Arbeitsgemeinschaft
Industrieller Forschungsvereinigungen
„Otto von Guericke“ e.V

DEUTSCHES ASPHALTINSTITUT

Forschungsvorhaben des AiF/DAI 12549BR/1

Bindemittelgehaltsbestimmung unter besonderer Berücksichtigung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach DIN 1996 T. 6

Bearbeiter:

Dr. Ing. Dipl.-Chem. H. Fritsche

Projektleiter:

Dr. Ing. Dipl.-Chem. H. Fritsche

Prof. Dr.-Ing. habil. P. Pilz

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
Prüfstelle für bituminöse Baustoffe

Leiter: **Prof. Dr.-Ing. habil. P. Pilz**

Dresden, im Januar 2004

0. Kurzfassung

Die Bindemittelgehaltsbestimmung im Asphalt, welche sich aus der Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes und der des problematischen unlöslichen Bindemittelgehaltes zusammensetzt, werden im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht.

Die Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes erfolgt durch Extraktion sowohl aber vorwiegend nach dem Rückgewinnungsverfahren (DIN 1996-06A-W1-KR) als auch nach dem Differenzverfahren (DIN 1996-6A-D2-H(K).

Der unlösliche Bindemittelgehalt wird nach dem üblichen auf Erfahrungen (E) beruhenden Verfahren mit der Füllergleichung nach Anhang 8.2 berechnet.

Dieses Verfahren darf bei damit berechneten unlöslichen Bindemittelgehalten > 0,6 M.-% nicht angewendet werden. Des darf der unlösliche Bindemittel in Asphalten mit thermisch überbeanspruchten wie auch stark gealterten Bindemitteln nicht nach diesem Verfahren, welches nur eine Funktion des Füllergehaltes (< 0,09 mm) im Mineralgemisch des Asphaltes darstellt, berechnet werden. Werden Asphalte mit durch Zusätze modifzierten Bitumen untersucht, ist die Anwendbarkeit dieses Verfahrens von Fall zu Fall zu prüfen.

In den angeführten Fällen muß der unlösliche Bindemittelgehalt experimentell nach Anhang C der DIN 1996 T.6, einem recht aufwendigen, deshalb bisher nicht angewandten Verfahren bestimmt werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde dieses komplizierte Verfahren in Verbindung mit dem Zentrifugenverfahren Z zur Separierung mehlfeiner mineralischer Bestandteile in der Bitumenlösung zunächst für sogenannte Modell-Asphalte und Bitumen-Mineralstoff-Mischungen unterschiedlicher Kornklassen mit je sechs bzw. sieben straßenbauüblichen sächsischen Gesteinen angewendet.

Um den Einfluß der Zeit (sofort und Lagerung) und der thermischer Beanspruchungen (5 h bei 163 °C) zu simulieren, wurde die Asphaltanalyse bzw. die Extraktion nach diesen unterschiedlichen Vorgeschichten durchgeführt.

Die Vielzahl der Untersuchungen führte zu folgenden Ergebnissen:

Beim Vergleich des experimentell ermittelten unlösliche Bindemittelgehaltes und des empirisch berechneten ergaben sich z.T. gravierende Unterschiede.

Der mit der Füllergleichung berechnete Wert liegt bis auf einige wenige Ausnahmen (ein Gestein) bzw. einzelner thermisch beanspruchter Varianten wesentlich höher als der experimentell bestimmte.

Die sechs unterschiedlichen Mineralstoffe bzw. –gemische unterscheiden sich deutlich in ihrem „Bitumenschluckvermögen".
Die Wirkung der zwei verwendeten Lösemittel, des an sich nur geplanten Toluols, verbunden mit Kaltextraktion und des kostenneutral ergänzten Trichlorethylens, verbunden mit Heißextraktion unterscheidet sich deutlich.
Der mit Toluol-K ermittelte Wert des experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes ist größer als der mit Trichlorethylen-K bestimmte.
Das prozentuale Verhältnis von experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehalt zum empirisch berechneten, auch als Q_{unl} bezeichnet, liegt mit wenigen Ausnahmen z. T. weit unter 100 %.
Die Untersuchungen an zwölf Praxisgemischen, darunter drei Asphaltgranulaten unterschiedlichen Alters, sollen diese Thesen bestätigen oder auch negieren.
Jedes der Praxisgemische- Asphaltsorten und -arten, die sich durch die eingesetzten Mineralstoffe, die verwendeten Bindemittel unterscheiden, mit und ohne Asphaltgranulatzusatz ,- werden einer mindesten 10fachen Analyse durch Kaltextraktion mit Toluol unterworfen, ergänzt durch eine zweifache Analyse -Heißextraktion mit Trichlorethylen.
Die oben angeführten Ergebnisse bestätigen sich.
Der experimentell ermittelte Bindemittelgehalt liegt ausnahmslos bei allen Untersuchungen niedriger als der mit der Füllergleichung berechnete.
Die bei der in der Praxis üblichen Heiß(Kalt)extraktion mit Trichlorethylen für den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt erhaltenen Werte liegen deutlich niedriger als die bei der Kaltextraktion mit Toluol ermittelten.
Die zwölf eingesetzten unterschiedlichen Bindemittel scheinen keinen wesentlichen Einfluß auf den unlöslichen Bindemittelgehalt zu haben.
Nicht der Füllergehalt, weder die übliche Kornklasse < 0,09 mm als auch 0,063 mm, sondern die Art der Gesteine bzw. der Mineralstoffgemische im Asphalt, vier davon auch bei den Modell-Gemischen untersucht, haben einen entscheidenden Einfluß auf den experimentell bestimmten Gehalt an unlöslichem Bindemittel. Sie unterscheiden sich deutlich (Q_{unl} von 20 % bis zu 80 %).
Als Alternative zur komplizierten und aufwendigen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach Anhang C wird das Verfahren nach dem Sythese-Analyse–Prinzip, kurz SAP genannt, in jedem RAP-Stra zugelassenem Labor durchführbar, vorgeschlagen.

Im Rahmen der Eignungsprüfung wird die der Mischanlage vorgeschlagene Mischung gravimetrisch exakt nachvollzogen, d.h. die vorgeschlagenen Komponenten (Bindemittel und Lieferkörnungen der Mineralstoffe) werden nach Art/Sorte und Masse gemischt und ggf. eine gewisse Zeitdauer heiß gelagert, zur Simulation der Zeitdauer ausgehend vom Mischen an der Mischanlage bis zum Einbau.

Anschließend wird Asphalt einschließlich Mischwerkzeugen entweder mit Toluol oder Trichlorethylen kalt erschöpfend extrahiert, die mineralischen mehlfeinen Stoffe aus der Bitumenlösung separiert und das lösliche Bindemittel im Rotationsverdampfer zurück-gewonnen.

Die Masse des zurückgewonnenen löslichen Bindemittels wird festgestellt, die Masse an vor dem Mischen der Referenzmischung eingewogenen Bindemittel ist bekannt.

Die Differenz beider ergibt die Masse des unlöslichen Bindemittels bzw. den unlöslichen Bindemittelgehalt im für die Eignungsprüfung rezeptierten Asphalt.

