPa (PZ 3), während beim Referenzasphalt eine Abhängigkeit von der

indirekten Zugfestigkeit – diese liegt im Bereich zwischen 3,52 MPa (PZ 1) und 3,66 MPa (PZ 2) – nicht erkennbar ist. Beträgt der Unterschied zwischen Referenz- und Schaumbitumenasphalt anfangs 0,37 MPa (PZ 1), so vermindert sich die Differenz nach 21 Tagen auf 0,18 MPa. Aufgrund der geringen Unterschiede können beide Mischgutsorten, Schaumbitumenasphalt und Referenzasphalt, als gleichwertig betrachtet werden.

- Eine Abhängigkeit der Ergebnisse der Prüfung der Wasserempfindlichkeit ITSR von der Probekörperlagerzeit ist beim Referenzasphalt und beim Schaumbitumenasphalt erkennbar. Das Prüfergebnis des Referenzasphalts bzw. Schaumbitumenasphalts liegt anfangs bei 96,8 % bzw. 97,1 % (PZ 1) und fällt mit zunehmender Probekörperlagerzeit auf 76,1 % bzw. 65,0 % (P 3). Die Differenz zwischen den Ergebnissen der beiden Mischgutsorten beträgt nach der Probekörperlagerzeit 1 und 2 bei 0,3 % und nach Probekörperlagerzeit 3 bei 11,1 %. Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den untersuchten Mischgutsorten nach „norm- bzw. regelgerechter“ Probekörperlagerzeit (PZ 2) und 7-tägiger Probekörperlagerzeit (PZ 2) können die Prüfergebnisse als gleichwertig betrachtet werden.
- Beim Referenzasphalt nimmt die Dehnung ϵ nach 10.000 Belastungsimpulsen von 17,4 ‰ (PZ 1) auf 14,1 ‰ (PZ 2) und somit um 3,3 ‰ ab, während die Dehnung des Schaumbitumenasphalts mit 24,0 ‰ (PZ 1) und 17,4 ‰ (PZ 3) stärker von der Probekörperlagerzeit abhängt. Die Differenz zwischen den Werten „PZ 1“ und „PZ 3“ beträgt beim Schaumbitumenasphalt 6,6 ‰ und ist im Vergleich zum Referenzasphalt (3,3 ‰) doppelt so groß. Stellt man je Probekörperlagerzeit die ermittelte Dehnung des Referenzasphalts und des Schaumbitumenasphalts gegenüber, so wird deutlich, dass der Unterschied von 6,6 ‰ (PZ 1) auf 3,3 ‰ (PZ 3) abnimmt und sich die Ergebnisse des Schaumbitumenasphalts mit zunehmender Probekörperlagerzeit denen des Referenzasphalts immer mehr annähern.

Teil 3: Untersuchungen an großtechnisch hergestelltem Schaumbitumenasphalt und Einbau des Asphalts

- Ein Einfluss der Silolagerzeit auf die Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts konnte nicht nachgewiesen werden. Weder bei den Ergebnissen der Marshall-Prüfung (Stabilität, Fließwert) und den ermittelten Hohl-

raumgehalten am Marshall-Probekörper noch beim den Ergebnissen des Spurbildungsversuchs (Spurbildungsrate und proportionale Spurrinntiefe) war ein Einfluss der Silolagerzeit erkennbar.