Die mit dem SAP-Verfahren ermittelten Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt stimmen gut mit den nach Anhang C ermittelten überein.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
0.	Kurzfassung	1-III
1.	Aufgabenstellung	1
1.1	Begründung des Forschungsvorhabens	1
1.2	Ziel des Forschungsvorhabens	2
1.3	Allgemeine Angaben	3
2.	Bindemittelgehaltsbestimmung Historie und Literatur	4
2.1	Historische Entwicklung in Deutschland unter Berücksichtigung der TGL der ehemaligen DDR sowie der Schweizer Norm	4
2.2	Zukünftige Entwicklung – Europäische Normung DIN EN 12 697 –1 4/2001	18
2.3	SUPERPAVE	20
3.	Ausgangsmaterialien für Untersuchungen an Modell-Asphalten, Bindemittel-Mineralstoff-Gemischen unterschiedlicher Kornklassen und für Untersuchungen von Praxisgemischen	26
3.1	Bindemittel	26
3.2	Mineralstoffe	26
3.3	Asphaltsorten, -arten	27
3.4	Asphaltgranulate	28
4.	Untersuchungen zu ausgewählten Ausgangstoffen	29
4.1	Bindemittel	29
4.2	Mineralstoffe	33
4.3	Asphaltgranulat	35
5.	Voruntersuchungen zur Bindemittelgehaltsbestimmung einschließlich Korngrößenverteilung und Untersuchung der zurückgewonnenen Bindemittel an Modellasphalten und Bitumen-Mineralstoff-Gemischen unterschiedlicher Kornklassen	37
5.1	Theoretische Vorbetrachtungen allgemeiner Art	37
5.2	Zusammensetzung, Herstellung und Weiterbehandlung der Modell-Asphaltgemische vor der Untersuchung durch Extraktion	42
5.2.1	Modell-Asphaltbeton AB 0/11	42
5.2.2	Modell-Asphaltmastix AM 0/2	44
5.2.3	Bitumen-Mineralstoff-Gemische unterschiedlicher Kornklassen	44

		Seite
5.3	Extraktionsverfahren zur Bestimmung des löslichen und unlöslichen Bindemittelgehaltes	45
5.4	Alternative Methoden zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes	48
5.4.1	Untersuchungen zum Glühverlust	48
5.4.2	Synthese-Analyse-Prinzip SAP	49
5.4.2.1	Modell-Asphaltbeton AB 0/11	50
5.4.2.2	Modell-Asphaltmastix AM 0/2	53
5.5	Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach DIN 1996 T.6	55
5.5.1	des unlöslichen Bindemittelgehaltes	55
5.5.1.1	nach Abschnitt 8.2 der DIN 1996 T.6	55
5.5.1.2	nach Anhang C der DIN 1996 T.6 unter Berücksichtigung des Standes der heutigen Technik	55
5.5.2	des löslichen Bindemittelgehaltes und des Gesamtbindemittelgehaltes	64
5.6	Korngrößenverteilung der extrahierten Mineralstoffe	69
5.7	Ausgewählte Kennwerte der aus Modell-Asphalten zurückgewonnenen Bitumen	69
5.7.1	aus Modell-Asphaltbeton AB 0/11	69
5.7.2	aus Modell-Asphaltmastix AM 0/2	71
6.	Untersuchungen an neun Praxisgemischen und drei Asphaltgranulaten	78
6.1	Allgemeines	78
6.2	Bindemittelgehaltsbestimmung in Verbindung mit Korngrößenverteilung	80
6.2.1	Unlöslicher Bindemittelgehalt	80
6.2.1.1	Asphaltbinder 0/16 S mit PmB 25 A	81
6.2.1.2	Gußasphalt 0/11 S mit Bitumen 30/45	84
6.2.1.3	Splittmastixasphalt 0/11 S mit PmB 45 A	86
6.2.1.4	Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulatzusatz (AG 2)	88
6.2.1.5	Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen 70/100	90
6.2.1.6	Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70	92
6.2.1.7	Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulat AG 1	94
6.2.1.8	Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 65 A	96
6.2.1.9	Asphaltbinder 0/22 S mit Bitumen 30/45 und Asphaltgranulat AG 3	98

		Seite
6.2.1.10	Asphaltgranulat AG 1 mit PmB 45 A	100
6.2.1.11	Asphaltgranulat AG 2 (unbekannter Herkunft)	102
6.2.1.12	Asphaltgranulat AG 3	104
6.2.1.13	Bohrkerne längerer Liegedauer aus Asphaltbinder 0/16 S	106
6.2.2	Löslicher Bindemittelgehalt und Gesamtbindemittelgehalt	108
6.2.3	Korngrößenverteilung	113
6.3	Untersuchung der zurückgewonnenen Komponenten	117
6.3.1	der Bindemittel	117
6.3.2	der extrahierten Mineralstoffe	134
7.	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	137
8.	Zusammenfassung	144
9.	Literaturverzeichnis	148
10.	Verzeichnis der Tabellen	151
11.	Verzeichnis der Abbildungen	153
12.	Verzeichnis der Anlagen	158
13.	Symbole und Abkürzungsverzeichnis	161

Anlagen

1. Aufgabenstellung

Die Bestimmung des Bindemittelgehaltes in Asphaltmischgut sowie in Ausbauproben als Maßstab für die fertige Leistung ist sowohl für den Hersteller des Mischgutes, die Asphaltmischanlage, den Einbaubetrieb und im weiteren Sinne den Eigen- und Fremdüberwacher sowie die als Kontrollorgan beauftragte Prüfstelle ein wichtiges Qualitätskriterium. Für Auftraggeber und -nehmer ist er vertragsrelevant. Im Vorfeld wird der Bindemittelgehalt durch eine Eignungsprüfung im Labor (RAP Stra) in Übereinstimmung mit dem zutreffenden Regelwerken, der ZTV Asphalt-StB bzw. der ZTVT-StB, festgelegt und die Mischanlagen müssen sich daran orientieren.

1.1 Begründung des Forschungsvorhabens

Die zentrale Bedeutung für Asphaltdesigner, Asphalthersteller, Asphaltverarbeiter, Asphaltnutzer und Asphaltaufbereiter zwecks Wiederverwertung ist nicht zu bestreiten.
Die Bestimmung des Bindemittelgehaltes beruht auf der Extraktion des organischen Produktes Bitumen durch organische Lösemittel auf Kohlenwasserstoffbasis. Es kommen sowohl aromatische als auch chlorierte Kohlenwasserstoffe zum Einsatz. Es ist bekannt, daß nicht das gesamte ursprünglich eingesetzte Bitumen extrahiert werden kann. Deshalb wird das lösliche und das unlösliche Bitumen unterschieden. Welchen Anteil der unlösliche Bindemittelgehalt am Gesamtbindemittelgehalt ausmacht, ist die primäre Frage des Forschungsvorhabens.
Die Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes nach DIN 1996 T.6 ist relativ unproblematisch und kann sowohl direkt, d.h. durch Wiedergewinnung des Bindemittels nach der Extraktion als auch indirekt durch die Subtraktion der gesamten extrahierten vom löslichen Bindemittel befreiten Mineralstoffe von der eingesetzten wasserfreien Asphaltprobe als Differenz bestimmt werden. Während bei dem Rückgewinnungsverfahren das Bitumen substanziell vorliegt und für weitere Untersuchungen zur Verfügung steht, erhält man beim Differenzverfahren nur einen Rechenwert.
Allerdings ist die Anwendbarkeit der Norm auf Asphalte, in welchen durch Zusätze modifizierte Bindemittel, wobei die zum Zeitpunkt der Erstellung der Norm die in Entwicklung befindlichen PmB einzuordnen wären, eingeschränkt. Die Anwendbarkeit der Norm ist dann von Fall zu Fall zu prüfen.
Problematischer ist die Bestimmung des nicht ohne weiteres faßbaren unlöslichen Bindemittelgehaltes, der von den unterschiedlichsten Faktoren abhängen kann, so z.B. vom Alter des Asphaltes, von der Mischtemperatur, vom eingesetzten Bindemittel und vor allem

von den verwendeten Mineralstoffen, die ja im Asphalt die massemäßig überwiegende Komponente darstellen.

Ausnahmslos wird zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes der empirische Weg beschritten, d.h. es wird die hier als Füllergleichung bezeichnete Gleichung aus DIN 1996 T.6 Abschnitt 8 bzw. 8.2 verwendet. Sie orientiert sich, unabhängig von o.a. diversen Einflußfaktoren nur am Füllergehalt des Mineralgemisches im Asphalt und beruht auf „Berechnung aufgrund von Erfahrungswerten E". Diese jahrzehntelang benutzte einfache Lösung zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes soll hinterfragt werden.

Im Anhang C der genannten Norm wird ein experimentelles Verfahren beschrieben, mit welchem der unlösliche Bindemittelgehalt direkt bestimmt werden kann.

Die relativ komplizierte und aufwendige Durchführung des Verfahrens bewahrte es vor seiner Anwendung, obwohl für Zuschläge von > 0,6 M.-%, nach der Füllergleichung berechnet, das experimentelle Verfahren angewendet werden muß.

Unter Abschnitt 8.1 wird auch zitiert: "Der Gehalt an unlöslichem Bindemittel kann nach Anhang C bestimmt oder bei thermisch nicht überbeanspruchten und nicht zu stark gealterten Proben nach Abschnitt 8.2 bestimmt werden." Daraus ergibt sich die Frage, wie denn dann der unlösliche Bindemittelgehalt von Asphaltgranulaten, welche jahrelang dem Klima und Verkehr ausgesetzt waren, bestimmt werden sollte.