- Die Mischtemperatur kann durch Einsatz von Schaumbitumen – die Mischtemperatur des Schaumbitumenasphalts lag zwischen 146 °C und 149 °C – im Vergleich zur praxisüblichen Mischtemperatur des Referenzasphalts (176 °C bis 180 °C) um ca. 30 °C (16 %) reduziert werden.
- Durch den Einsatz von Schaumbitumen konnte die praxisübliche Verdichtungstemperatur – diese lag zwischen 157 °C und 167 °C – um ca. 40 °C (26 %) auf 114 °C und 126 °C reduziert werden, ohne dabei den geforderten Verdichtungsgrad zu unterschreiten. Der Verdichtungsgrad des Referenzasphalts liegt im Bereich von 97,7 % und 98,7 % und der des Schaumbitumenasphalts zwischen 95,8 % und 99,7 %. Bei den mit Schaumbitumenasphalt hergestellten Deckschichtabschnitten wurden in 4 von 5 Abschnitten der gemäß *ZTV Asphalt-StB 01* geforderte Mindestverdichtungsgrad von 97,0 % eingehalten.
- Die indirekte Zugfestigkeit des Referenzasphalts (3,45 MPa bis 3,51 MPa) unterscheidet sich nicht von der indirekten Zugfestigkeit des Schaumbitumenasphalts (3,41 MPa bis 3,78 MPa). Beim großtechnisch hergestellten Mischgut ist somit eine Abhängigkeit der indirekten Zugfestigkeit von der Mischgutsorte nicht erkennbar.
- Die Spurbildungsrate WTS_{Luft} des Referenzasphalts liegt zwischen 0,09 mm/1.000 und 0,15 mm/1.000 und die des Schaumbitumenasphalts (ohne P 1) zwischen 0,09 mm/1.000 und 0,18 mm/1.000. Die proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft} beim Referenzasphalt liegt im Bereich von 9,7 % und 13,0 % und beim Schaumbitumenasphalt (ohne P 1) im Bereich von 9,0 % und 14,1 %. Demnach sind die Werte der Spurbildungsrate WTS_{Luft} und die der proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft} des Referenzasphalts und des Schaumbitumenasphalts identisch; das Gebrauchsverhalten des großtechnisch hergestellten Schaumbitumenasphalts entspricht somit dem des Referenzasphalts.

- Die Griffigkeitswerte der „Schaumbitumenasphalt-Fahrbahnoberfläche“ liegen im Bereich von 0,56 und 0,62 und entsprechen den Griffigkeitswerten der „Referenzasphalt-Fahrbahnoberfläche“, die zwischen 0,61 und 0,63 liegen.

8.2 Ausblick

Mit diesem Forschungsvorhaben konnte nachgewiesen werden, dass durch Einsatz von Schaumbitumen die in den *ZTV Asphalt-StB 01* festgelegten Misch- und Verdichtungstemperaturen reduziert werden können. Die Mischtemperatur von Schaumbitumenasphalt liegt im Bereich von 140 °C bis 150 °C und ist somit ca. 30 °C geringer als die praxisüblichen Temperaturen, die Verdichtungstemperatur kann durch Einsatz von Schaumbitumenasphalt um ca. 40 °C auf 110 °C reduziert werden, ohne dabei die Verarbeitbarkeit zu erschweren oder die Gebrauchstauglichkeit einzuschränken.

Während der Bearbeitung des Projekts ergaben sich weitere Fragen, die in weiteren Forschungsvorhaben behandelt werden sollten.

So sollte das „zeitabhängige“ Gebrauchsverhalten (das Gebrauchsverhalten des Schaumbitumenasphalts entspricht nach etwa 21 Tagen dem des Referenzasphalts), v. a. im Hinblick auf die Verkehrsfreigabe untersucht werden. Denkbar wäre die Zugabe eines hydraulischen Bindemittels, um das noch nach dem Einbau vorhandene Wasser zu binden und dadurch evtl. eine „frühere“ Standfestigkeit zu erhalten.

Da in diesem Forschungsvorhaben bewusst auf eine Asphaltgranulatzugabe verzichtet wurde (in der Praxis werden Asphaltbetondeckschichten aber überwiegend mit Asphaltgranulatzugabe hergestellt), müsste in einer weiteren Untersuchung Schaumbitumenasphalt mit Asphaltgranulat hergestellt werden und es müssten die möglichen Auswirkungen auf Verdichtbarkeit und Gebrauchstauglichkeit untersucht werden.

Auch sollte die optimale Verdichtung des Schaumbitumenasphalts auf praktischen Deckenbaustellen untersucht werden. Hierzu müsste auf weiteren Teststrecken Schaumbitumenasphalt mit verschiedenen Walzprogrammen (unterschiedliche Walzentypen und unterschiedlicher Anzahl an Walzübergängen) verdichtet werden.

Aufgrund der in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Befunde ist Schaumbitumen zur Herstellung von Niedrigtemperaturasphalt geeignet. Aus diesem Grund sollten weiterführende Untersuchungen an Schaumbitumenasphalt durchgeführt und zur Erfahrungssammlung weitere Teststrecken mit Schaumbitumenasphalt gebaut und über mehrere Jahre beobachtet werden.