Wie sich die heute etablierten polymermodifzierten Bindemittel bezüglich des unlöslichen Bindemittelanteils verhalten, ist auch zu klären.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Es ist zu überprüfen, ob die Füllergleichung tatsächlich in der bisherigen Form mit Berechtigung angewendet werden kann. Ggf. wäre eine Modifizierung dieser Gleichung, möglicherweise durch eine veränderte Füllerdefinition, welche die Kornklasse < 0,063 mm anstatt 0,09 mm berücksichtigt, vorzunehmen.

Die Frage der Entwicklung von einfacheren alternativen experimentellen Verfahren zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes stand zur Debatte.

Es ist gesichert festzustellen, wie bei unterschiedlichsten Asphalten im weiteren Sinne, Mischgutsorten und –arten aus Mischanlagen und von Labormischungen, Bohrkernen nach längerer Liegedauer, Asphaltgranulaten, Modell-Asphalten, Bitumen-Mineralstoff-Mischungen von unterschiedlichen Kornklassen unter Einsatz von unterschiedlichen Bindemittelsorten und-arten, der auf der Berechnung nach Erfahrungswerten (E) bestimmte unlösliche Bindemittelgehalt sich zu dem nach Anhang C experimentell bestimmten Gehalt an

unlöslichem Bindemittel nach dem Zentrifugenverfahren Z verhält. Das als gleichwertig zu betrachtende Filtrationsverfahren F wurde ausgeklammert.

Es soll insbesondere der Einfluß der Zeit nach der Herstellung (Alter) des Asphaltes bis zur Untersuchung, der thermischen Beanspruchung des Asphaltes und der Art der eingesetzten Mineralstoffe bewertet werden.

Möglicherweise kann eine Zuordnung unterschiedlichen Mineralstoffe, aus Asphalt extrahiert, in Klassen getroffen werden, in solche, die wenig, mittelmäßig und stark Bitumen absorbieren "verschlucken" und unter gegebenen Bedingungen nicht wieder hergeben.

1.3 Allgemeine Angaben

Für die Untersuchungen zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes, des löslichen und des unlöslichen, wird generell das Rückgewinnungsverfahren W unter Verwendung von kaltem (K) Toluol (1) als Lösemittel zur Extraktion, entsprechend den Anforderungen an Schiedsanalysen und das Zentrifugenverfahren Z mit der Bezeichnung DIN 1996-06A-W1-KR-Z angewandt. Nur zum Vergleich wird auch die Heißextraktion mit Trichlorethylen, DIN 1996-06A-D2-H-Z berücksichtigt. Die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes erfordert nicht nur eine Bestimmung des Füllergehaltes sondern zwingend die Kenntnis der jeweils gesamten Korngrößenverteilungen der aus Asphalt extrahierten Mineralstoffe nach DIN 1996 T.14.

Es kommen sechs verschiedene Bitumensorten bzw. –arten zum Einsatz. Sechs bzw. sieben unterschiedliche Mineralstoffarten, jeweils bis zu sieben Kornklassen von Über- und Unterkorn befreit, werden für zwei Modell-Asphaltarten und Bitumen-Mineralstoff-Gemische der sieben Kornklassen verwendet.

Vier bzw. fünf dieser Mineralstoffarten werden in den zu untersuchenden Mischgütern von drei unterschiedlichen Mischanlagen und in großen Labormischungen eingesetzt.

Neun Mischgüter, die sich durch Art und Sorte unterscheiden, ohne und mit Asphaltgranulat werden untersucht. Drei Asphaltgranulate unterschiedlichen Alters, zwei davon mit Straßenbaubitumen und eines mit PmB, zwei mit bekannten Ausgangsstoffen, eines davon unbekannter Herkunft und Zusammensetzung, werden wiederholt ($n \geq 10$) nach oben genannten Referenzverfahren, ergänzt durch das Differenzverfahren, untersucht.

Auch Bohrkerne längerer Liegedauer eines zum Zeitpunkt der Herstellung untersuchten Gemisches werden berücksichtigt.

Die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes wird nach dem Stand der heutigen Technik bei Modifikation des Anhanges C der DIN 1996.T.6 mit einem EURO Elemental Analyzer EA 3000 durchgeführt.

2. Bindemittelgehaltsbestimmung Historie und Literatur

2.1 Historische Entwicklung in Deutschland unter Berücksichtigung der TGL 20801 Blatt 4 sowie der Schweizer SN 671 955a

Bereits ein Dreiviertel Jahrhundert existieren in Deutschland Regelwerke zur Prüfung von Bitumen, Teer sowie Mineralstoffen und Asphalt, welche die DIN 1995 /1/ aus dem Jahre 1929 beinhaltet. Ein ausgiebiger Streifzug in die Vergangenheit lohnt sich.

Im Teil I dieser Norm sind die Vorschriften für die Prüfung von Asphalt, wobei hier Bitumen zu verstehen ist, (I A Prüfverfahren für Asphalt – tatsächlich gemeint ist Bitumen) und Teer (I B Prüfverfahren für Teer und Pech) als reine Bindemittel, vergleichbar mit den derzeit in DIN EN 12591 enthaltenen Prüfverfahren. Der Teil II, bezeichnet mit, "Vorschriften für die Prüfung von Asphalt (Bitumen) und Teer enthaltenden Massen", enthält die zutreffenden Prüfverfahren, nach heutiger Lesart Prüfung von Asphalt gemäß DIN 1996 bzw. entsprechend den noch nicht gültigen europäischen Normen der Reihe DIN EN 12697, wobei im Teil II C die Prüfverfahren für Mineralmassen, vergleichbar mit der TP Min-StB integriert sind, was aus dem Titel nicht explizit hervorgeht. Im Teil II D sind die "Prüfverfahren für Asphalt und Teer enthaltende Massen" beschrieben, wobei in II DI mechanisch-physikalische Prüfverfahren und II DII chemische Prüfungen untergliedert wird.

Unterpunkt 1 von II DII ist die Bestimmung des Gehaltes an löslichen Bindemitteln (Bitumen und Teer) und Unterpunkt 2 von II DII die Bestimmung des Gehaltes an unlöslichen organischen kohleähnlichen Stoffen fixiert.

Die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften des aus den Massen (Asphalt) gewonnenen Asphaltes (= Bitumens) oder Teeres sind im II DII Unterpunkt 8 beschrieben.

Der Teil II E beinhaltet die Prüfverfahren von Asphalt (Bitumen)- und Teer-Emulsionen, welche im Rahmen des Berichtes nicht von Interesse sind.

Die Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes ist unter anderen am Asphaltfeinbeton, Gußasphalt und Mastix auszuführen. Folgende Vorgehensweise ist beschrieben:

Zunächst erfolgt eine Zerkleinerung des Asphaltes in Korn (Granulat) < 0,2 mm. Es wird abgesiebt und 10 g des Siebdurchganges von Asphalt in eine Extraktionshülse (Soxleth – damalige Schreibweise) gefüllt und anschließend in einem Soxleth- oder einem Graefegerät mit Chloroform $HCCl_3$ als Lösemittel extrahiert, solange bis das Chloroform nach Stehen über Nacht nicht mehr gefärbt erscheint.

Anschließend wird das Lösemittel aus dem Extrakt abdestilliert. Der im Kolben befindliche Rückstand wird flächig verteilt und zunächst eine halbe Stunde auf einem siedenden

Wasserbad und anschließend eine Stunde in einem Trockenschrank bei 100 °C gehalten und gewogen. So wird das Lösliche, nebenher unvermeidlich feine Mineralstoffe, meist Calziumcarbonat und ggf. Ton, erhalten. Die mineralischen Beimengungen werden durch nochmaliges Lösen in Chloroform, quantitatives Überführen der Lösung in einen Porzellantiegel, Abdampfen des Lösemittels und Glühen bis zur Massekonstanz und Wägen bestimmt. Aus dieser ersten Wägung ergibt sich die Summe aus Branntkalk CaO und Ton. Anschließend wird der mineralische Rückstand mit ein paar Tropfen Schwefelsäure umgesetzt, getrocknet und wieder gewogen. Die zweite Wägung ergibt die Summe von $CaSO_4$ Kalziumsulfat und Ton. Aus der Massedifferenz der beiden Wägungen kann der ursprünglich enthaltene Calziumcarbonat- bzw. der Calziumoxidanteil berechnet werden. Wird letzterer (CaO) von dem Ergebnis der ersten Wägung subtrahiert, erhält man den Tonanteil.

Ein Verfahren zur Gewinnung von aschefreiem Löslichen nach Prettner ist in der Chemiker-Ztg 1909 Nr.33, S.917,926 beschrieben und beruht auf einer Umsetzung mit Äther-Salzsäure-Gemisch.

In DIN 1995 Teil I / 1 / ist des weiteren ein Vorverfahren beschrieben.

Das Vorverfahren (Teil I, S.2) beinhaltet eine Extraktion von Asphalt (mit einer Zange grob zerkleinert) im größeren Umfang, d.h. die Einwaage an Asphalt beträgt mindestens ein 1 kg, ggf. sogar mehrere Kilogramm unter Einsatz mehrerer Chargen, bei Grobstückigkeit und möglicher Inhomogenität des zu untersuchenden Asphaltes, um den Bindemittelgehalt einwandfrei zu ermitteln. Es wird hervorgehoben, daß "mit der Vorsicht völlig quantitativer Arbeit" vorzugehen ist. Eine völlige Wiedergewinnung des Bindemittels wird als unmöglich erachtet.

Die Extraktion wird in einem 2-l-Behälter mit aufgesetztem Rückflußkühler, Chloroform oder Schwefelkohlenstoff CS_2 als Lösemittel, unter Erwärmen und zeitweiligem Schütteln durchgeführt. Diese Art der Extraktion wird so oft durchgeführt, bis das Lösemittel farblos ist (eine 4 bis 5fache Ausschüttelung wird angeführt). Die jeweils überstehende Lösung von Bitumen in dem verwendeten Lösemittel wird vorsichtig in einen Standzylinder dekantiert. Damit sich feinkörnige Materialien absetzen können, läßt man die Lösung 48 Stunden ruhen. Die Lösung wird dann vorsichtig abgehebert. Die zurückgebliebenen mehlfeinen Mineralstoffe werden nochmals wiederholt in gleicher Art und Weise vom Bitumen befreit und ggf. abzentrifugiert. Aus den gesammelten Lösungen wird das Lösemittel über ein mit etwa 12 bis 15 cm hohes mit Glasperlen gefülltes Aufsatzrohr abdestilliert. Aus dem Rückstand werden auf einem siedenden Wasserbad unter Rühren Reste des Lösemittels entfernt.

Anschließend werden diverse Untersuchungen nach den Abschnitten A, B und C am zurückgewonnenen Bindemittel (Bitumen, Teer) sowie den extrahierten Mineralmassen durchgeführt.

Die Mineralstoffe werden fraktioniert nach folgenden Korngrößen 55; 45; 35; 25; 18; 12; 7; 2; 0,6; 0,2; 0,09; 0,06 mm, wobei den einzelnen Kornklassen bestimmte spezifische Oberflächen zugeordnet werden.

Tab. 1.1: Klasssifizierung der Mineralstoffe nach DIN 1995 von 1929 /1/

Nummer	Kornklasse	Spezifische Oberfläche	Material-bezeichnung
		m²/kg	
00	0/0,06	90,6	Steinmehl
0	0,06/0,09	32,0	
1	0,09/0,2	15,0	Sand
2	0,2/0,6	5,5	
3	0,6/2	1,75	
4	2/7	0,505	Grus
5	> 7	0,15	
	7/12		
6	12/18		Splitt
7	18/25		
8	25/35		
9	35/45		Steinschlag
10	45/55		

"Das Unlösliche bleibt bei der Extraktion nach II DII 1 innig vermischt mit den gesamten Mineralstoffen in der Extraktionshülse zurück. Nach dem Trocknen und Zerreiben der Mineralstoffe werden genau 2,5 g davon mit Salzsäure zersetzt."Anschließend wird über ein gewogenes Filter abfiltriert, mit heißem Wasser gewaschen und 2 h bei 105 °C getrocknet und gewogen. Die auf diese Weise erhaltenen carbonatfreien Mineralstoffe einschließlich Filter werden in einem vorab gewogenen Platintiegel verascht. Der Glührückstand wird abzüglich der Filterasche festgestellt. Wird diese Masse von der eingangs im Filter befindlichen, 2 h bei 105 °C getrockneten Masse subtrahiert, erhält man die unlöslichen organischen Bestandteile. Eine Umrechnung auf unlösliches Bitumen erfolgt nicht.

Im Jahre 1935 wurde die 2. Ausgabe der DIN 1995 als nun bereits DIN 1996 /2/ verfaßt. Sie besteht aus

Teil I Vorschriften für die Probenahme und Beschaffenheit

Teil II Vorschriften für die Untersuchung.

Hierbei soll nur auf die Gewinnung von Bindemittel aus Asphalt für weitere Untersuchungen und die Bestimmung des Bindemittelgehaltes orientiert werden.

Etwa 1 kg Asphalt, die Einwaage ist bei grobkörnigen Asphalten zu erhöhen, sind mit Schwefelkohlenstoff CS_2 zu behandeln. Dafür ist eine 2-l- Glas- bzw. Blechflasche mit einem Rückflußkühler zu verwenden, weil leichtes Erwärmen und Schütteln den Löseprozeß beschleunigt.

Die Bitumenlösung mit sämtlichen Mineralstoffen ist einige Stunden stehenzulassen.

Dann wird die Lösung vorsichtig abdekantiert. Ein Wiederholen dieses Prozesses erfolgt so lange, bis das Lösemittel CS_2 farblos erscheint, " nicht mehr gefärbt" ist.

Die gesammelten Extrakte sind 48 h stehenzulassen, damit sich die feinkörnigen Anteile absetzen. Die darüberstehende Flüssigkeit, weitgehend mineralstofffreie Bitumenlösung in CS_2 wird abgehebert. Der mineralische Rückstand wird nochmals mit CS_2 behandelt und zentrifugiert bzw. abgeschleudert.

Die Entfernung von CS_2 aus der Bitumenlösung geschieht durch Destillation mit einem Aufsatzrohr von 12 – 15 cm, welches mit Glasperlen gefüllt ist (Fraktionier-Kolonne). Es wird empfohlen, unter Sauerstoffausschluß und unter Vakuum zu arbeiten.

Das Bitumen ist mit wenig Lösemittel in eine flache Porzellanschale von 15 cm Durchmesser zu überführen und auf ein siedendes Wasserbad zu stellen. Dabei wird unter schwachem Rühren mit einem Glasstab die Entfernung von CS_2 Resten beschleunigt. Anschließend erfolgt das Aufschmelzen des Bitumens im Luftbad unter Rühren mit Stabthermometer. Ca.100 g zurückgewonnenes Bitumen werden ca. 5 Minuten auf 160 –170 °C erwärmt. Das Ende der Prozedur wird durch Netzrißbildung auf der Oberfläche des Bitumens angezeigt.

Das Soxhlet-Verfahren ist auch gestattet.

Unter der Bezeichnung U 52 (für grobkörnige U51) wird der lösliche Bindemittelgehalt quantitativ bestimmt.

10 bis 20 g Asphalt werden erschöpfend im Soxhlet extrahiert mit CS_2, Methylenchlorid, Benzol oder Trichlorethylen. Das Lösemittel ist abzudestillieren und die Auswaage erfolgt nach Trocknung der Substanz bei 100 °C bis zur Masssekonstanz

Der Bitumenrückstand wird mit wenig Lösemittel in einen Platintiegel überführt. Ein Glühen bis zur Massekonstanz schließt sich an. Um beim Glühen ggf. entwichenes CO_2 zu kompensieren, wird der Glührückstand mit einigen Tropfen Ammoniumcarbonatlösung NH_4CO_3 versetzt, so daß der entstandene Branntkalk zu Calciumcarbonat reagieren kann, und wird dann bei 150 °C getrocknet. Daraus ergibt sich die Gesamtasche.

Hermann /2/ kompensiert den Verlust an CO_2 durch Abrauchen mit konzentrierter Schwefelsäure und Umrechnung auf der durch Sulfatbildung erreichten Massezunahme auf Carbonat.

Unter U 53 werden die unlöslichen organischen Stoffe in den extrahierten Mineralstoffen bestimmt.