Literaturverzeichnis

- BECKEDAL BECKEDAHL, Hartmut; KRASS, Klaus; STRAUBE, Edeltraud: *Straßenbau und Straßenerhaltung: Ein Handbuch für Studium und Praxis*. 7. Auflage, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2004
- D'ANGELO D'ANGELO, John; et al.: *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. FHWA-PL-08-007, February 2008
- GAUER GAUER, Peter K.; HAUSINGER, Norbert: *Optimierung der Prüfbedingungen des Spurbildungsversuchs: Forschungsbericht FE-Nr. 07.180/1997/EGB (im Auftrag des BMVBW)*. Regenstauf: 2001
- GERHARD GERHARD, Horst: *Niedrigtemperaturasphalt: Verwendung von Schaumbitumen*. In: asphalt (2004), Nr. 8, S. 6-10
- GÖTZ GÖTZ, Matthias: *Temperaturabsenkung von Asphalt*. In: Tiefbau (2006), Nr. 11, S. 600-602
- RADENBERG RADENBERG, Martin: *Temperaturabsenkung bei Asphalt: Grundlagen und Erfahrungen*. In: Tiefbau (2007), Nr. 5, S. 310-312
- SCHÄFFLER SCHÄFFLER, Hermann; BRUY, Erhard; SCHELLING, Günther: *Baustoffkunde: Aufbau und Technologie, Art und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung der Baustoffe*. 7. Auflage, Würzburg: Vogel Verlag, 1996
- STOPPKA STOPPKA, Bettina: *Einsatz von Schaumbitumen als Bindemittel für Asphalttragschichten aus pechhaltigem Straßenaufbruch und industriellen Reststoffen: (TV 2, FKZ 146 10 36)* Bochum: 2001
- WALLNER WALLNER, Bernd: *Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator*. Diss. Technische Universität München, 2003.
- WEHNER BRAND, Walter, et al.: *Baustoffe, Bauweisen, Baudurchführung*. In: Handbuch des Straßenbaus, Band 2, B. Wehner, et al. (Hrsg.). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 1977
- WIRTGEN 2001-a Wirtgen (Hrsg.): *Schaumbitumen – Laboranlage WLB 10*. (Firmenprospekt)
- WIRTGEN 2001-b Wirtgen (Hrsg.): *Schaumbitumen – das innovative Bindemittel für den Straßenbau*. Windhagen: Wirtgen, 2001

Regelwerke der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

- ALP A-StB, Teil 10 *Anleitung zur Prüfung von Asphalt (ALP A-StB) Teil 10: Bestimmung der Rohdichte von Asphalt mit Wasser*. Ausgabe 2003, FGSV 787/10
- ALP A-StB, Teil 11 *Anleitung zur Prüfung von Asphalt (ALP A-StB) Teil 11: Herstellung von Asphaltprobeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV)*. Ausgabe 2003, FGSV 787/11
- FGSV 2001 *Arbeitsanleitung für den Einsatz radiometrischer Geräte für zerstörungsfreie Dichtemessungen auf Asphaltsschichten*. Ausgabe 2001, FGSV 743
- M TA *Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt: M TA*. Ausgabe 2006, FGSV 766
- M KRC *Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau: M KRC*. Ausgabe 2005, FGSV 636

TL PmB	<i>Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen: TL PmB. Ausgabe 2001, FGSV 748</i>
TP Griff-StB	<i>Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Seitenkraftmessverfahren SKM: TP Griff-StB (SKM). Ausgabe 2007, FGSV 408/1</i>
ZTV Asphalt-StB 01	<i>Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt: ZTV Asphalt-StB 01. Ausgabe 2001 (mit Änderungen und Ergänzungen bis ARS 9/2005), FGSV 799</i>
ZTV T-StB 95	<i>Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau: ZTV T-StB 95. Ausgabe 1995/Fassung 2002, FGSV 999</i>