2 bis 5 g je nach Korngröße der extrahierten Mineralstoffmasse werden zerkleinert (Anm. des Verfassers - wie fein, ist nicht angegeben) und gut gemischt in einem Becherglas mit (kalter) 10 %iger HCl umgesetzt. Das Unlösliche wird über eine Asbestfilternutsche gefiltert und chlorfrei gewaschen, quantitativ in ein Platinschiffchen überführt und im Sauerstoffstrom nach dem bekannten Verfahren (Liebig und Lavoisier) unter Vorschaltung eines gewogenen nicht Kohlensäure absorbierenden Chlorcalzium-Röhrchens und eines genau gewogenen Kaligerätes verbrannt.

Aus dem gravimetrisch ermittelten Kohlendioxid CO_2 - Gehalt ergibt sich die Menge des organischen Kohlenstoffs. Hieraus berechnet sich das Unlösliche (Bitumen) durch Multiplikation mit dem Faktor 1,15.

In der 3. Ausgabe der DIN 1996 aus dem Jahre 1944 /3/ ändert sich formal nur die Gliederung.

Teil I	Vorschriften für Probenahme	
Teil II	Vorschriften für Beschaffenheit	
Teil III	Vorschriften für Untersuchung (Prüfverfahren)	S. 39 - 43

Jetzt beinhaltet allerdings U51 die Bestimmung des Wassergehaltes.

Unter U52 ist die Gewinnung von Bindemittel und Mineralmasse mit der Bestimmung des Gehaltes an löslichem Bindemittel enthalten. Es werden jetzt auch Hilfsstoffe und Geräte gesondert aufgelistet.

Für feinen Asphalt ist eine Probemenge von 10 g, für groben Asphalt eine Masse von 50 g vorgesehen. Als Lösemittel werden Benzol oder CS_2 eingesetzt. Die Heißextraktion ist auch zulässig, wenn sie lediglich zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes dient.

Die Trocknung des zurückgewonnenen Bindemittels nach Abdestillation des Lösemittels erfolgt bei 105 °C bis zur Massekonstanz. Nach der Veraschung eines aliquoten Teiles des zurückgewonnnenen Bitumens wird wiederum aus bereits o.a. Gründen Ammoniumcarbonat-lösung zugetropft.

Die Asche wird vom Bindemittelgehalt abgezogen und den Mineralstoffen zugeschlagen.

Bei Verwendung einer Einsatzschleuder erhält man eine praktisch aschefreie Substanz.

Sollen Eigenschaften des zurückgewonnenen Bitumens bestimmt werden, sind „gechlorte" (chlorhaltige) Kohlenwasserstoffe wegen Veränderung der Eigenschaften, Verhärtung des Bindemittels von der Verwendung ausgeschlossen.

Die Heißextraktion sollte mit Schutzgas z.B. CO_2 durchgeführt werden.

Die Kaltextraktion ist zu bevorzugen.

Die mittels Kaltextraktion gewonnene Bitumenlösung ist 24 h stehenzulassen, dann abzuhebern, der verbliebene Rückstand mit neuem Lösemittel wiederholt zu behandeln, und die Mineralstoffe sind zu trocknen.

Die Verwendung einer Einsatz- bzw. einer Durchlaufschleuder liefert reinere Extrakte. Der Aschegehalt ist dann in der Regel < 1 M.-% und kann bei der Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes ($B_{lös}$) vernachlässigt werden.

Die Fehlergrenzen werden mit ± 0,3 M.-% angegeben.

Unter U 53, Bestimmung des Gehaltes an Unlöslichem, werden Zuschläge für unlösliche organische Substanzen in den extrahierten Mineralmassen angeführt.

Für füllerfreie Asphalte beträgt der Zuschlag 0,0 M.-%.

Für füllerarme Asphalte und durch Heißextraktion gewonnene Mineralstoffe werden 0,2 M.-% und durch Kaltextraktion separierte Mineralstoffe 0,4 M.-% zugeschlagen.

Für füllerreiche Gemische z.B. Asphaltmastix oder auch Fugenvergußmassen werden bei einer Heißextraktion 0,7 M.-% unlösliches Bindemittel angenommen, bei Kaltextraktion sogar 1,0 M.-%.

Bei Schiedsanalysen ist das Unlösliche unbedingt experimentell nach o.a. Verfahren zu bestimmen.

Im Jahre 1966 /4/ wird die Bestimmung des Bindemittelgehaltes bereits unter der noch heute gültigen Bezeichnung DIN 1996 Teil 6 beschrieben.

Mit der Überarbeitung der 3. Ausgabe der DIN 1996 hat sich K. Bahlo /5/6/ befaßt.

Die Einwaage wird auf das 100fache des Zahlenwertes des Größtkorns festgelegt.

Bei der Rückgewinnung muß eine solche Menge von Asphalt extrahiert werden, daß mindestens 25 g lösliches Bindemittel anfallen. Es ist generell eine Doppelbestimmung durchzuführen.

Die Art der zu verwendenden Extraktionshülsen 37 x 205 DIN 12449 ist vorgeschrieben.

Zur Entfernung der in der Bitumenlösung befindlichen mehlfeinen Mineralstoffe ist eine Einsatzzentrifuge mit einer Umdrehungszahl von U > 3000 U/min und einem Volumen der Zentrifugenbecher von 100 ml einzusetzen. Sie muß so wirksam sein, daß der Glührückstand im zurückgewonnenen Bitumen < 1 M.-% ist.

Als Lösemittel können Benzol, Methylenchlorid und Trichlorethylen verwendet werden.

Bei *„innerbetrieblichen Untersuchungen mit geringen Ansprüchen an die Genauigkeit der Ergebnisse“* ist die Bestimmung des Gehaltes an Bindemittel auch dadurch möglich, daß nach Heiß- oder Kaltextraktion nur die gesamte Mineralstoffmenge ausgewogen wird und der

Bindemittelgehalt aus der Differenz gegenüber der Einwaage an wasserfreiem Asphalt berechnet wird.

Der Gesamtwassergehalt im Asphalt ist mit Xylol zu prüfen. Ist der Wassergehalt > 0,2 M.-%, ist auch der Wassergehalt der Mineralstoffe zu prüfen.

Bei der Berechnung des Bindemittelgehaltes ist der Gesamtwassergehalt abzüglich des in den extrahierten Mineralstoffen enthaltenen Wassers zu berücksichtigen.

Die Kaltextraktion wird durch leichtes Erwärmen und Umrühren beschleunigt.

Die abzentrifugierten Mineralstoffe sind dem Füller < 0,09 mm zuzuordnen.

Für die Rückgewinnung des Bitumens ist die Bindemittellösung bis auf 200 ml unter Atmosphärendruck einzuengen. Zur Kontrolle soll ein Temperaturfühler in das Bindemittel eintauchen.

Die Destillationsgeschwindigkeit ist mit 2 Tropfen / Sekunde festgelegt. Es ist langsam zu evakuieren und bei Trichlorethylen und Benzol ist auf 175 °C ± 5 °C, bei Methylenchlorid auf 130 °C ± 5 °C zu erwärmen. Das Endvakuum von 20 Torr ist 10 Minuten aufrechtzuerhalten.

Neu und zur vorhergehenden Fassung in Widerspruch ist die These, daß bei der Kaltextraktion ohne Einschränkung auf eines der angeführten Lösemittel, also auch der chlorhaltigen Lösemittel, die Bindemitteleigenschaften wie zuvor, d.h. nicht verändert sind.

Für Schiedsuntersuchungen ist der Aschegehalt bzw. Glührückstand des zurückgewonnenen Bindemittels zu bestimmen, der niedriger als 1,0 M.-% sein muß.

Folgende Arbeitsschritte sind für die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes beschrieben:

Die einzelnen Kornklassen sind nach dem Mengenverhältnis der ermittelten Korngrößenverteilung aufzumahlen auf eine Korngröße < 0,09 mm und zusammenzusetzen.

3 g dieses Gesteinsmehls < 0,09 mm werden mit 70 ml 15 M.%iger HCl mit einer Dichte von 1,18 g/ml umgesetzt, welche zur Entfernung des anorganischen Kohlenstoffs benötigt wird.

Die Mineralstoffe sind 90 Minuten mit dieser Säure unter Rückfluß zu kochen.

Für die Separierung der carbonatfreien HCl-unlöslichen Mineralstoffe ist entweder das Filtrations- oder das Zentrifugen-Verfahren anzuwenden.