Normen

DIN 1996, Teil 4	<i>Prüfung von Asphalt: Herstellung von Probekörpern aus Mischgut. November 1984</i>
DIN 1996, Teil 7	<i>Prüfung von Asphalt: Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad. Dezember 1992</i>
DIN 1996, Teil 11	<i>Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete: Bestimmung der Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert. Juli 1981</i>
DIN 1996, Teil 20	<i>Prüfung von Asphalt: Herstellung von Asphaltmischgut im Laboratorium. Dezember 1992</i>
DIN EN 1426	<i>Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel: Bestimmung der Nadelpenetration. Ausgabe 1999-12</i>
DIN EN 1427	<i>Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel: Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring und Kugel-Verfahren. Ausgabe 1999-12</i>
DIN EN 12591	<i>Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel: Anforderungen an Straßenbaubitumen. April 2000</i>
DIN EN 12697-10	<i>Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 10: Verdichtbarkeit. März 2002</i>
DIN EN 12697-12	<i>Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörper. März 2004</i>
DIN EN 12697-22	<i>Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 22: Spurbildungstest. April 2004</i>
DIN EN 12697-23	<i>Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern. Oktober 2003</i>
DIN EN 12697-31	<i>Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 31: Herstellung von Probekörper – Gyrator-Verdichter. September 2004</i>
DIN EN 13305	<i>Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel: Spezifikationsrahmen für Hartbitumen für industrielle Anwendungen. Juli 2003</i>
DIN EN 52007-1	<i>Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Viskosität – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Auswertung. September 2006</i>

Abkürzungsverzeichnis

A	Auslenkung	[mm]
β	Neigungswinkel, Taumelwinkel	[°]
c_i	Korrekturfaktor je Marshall-Probekörper gem. <i>DIN 1996, Teil 11</i> , Tabelle 1	[-]
D	Geschwindigkeitsgefälle	[1/s]
d	Tag	[-]
d_i	Durchmesser des Probekörpers, auf 0,1 gerundet	[mm]
$d_{5.000}$	Spurrinntiefe nach 5.000 Belastungszyklen, auf 0,1 gerundet	[mm]
$d_{10.000}$	Spurrinntiefe nach 10.000 Belastungszyklen, auf 0,1 gerundet	[mm]
EP RuK	Zahlenwert des Erweichungspunkts Ring und Kugel	[°C]
Ex	Expansionsrate	[-]
η	Proportionalitätsfaktor, dynamische Viskosität	[Pa·s]
F	Last	[kN]
F_y	Seitenreibungskraft, auf 0,01 gerundet	[N]
F_z	Normalkraft (Radlast), auf 0,01 gerundet	[N]
H	Hohlraumgehalt des Probekörpers oder Ausbaustücks, auf 0,1 gerundet	[Vol.-%]
h	Stunde	[-]
H_b	berechneter Hohlraumgehalt, auf 0,1 gerundet	[Vol.-%]
h_G	Probekörperhöhe bzw. von der Anzahl der Gyrationen abhängige, gemessene Höhe des Gyrator-Probekörpers, auf 0,01 gerundet	[mm]
h_i	Höhe des Probekörpers, auf 0,1 gerundet	[mm]
h_{PP}	Probepplattenhöhe, auf 0,1 gerundet	[mm]
ITS_i	Indirekte Zugfestigkeit (Indirect Tensile Strength), auf 0,001 gerundet	[GPa]
ITSR	Verhältnis der durchschnittlichen indirekten Zugfestigkeiten (Indirect Tensile Strength Ratio), auf 0,1 gerundet	[%]
ITS_w	mittlere indirekte Zugfestigkeit der „nassen Probekörper“ (Indirect Tensile Strength, wet), auf 0,001 gerundet	[kPa]
ITS_d	mittlere indirekte Zugfestigkeit der „trockenen Probekörper“ (Indirect Tensile Strength, dry), auf 0,001 gerundet	[kPa]
k	Verdichtungsgrad des Ausbaustücks, auf 0,1 gerundet	[%]
k_{PP}	Verdichtungsgrad der Probepplatten	[%]
k_T	Temperaturkorrekturgröße in Abhängigkeit von der Fahrbahnoberfläche T_F	[-]
L_i	Höchstlast je Marshall-Probekörper (max. Stabilität), auf 0,1 gerundet	[kN]
m_1	Masse der Weithals-Standflasche mit Schliffaufsatz, auf 0,1 gerundet	[g]
m_2	Masse der Weithals-Standflasche mit Schliffaufsatz und Messprobe, auf 0,1 gerundet	[g]