Bei carbonatreichem Gestein sind 20 g des Gesteinsmehls mit 250 ml HCl einzusetzen.

Für das Zentrifugen-Verfahren sind 5 g Gesteinsmehl und 60 ml HCl zu verwenden.

Erstmalig wird eine Gleichung formuliert:

$$C_M = \frac{m_A \cdot K \cdot 0{,}2729}{E_M \cdot Q} \cdot 100 \quad \text{(jetzt Ausgabe10/1988)} \quad C_M = \frac{m_{A,M1} \cdot K \cdot 0{,}2729}{m_{E,M} \cdot m_{E,q}} \cdot 100 \quad (1)$$

Der Faktor von 0,2729 ergibt sich aus dem Verhältnis von CO_2 : C = 44 : 12 = 1 : 0,2729, der Umrechnung von gravimetrisch bestimmtem Kohlendioxid CO_2 zu Kohlenstoff C.

C_M Gehalt an organischem Kohlenstoff der vom Bindemittel befreiten Mineralstoffe in M.-% (damals Gew.-%)
m_A Auswaage der von Carbonaten befreiten Mineralstoffe in g (jetzt $m_{A,M1}$)
K Menge des gefundenen CO_2 in der Einwaage Q (jetzt $m_{E,q}$) in g
E_M Einwaage an vom Bindemittel befreiten Mineralstoffen in g (jetzt $m_{E,M}$)
Q Einwaage an von Carbonaten befreiten Mineralstoffen (jetzt $m_{E,q}$), d.h. aliquoter Teil von m_A (jetzt $m_{A,M1}$) in g

Die Multiplikation von C_M mit 1,18 anstatt mit 1,15 /2/ ergibt den unlöslichen Bindemittelgehalt im Asphalt.

Zuschläge für unlösliches Bindemittel werden mit geringen Abweichungen zur Vorgänger-Fassung am Füllergehalt F des Mineralgemisches festgemacht.

Für einen Gehalt von 1 bis 5 M.-% Füller im Mineralgemisch werden 0,1 M.-% B_{unl}

für 5 bis 15 M.-% Füller 0,2 M.-%,

für 15 bis 30 M.-% Füller 0,4 M.-%, und

für Füllergehalte von > als 30 M.-% werden 0,6 M.-%

für den unlöslichen Bindemittelgehalt im Asphalt zugeschlagen.

Die Summe der Massen aus löslichem zurückgewonnenen Bindemittel und zurückgewogenen Mineralstoffen muß unter Berücksichtigung von DIN 1996 Bl. 5 des ermittelten Wassergehaltes im Rahmen des Prüffehlers mit der Einwaage übereinstimmen.

Des weiteren wird angemerkt, daß Blindversuche, bei denen Bindemittelgehalt und -eigenschaften, welche zu überprüfen sind, durchgeführt werden müssen.

Das Ergebnis der Bindemittelgehaltsbestimmung ist auf 0,1 M.-% genau anzugeben.

Es werden erstmalig Grenzen für die Wiederholbarkeit von ± 0,1 M.-% absolut und die Vergleichbarkeit von ± 0,2 M.-% absolut eingeführt.

Wegen des relativ großen Aufwandes und des Zeitbedarfs für die Bindemittelgehalts-bestimmung wurde insbesondere für die Eigenüberwachung an Mischanlagen nach vereinfachten Methoden /7/8/9/ gesucht, wobei der unlösliche Bindemittelgehalt hierbei nicht berücksichtigt wird.

So wird der Bindemittelgehalt rechnerisch über die Rohdichte des Asphaltes bestinmmt, wobei die signifikanten Dichteunterschiede der Komponenten (Bitumen 1,00 –1,05 g/cm³, Mineralstoffe 2,50 –3,50 g/cm³) hilfreich sind. Bei kapillarporösen Gestein versagt jedoch diese Methode. Eine weitere Voraussetzung ist, daß an der Mischanlage Asphalte gleicher Rezeptur mit gleichen Mineralstoffen hergestellt werden.

Durch Farbtiefemessung von Bitumenlösungen unbekannter Konzentration mit einem Colorimeter wird Übereinstimmung mit Vergleichslösungen bzw. Standardlösungen hergestellt. Der Anwendungsbereich ist ebenfalls eingeschränkt, da sich herausgestellt hat, daß Lösungen gleicher Bitumensorte und gleicher Konzentration aber unterschiedlicher Provenienz unterschiedliche Farbtiefe ergeben können. Es muß folglich stets das gleiche Bindemittel zur Verfügung stehen, welches für die zu untersuchende Asphaltmischung eingesetzt wurde.

Des weiteren wird die Bestimmung des Bindemittelgehaltes durch Filtration der Bindemittellösung zur Abtrennung der mehlfeinen mineralischen Stoffe beschrieben, wobei jedoch bei Verwendung zu dichter Filter häufig ein Verstopfen der Filter eintritt und bei zu"weichen" Filtern die feinsten Mineralstoffe durchgelassen werden. Insbesondere hochmolekulare Anteile des Bitumens, die im Füller absorbiert wurden, wirken sich störend aus. Interessant ist folgender Aspekt, daß eine Bitumenlösung, welche im Nachhinein mit Steinmehl/Füller versetzt wurde, leichter filtrierbar war als Bitumenlösungen, die durch Auflösen einer Mischgutprobe gewonnen wurden. Enthält eine Probe Kalksteinmehl als Füller, wird eine leichtere Filtrierbarkeit festgestellt. In der Regel werden 3 bis 5 Filter (Kieselgur-Rundfilter N 287 Schleicher & Schüll, d = 15 cm) benötigt. Die mit dem abgeschiedenen Füller versehenen Filter werden getrocknet, gewogen und nach Abzug der Filtermasse den übrigen Mineralstoffen zugeschlagen. Der Bindemittelgehalt wird durch die Differenzmethode berechnet oder nach Entfernen des Lösemittels das Bitumen ausgewogen und nach der Rückgewinnungsmethode bestimmt.

Das Zentrifugieren wird als zu aufwendig und zu kostspielig für Mischanlagenlabors angesehen.

Die nächste Fassung der DIN 1996 /10/ stammt aus dem Jahre 1973.

Veränderungen sind, daß außer Benzol und Trichlorethylen sowie Methylenchlorid als Lösemittel auch Toluol verwendet werden darf.

Für die Bestimmung von Kennwerten des zurückgewonnenen Bitumens ist nur die Kaltextraktion mit Benzol erlaubt. Im Ausnahmefall und Nachweis von vergleichbaren Ergebnissen kann auch mit Trichlorethylen oder Methylenchlorid gearbeitet werden.

Es taucht zum ersten Mal eine empirische Gleichung zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes auf, vom Verfasser als Füllergleichung bezeichnet

$$U_B = 0{,}013 \cdot F + 0{,}1 \qquad (2)$$

Anm. des Verfassers: $U_B = 0{,}013 \cdot F_A + 0{,}1 = 0{,}013 \cdot F_M \cdot M/A + 0{,}1$ (3)

Hier bedeutet F noch Füllergehalt der Probe (des Asphaltes) in Gew.-% und U_B den Gehalt der Probe (des Asphaltes) an unlöslichem Bindemittel in Gew.-%.

Hier kann man davon ausgehen, daß unter Probe in beiden Fällen Asphalt gemeint ist.

Höhere Zuschläge als 0,6 Gew.-% für U_B müssen experimentell nachgewiesen werden.

Ein Beispiel als Anmerkung des Verfassers soll die Zusammenhänge darlegen:
In einem Asphalt mit 5 M.-% Bindemittel wären 10 M.-% Füller (F_A) enthalten, dann bedeutet das für den Füller F_M, bezogen auf das Mineralgemisch (Gl. 3), welches nur 95 M.-% des Asphaltes ausmacht, 10,5 M.-%. Um also ≤ 0,6 M.-% unlösliches Bindemittel im Asphalt zu akzeptieren, diesen Grenzwert zu unterschreiten, könnte der Füllergehalt im Mineralgemisch eines Asphaltes mit beispielsweise 10 M.-% (15 M.-%) Bindemittel F_M = 42,7 M.-% (45,2 M.-%) Füller betragen anstatt 38,5 M.-% an F_M unter der Annahme, daß sich beim Einsetzen dieses Wertes F_M = 38,5 M.-% in obige Gleichung (2) der unlösliche Bindemittelgehalt hier U_B, jetzt B_{unl}, im Asphalt ergäbe.

Die Einführung der Gleichung (2) wird begründet:
„Die Angabe des Zuschlages für unlösliches Bindemittel als stetige Funktion beseitigt Ungerechtigkeiten, die sich bei vertragsmäßiger Auslegung nach dem alten Prinzip eines gestuften Zuschlages ergaben".
In der Fassung von 1973 erfolgt auch eine Gleichstellung des Differenzverfahrens mit dem Rückgewinnungsverfahren. Die Prüffehler wurden in Anpassung an die internationale Normung in neuer Form als Prüffehler unter Wiederholbedingungen, unter Vergleichsbedingungen dargestellt und die zulässige Spannweite in Abhängigkeit von A (Siebrückstand in M.-% auf dem 11,2-mm-Sieb) eingeführt.
Besonderheiten der nachfolgenden Fassung 1980 /11/ sind, der Ausschluß von Benzol als Lösemittel im Vergleich zur Fassung 1973, die Einführung der Verfahrensbezeichnungen, die Einführung des Vakuumrotationsverdampfers /12/ zur Wiedergewinnung von Bitumen, welche sowohl aus einer Lösung mit Toluol oder auch mit Trichlorethylen erfolgen kann, alternativ zur Vakuumapparatur mit stehendem Destillierkolben. Der Vakuumrotationsverdampfer darf aber nicht für Schiedsanalysen eingesetzt werden. Eine Durchlaufzentrifuge /13/14/, welche so effektiv ist, daß der Aschegehalt bzw. Glührückstand nach DIN 52 005 < 1,0 M.-% im zurückgewonnenen Bitumen beträgt, ist zur Separierung der mineralischen Bestandteile der Bitumenlösung vorgesehen. Der Lösemittelkontakt mit der zu untersuchenden Probe ist auf maximal 24 Stunden eingeschränkt. Interessant ist, daß die extrahierten Mineralstoffe nicht bei 110 °C sondern bei 130 °C ± 5 °C bis zur Massekonstanz getrocknet werden müssen. Die Auswaage der Kolben mit dem zurückgewonnenen Bitumen kann sowohl kalt als auch warm getätigt werden, unter der Voraussetzung, daß der leere Kolben gleichartig gewogen wird. Das Differenzverfahren darf bei Schiedsanalysen nicht

angewendet werden. Bei der Prüfung der Eigenschaften des zurückgewonnenen Bindemittels muß Toluol zur Extraktion verwendet werden.

Die in Fassung 1966 /4/ eingeführte Gleichung (1) zur experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes, übrigens im Text der DIN1996 T. 6 von 1980 vor dem auch möglichen Verfahren zur Bestimmung durch Erfahrungswerte stehend, erscheint unverändert.

Die in der Fassung von 1973 eingeführte Füllergleichung zur empirischen Berechnung des Füllergehaltes wird übernommen mit dem gravierenden Unterschied, daß F den Füllergehalt des Mineralgemisches F_M darstellt und U_B den Gehalt der Probe an unlöslichem Bindemittel im Asphalt $B_{unl,emp,A}$.

Die in der Fassung der DIN 1996 T. 6 (10/1988) /15/ vorgenommenen Änderungen gegenüber 1980 sind für Belange des Forschungsvorhabens unbedeutend.

Erwähnenswert wäre nur, daß die extrahierten Mineralstoffe nun bei 110 °C ± 5 °C getrocknet werden und neue bzw. veränderte Symbole für den löslichen, den unlöslichen Bindemittelgehalt und die Gleichung zur experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes (Gl. 1) eingeführt werden.

In der Füllergleichung (Abschnitt 8.2 - $B_{unl} = 0{,}013*F + 0{,}1$) bedeutet noch immer

F = Füllergehalt in den vom Bindemittel befreiten Mineralstoffen (F_M) und

B_{unl} = unlöslicher Bindemittelgehalt im Asphalt ($B_{unl,emp,A}$)

In den Technischen Güte- und Lieferbedingungen der ehemaligen DDR wurde in einem Fachbereichstandard von 1969 TGL 20801 Blatt 4 /16/ das Prüfverfahren zur Bindemittelgehaltsbestimmung beschrieben. Es ist anzunehmen, daß bei der Erarbeitung die DIN 1996 Blatt 6 von 1966 eine Rolle gespielt hat, obwohl auch ein dem verbindlichen Standard entsprechender Entwurf der TGL aus dem Jahre 1965 existiert.

Wenn außer dem Bindemittelgehalt auch Kennwerte des löslichen Bindemittels bestimmt werden sollen, ist die Kaltextraktion mit Benzol als Lösemittel durchzuführen. Die Konditionen (z.B. Einwaage, Temperatur, Druck, Asche) entsprechen der genannten DIN 1996 T.6.

Bei der Heißextraktion kann das Bindemittel ebenfalls zurückgewonnen werden.

Als Lösemittel können außer Benzol auch Methylenchlorid, Trichlorethylen und Tetrachlorkohlenstoff eingesetzt werden.

Für eine Schnellextraktion zur Ermittlung der Menge des löslichen Bindemittels zur Rezepturüberwachung und Einbaukontrolle im Baustellenlabor werden drei Verfahren angeführt, welche Ergebnisse mit annähernd gleicher Genauigkeit ergeben.

Das Differenzverfahren ohne Rückgewinnung des Bindemittels wird als „indirektes Verfahren" bezeichnet und kann sowohl in Form der Kalt- als auch der Heißextraktion durchgeführt werden. Der Wassergehalt nach /17/ muß ermittelt werden und von der Einwaage vor Berechnung des löslichen Bindemittelgehaltes subtrahiert werden.
Des weiteren wird das Verfahren nach Shdanow zugelassen. Dabei wird eine vorgeschriebene Masse von Asphalt (50 g bei feinkörnigen Gemischen) in einen 500-ml-Meßzylinder, in welchem bereits ein bestimmtes Volumen an Lösemittel Benzol (250 ml) vorgelegt ist, eingebracht und 40 bis 50 Minuten stehengelassen unter zeitweiligem Schütteln. Nach dem Absetzen der Mineralstoffe werden mit einer graduierten Pipette 25 ml der überstehenden Lösung entnommen und in eine zuvor gewogene Porzellanschale überführt. Durch Erwärmen auf dem Wasserbad wird das Benzol entfernt. Der Rückstand ist anschließend bei 105 °C zu trocknen und zu wägen. Der lösliche Bindemittelgehalt ergibt sich nach folgender Gleichung

$$B_{(lös)} = \frac{A(250+10\cdot A)\cdot 100}{25\cdot E} \quad \text{in M.-\%} \qquad (4)$$

A = Bindemittelmasse in 25 ml Lösung in g

(Anm. des Verfassers: 10·A entspricht annähernd der Masse an Bindemittel in 250 ml Lösemittel, welche vereinfacht bei Annahme der Dichte des Bitumens von 1,000 g/cm³ als Volumen betrachtet wird, und in Summe mit dem Lösemittelvolumen von 250 ml annähernd das Gesamtvolumen der Lösung darstellt. Die Zahl 25 im Nenner der Gleichung ist das aliquote Volumen von 25 ml Lösung)

E = Einwaage der Asphaltprobe in g

Das dritte Verfahren stammt von P. Schulz. Hierbei werden 400 g der Asphaltprobe mit 300 ml Benzol in einer zu verschließenden Weithalsflasche versetzt und bis zum „ vollständigen" Lösen des Bindemittels etwa 60 Minuten ohne Erwärmen geschüttelt. Danach sind etwa 10 bis 15 ml der überstehenden Lösung zu entnehmen und zu zentrifugieren, um mehlfeine Mineralstoffe zu entfernen. Von der mineralstofffreien Lösung ist genau mit einer auf 0,01 ml graduierten Meßpipette 1,00 ml zu entnehmen. Diese Lösung ist auf ein mit einem Loch versehenes zuvor gewogenes Filter innerhalb von 1,5 Minuten gleichmäßig verteilt aufzutropfen. Das auf einem Glasstab befindliche Filter wird 2 Minuten im Luftstrom eines Ventilators (400 mm Abstand) getrocknet und auf 0,5 mg genau gewogen. Der Trockenprozeß wir nochmals über 30 Sekunden wiederholt, um eine Massekonstanz zu erreichen.