m_3	Masse der Weithals-Standflasche mit Schliffaufsatz, Messprobe und Wasser, auf 0,1 gerundet	[g]
m_4	Trockenmasse des Probekörpers, auf 0,1 gerundet	[g]
m_5	Masse des in Wasser gelagerten Probekörpers unter Wasser, auf 0,1 gerundet	[g]
m_6	Masse des in Wasser gelagerten Probekörpers an Luft, auf 0,1 gerundet	[g]
m_7	Masse des in der Gyrator-Form vorhandenen Mischguts, auf 0,1 gerundet	[g]
$M_{S,i}$	Marshall-Stabilität je Marshall-Probekörper, auf 0,1 gerundet	[kN]
μ_{SKM}	mittlere Seitenkraftbeiwert	[-]
$\mu_{SKM,k}$	Korrigierter Seitenkraftbeiwert am schräglaufenden Rad im 1-m-Abschnitt, auf 0,01 gerundet	[-]
μ_{SKM}	Gemessener Seitenkraftbeiwert am schräglaufenden Rad im 1-m-Abschnitt, auf 0,01 gerundet	[-]
μ_y	Seitenkraftbeiwert am schräglaufenden Rad, auf 0,01 gerundet	[-]
NP	Zahlenwert der Nadelpenetration	[1/10 mm]
P	Probenahmeort	[-]
P_G	Verdichtungsdruck Gyrator	[GPa]
P_o	Oberlast	[kN]
P_u	Unterlast	[kN]
$P_{Z,i}$	Beim Bruch erreichte Höchstlast, auf 0,001 gerundet	[kN]
$PRD_{Luft,i}$	proportionale Spurrinnentiefe je Probekörper, auf 0,1 gerundet	[%]
PZ	Probekörperlagerzeit (Zeitspanne zwischen Probekörperherstellung und Versuchsbeginn)	[d]
r_G	Innenradius der Gyrator-Form, auf 0, 1 gerundet	[cm]
ρ_A	Raumdicke des Probekörpers oder Ausbaustücks, auf 0,001 gerundet	[g/cm ³]
$\rho_{A,A}$	Raumdicke des Ausbaustücks, auf 0,001 gerundet	[g/cm ³]
$\rho_{A,M}$	Raumdicke des Marshall-Probekörpers, der aus dem zugehörigen Asphaltmischgut hergestellt wurde, auf 0,001 gerundet	[g/cm ³]
ρ_R	Rohdicke des Asphaltmischguts, auf 0,1 gerundet	[g/cm ³]
ρ_w	0,997 [g/cm ³], Dichte des destillierten Wassers bei 25 °C	[g/cm ³]
s	Weg	[mm]
SZ	Silolagerzeit (Lagerzeit des Mischguts im Silo)	[h]
σ_o	Oberlast, einaxialer Dickschwellversuch	[N/mm ²]
σ_u	Unterlast, einaxialer Druckschwellversuch	[N/mm ²]
T_F	Fahrbahnoberflächentemperatur	[°C]
T_L	Lufttemperatur	[°C]
$T_{1/2}$	Halbwertszeit	[s]
τ	Schubspannung	[N/mm ²]
V_G	Umlaufgeschwindigkeit Gyrator	[1/min]
V_{ist}	Mittlere Geschwindigkeit im 20-m-Abschnitt, ohne Dezimalstelle	[km/h]

V_P	Volumen des kalibrierten Pyknometers bis zur Messmarke	[cm ³]
V_{soll}	Soll-Messgeschwindigkeit [km/h], ohne Dezimalstelle	[km/h]
V_t	Mittlere horizontale Schlittengeschwindigkeit	[m/s]
$WTS_{Luft,i}$	Spurbildungsrate je Probeplatte 10.000 Belastungszyklen auf 0,1 gerundet	[mm]
Index i	je Marshall-Probekörper bzw. je Probeplatte	

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Eignung von Produkten und Verfahren zur Temperaturreduzierung
- Tabelle 2: Variation der Prozessparameter zur Schaumbitumenherstellung
- Tabelle 3: Untersuchungsprogramm der Bindemitteluntersuchung
- Tabelle 4: Versuchsprogramm zur Ermittlung der minimal möglichen Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts
- Tabelle 5: Versuchsprogramm zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts
- Tabelle 6: Versuchsprogramm zur Ermittlung des Einflusses der Silolagerzeit auf die Verarbeitbarkeit und die Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts
- Tabelle 7: Mischgutzusammensetzung – AB 0/11 für Bauklasse IV
- Tabelle 8: Versuchsbedingungen und Versuchsordnung zur Ermittlung der dynamischen Viskosität
- Tabelle 9: Versuchsordnung und Versuchsbedingungen – Gyrator-Verdichter
- Tabelle 10: Versuchsordnung und Versuchsbedingungen – Spurbildungsversuch
- Tabelle 11: Einaxialer Druckschwellversuch – Parameter
- Tabelle 12: Standardisierte Messbedingungen (nach *TP Griff-StB*)
- Tabelle 13: Expansionsrate E_x und Halbwertszeit $T_{1/2}$ der Bitumensorte 50/70 (Bitumentemperatur: 170 °C bis 175 °C, Wassermenge 4 %)
- Tabelle 14: Expansionsrate E_x und Halbwertszeit $T_{1/2}$ der Bitumensorte 70/100 (Bitumentemperatur: 170 °C bis 175 °C)
- Tabelle 15: Misch- und Verdichtungstemperatur des Schaumbitumenasphalts
- Tabelle 16: Versuchsprogramm zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts
- Tabelle 17: Versuchsprogramm zur Ermittlung des Einflusses der Silolagerzeit auf die Verarbeitbarkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schaumbitumenasphalts
- Tabelle 18: Versuchsprogramm – Teststrecke

Bilderverzeichnis

- Bild 1: Mobile Schaumbitumen-Laboranlage (aus Wirtgen 2001-a)
- Bild 2: Teststrecke
- Bild 3: Schaumbitumenherstellung (nach WIRTGEN 2001-b)
- Bild 4: Expansionsrate (Ex) und Halbwertszeit ($T_{1/2}$)
- Bild 5: Verdichtungsform zur Herstellung eines Marshall-Probekörpers (aus *DIN 1996, Teil 4*)
- Bild 6: Prinzipskizze – Walzsektor-Verdichtungsgerät (nach *ALP A-StB, Teil 11*)
- Bild 7: Prinzipskizze – Nadelpenetration NP (aus BECKEDAHL)
- Bild 8: Prinzipskizze – Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK (aus BECKEDAHL)
- Bild 9: Abhängigkeit der dynamischen Viskosität η von der Belastungsdauer
- Bild 10: Pyknometer zur Bestimmung der Rohdichte (aus *ALP A-StB, Teil 10*)
- Bild 11: Gyrator-Verdichter (aus WALLNER)
- Bild 12: Probekörper während der Verdichtung (nach WALLNER)
- Bild 13: Abnahme des berechneten Hohlraumgehalts H_b in Abhängigkeit von den Gyrationen
- Bild 14: Druckvorrichtung (Marshall) – Prinzipskizze (aus WEHNER)
- Bild 15: Kraft-Verformungsdiagramm (aus *DIN 1996, Teil 11*)
- Bild 16: Prinzipskizze – Spurbildungsgerät (aus BECKEDAHL)
- Bild 17: Zunahme der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen
- Bild 18: Prinzipskizze – Indirekte Zugprüfung (aus *DIN EN 12697, Teil 23*)
- Bild 19: Brucharten (aus *DIN EN 12697, Teil 23*)
- Bild 20: Impulsbelastung – Druckschwellversuch (aus *TP A-StB, Teil: Druckschwellversuch*)
- Bild 21: Kriechkurve – Druckschwellversuch (nach *TP A-StB, Teil: Druckschwellversuch*)
- Bild 22: Schräglaufwinkel α , Seitenreibungskraft F_y und Normalkraft F_z (aus *TP Griff-StB*)
- Bild 23: Schnelltest – Bitumensorten 50/70 und 70/100
- Bild 24: Expansionsrate Ex und Halbwertszeit $T_{1/2}$
- Bild 25: Nadelpenetration der Sorte 50/70; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“
- Bild 26: Nadelpenetration der Sorte 70/100; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“
- Bild 27: Nadelpenetration der Bitumensorte 50/70: Differenz „nicht geschäumt minus mit/ohne Additiv geschäumt“
- Bild 28: Nadelpenetration der Bitumensorte 70/100: Differenz „nicht geschäumt minus mit/ohne Additiv geschäumt“
- Bild 29: Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 50/70; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“
- Bild 30: Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 70/100; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“
- Bild 31: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 50/70
- Bild 32: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv Erweichungspunkt Ring und Kugel der Bitumensorte 70/100
- Bild 33: Dynamische Viskosität der Sorte 50/70; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“
- Bild 34: Dynamische Viskosität der Sorte 70/100; „2 Stunden nach dem Aufschäumzeitpunkt“

- Bild 35: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv dynamische Viskosität der Sorte 50/70
- Bild 36: Differenz normal minus aufgeschäumt mit bzw. ohne Additiv dynamische Viskosität der Sorte 70/100
- Bild 37: Verdichtungskurven – Gyrator-Verdichter
- Bild 38: Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper H_{MPK}
- Bild 39: Hohlraumgehalt an Probeplatten H_{PP}
- Bild 40: Marshall-Stabilität S_M
- Bild 41: Marshall-Fließwert F_M
- Bild 42: Mittlere Spurbildungsrate WTS_{Luft}
- Bild 43: Proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft}
- Bild 44: Indirekte Zugfestigkeit ITS
- Bild 45: Wasserempfindlichkeit ITSR
- Bild 46: Dehnung ϵ nach 10.000 Belastungsimpulsen
- Bild 47: Silolagerzeit – Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper H_{MPK}
- Bild 48: Silolagerzeit – Marshall-Stabilität S_M
- Bild 49: Silolagerzeit – Marshall-Fließwert F_M
- Bild 50: Silolagerzeit – Spurbildungsrate WTS_{Luft}
- Bild 51: Silolagerzeit – Proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft}
- Bild 52: Teststrecke – Verdichtungsgrad
- Bild 53: Teststrecke – Mischtemperatur je Abschnitt
- Bild 54: Teststrecke – Verdichtungstemperatur je Probenahmeort
- Bild 55: Bohrkerne – Mittlere Schichtdicke
- Bild 56: Bohrkern – Spurbildungsrate WTS_{Luft}
- Bild 57: Bohrkern – Proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft}
- Bild 58: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Marshall-Stabilität S_M
- Bild 59: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Marshall-Fließwert F_M
- Bild 60: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Indirekte Zugfestigkeit ITS
- Bild 61: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Spurbildungsrate WTS_{Luft}
- Bild 62: Großtechnisch hergestelltes Mischgut – Proportionale Spurrinntiefe PRD_{Luft}
- Bild 63: Griffigkeitsmessungen

Anhangteil

- Anhang 1: Mischgutbegleitschein
- Anhang 2: Eignungsprüfung
- Anhang 3: Bindemitteluntersuchung; Untersuchungsergebnisse: Expansionsrate und Halbwertszeit
- Anhang 4: Bindemitteluntersuchung; Untersuchungsergebnisse: Nadelpenetration (NP)
- Anhang 5: Bindemitteluntersuchung; Untersuchungsergebnisse: Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK)
- Anhang 6: Bindemitteluntersuchung; Untersuchungsergebnisse: Dynamische Viskosität
- Anhang 7: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 1; Untersuchungsergebnisse: Verdichtbarkeit mit dem Gyrator-Verdichter
- Anhang 8: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 1; Untersuchungsergebnisse: Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper
- Anhang 9: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 1; Untersuchungsergebnisse: Hohlraumgehalt an Probeplatten
- Anhang 10: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 2; Untersuchungsergebnisse: Marshall-Prüfung
- Anhang 11: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 2; Untersuchungsergebnisse: Spurbildungsversuch
- Anhang 12: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 2; Untersuchungsergebnisse: indirekte Zugprüfung
- Anhang 13: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 2; Untersuchungsergebnisse: Wasserempfindlichkeit
- Anhang 14: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Schritt 2; Untersuchungsergebnisse: Einaxialer Druckschwellversuch
- Anhang 15: Asphaltmischgutuntersuchungen im Labor – Silolagerzeit; Untersuchungsergebnisse: Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper, Marshall-Prüfung, Spurbildungsversuch
- Anhang 16: Großtechnische Herstellung und Einbau; Untersuchungsergebnisse: Isotopsonde
- Anhang 17: Großtechnische Herstellung und Einbau – Bohrkerne; Untersuchungsergebnisse: Schichtdicke, Hohlraumgehalt, Verdichtungsgrad
- Anhang 18: Teststrecke – Mischgutproben; Untersuchungsergebnisse: Marshall-Prüfung, indirekte Zugfestigkeit, Spurbildungsversuch
- Anhang 19: Großtechnische Herstellung und Einbau; Untersuchungsergebnisse: Griffigkeitsmessungen