Nach folgender Gleichung wird der lösliche Bindemittelgehalt berechnet.

$$B_{(lös)} = \frac{300\cdot A\cdot d\cdot 100}{E\cdot(d-A)} \quad \text{in M.-\%} \qquad (5)$$

Bei etwas veränderter Schreibweise der Gleichung (5) wird diese verständlicher.

$$B_{(lös)} = \frac{300 \cdot A \cdot 100}{E(1 - A/d)} \text{ in M.-\%} \qquad (6)$$

A = Massezunahme des Filterpapiers (Masse des Bindemittels in 1 ml Lösung) in g

d = Dichteverhältnis des löslichen Bindemittels

(Anm. des Verfassers: Die Dichte, die hier wohl auch gemeint ist, muß in g/cm³ angegeben werden. Der Klammerausdruck im Nenner des Bruches bedeutet die Volumendifferenz aus 1 ml Lösung und des darin enthaltenen gelösten Volumens an Bitumen, gleichbedeutend einem aliquoten Lösemittelvolumen (< 1 ml) , einem Anteil von den eingesetzten 300 ml Benzol)

E = Einwaage der untersuchten Asphaltprobe in g

Der unlösliche Bindemittelgehalt wird experimentell ananlog bestimmt, der organische Kohlenstoffgehalt der Mineralstoffe mit dem Faktor 1,18 multipliziert. Für die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs im carbonatfreien Mineralstoff wird ein weiteres Verfahren, das Naßverfahren mit Chromsäure-Schwefelsäure-Gemisch nach Sernström und Corleis /18/ angeführt.

Empiriche Zuschläge für den unlöslichen Bindemittelgehalt sind in Abhängigkeit vom Füllergehalt des Mineralgemisches festgelegt,

1 bis 5 M.-% Füller führen zu einem Zuschlag von 0,1 M-%,

5 bis 15 M.-% - von 0,2 M.-%,

15 bis 30 M.-% von 0,4 M.-%,

30 bis 40 M.-% von 0,6 M.-% und

40 M.-% Füller zu einem Zuschlag von 0,8 M.-%

an unlöslichem Bindemittel.

In der Fassung der TGL 20801/04 von 1982 /19/ wird für Gemische, die Bitumen enthalten, einheitlich ein Zuschlag von 0, 1 M.-% für unlösliches Bindemittel angesetzt.

Für Schiedsanalysen ist der Mittelwert aus dem direkten (Rückgewinnungsverfahren) und aus dem indirekten (Differenzverfahren) zu ermitteln. Als Lösemittel werden nur noch chlorierte Kohlenwasserstoffe Trichlorethylen, Perchlorethylen und Methylenchlorid verwendet. Die Rückgewinnung erfolgt in einer Vakuumdestillationsapparatur bei 175 °C bei Tri- und Perchlorethylen bzw. bei 130 °C unter Verwendung von Methylenchlorid.

Die Bestimmung der Bindemitteleigenschaften des zurückgewonnenen Bindemittels entfällt, da auf die Verwendung von Benzol wegen Gesundheitsgefährdung verzichtet werden muß. Alle Extraktionsverfahren werden gleichgestellt.

Zur experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes wird kommentiert: "Da in den letzten Jahren keinerlei Erfahrungen mit der experimentellen Bestimmung der unlöslichen Bindemittelgehalte durch die im alten Standard angegebenen Verfahren

(Halbmikroanalyse) vorlagen und die Möglichkeiten dazu nicht gegeben sind, wurde auf die Angabe des Verfahrens verzichtet."

Die Schweizer Norm SN 671 955 a /20/ soll in diese Betrachtungen einfließen. Sie beinhaltet nur die Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes. Die Rückgewinnung aus feststofffreien Extraktionslösungen /21/ ist in einer weiteren Norm SN 670 510 festgelegt. Der lösliche Bindemittelgehalt wird durch Heiß- oder Kaltextraktion nur durch die Differenzmethode bestimmt. Als Lösemittel kommen Trichlorethan, Methylenchlorid oder Toluol in Betracht.

Der Bindemittelgehalt setzt sich aus dem löslichen und dem unlöslichen Bindemittelanteil zusammen. „Der unlösliche Anteil ist von der Zusammensetzung und dem Alter des Mischgutes, der Art der Mineralstoffe und der Bindemittelsorte abhängig" wird in dieser Norm festgestellt.

Als Richtwerte für den unlöslichen Bindemittelanteil im Asphalt werden für Füllergehalte von 6 bis 12 M.-% für Bitumen etwa 0,1 M.-% und bei gleichem Füllergehalt für Teer 0,4 M.% angenommen.

Für Füllergehalte von etwa 30 M.-% (Gußasphalt) werden 0,4 M.-% angeführt.

Der Füllergehalt bezieht sich hier auf das Mischgut, d.h. auf den Füllergehalt im Asphalt (F_A), nicht auf den Füllergehalt des vom Bindemittel befreiten Mineralstoffgemisches (F_M) wie in DIN 1996 T. 6 Abschnitt 8.2.

2.2 Zukünftige Entwicklung – Europäische Normung DIN EN 12697-1 4/2001 /22/

Diese Norm hat eine lange Geschichte. Bereits vor 10 Jahren (4/1994) erschien ein Entwurf noch unter der Bezeichnung „Work Item No 00227106 Binder content" unter Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Seit dieser Zeit gab es noch einige weitere Entwürfe, so z.B. als prEN 1980 von (6/1995) bezeichnet, später bereits mit pr EN12697-1 von 5/1998, 11/1998, 5/1999, 5/2000 (final draft).

Die nun vorläufig endgültige Fassung wird um einen Anhang D, der bereits im Entwurf in englischer Sprache vorliegt, erweitert werden. Dieser Anhang wird dann auch die bisher nicht enthaltene Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes von PmB beinhalten. Ursprünglich war ein gesonderte Teil der DIN EN 12697-44 geplant.

Parallel dazu existiert eine weitere Europäische Norm DIN EN 12697-39, in der der Bindemittelgehalt durch Verbrennung bestimmt wird, worauf hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Die 35 Seiten umfassende DIN EN 12697-1 /22/ beinhaltet eine Vielzahl von Verfahren zur Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes, die ich nur ohne Rücksicht auf Vollständigkeit aufzählen, nicht kommentieren möchte. Das Gewinnen der Bindemitteliösung aus der Asphaltprobe kann mit einem Heißextraktor und Papierfilter, mit Drahtsiebfilter, mit dem Soxhlet-Extraktor, bei Kaltextraktion mit einem Flaschenrollgerät (hier mit Flaschenzentrifuge bezeichnet), mit Schüttelmaschine oder Schütteln von Hand erfolgen. Die Abtrennung der feinen Mineralstoffe aus der Bitumenlösung durch Filtration mit Papier- oder Druckfilter, durch Zentrifugieren mit einer Durchlaufzentrifuge oder auch durch Einsatz von 2 Typen von Becherwerkszentrifugen Typ1 bzw. Typ 2, welche sich nur durch die Größe der Zentrifugenbecher (50 ml bzw. > 20 000 mm^3 nach Absatz B 2.4.1 der deutschen Fassung und > 20 000 m^3 der englischen Fassung- beides nicht glaubhaft –Anm. des Verfassers) und durch die Beschleunigung ($1,5*10^4$ m/s^2 bis $3,0*10^4$ m/s^2 bzw. > $4,0*10^4$ m/s^2) unterscheiden. Sowohl das Differenz- als auch das Rückgewinnungsverfahren mit Rotationsverdampfer bzw. Fraktionierkolonne nach DIN EN 12697-3 /23/ und DIN EN 12697-4 /24/ sind zur Bestimmung des löslichen Bindemittelgehaltes anwendbar.

Beim Rückgewinnungsverfahren kann der Bindemittelgehalt aus der gesamten mineralstofffreien Bindemittellösung wie auch aus einem aliquoten Teil der Bindemittellösung ermittelt werden, wobei in einem Falle von einem abgeschätzten Volumen v der Bindemittellösung als aliquote Menge und einmal von einer abgeschätzten Masse der Bindemittellösung ausgegangen wird. Im ersten Falle kann mit einem Rotationsverdampfer unter vorgegebenen

Bedingungen (Temperatur, Druck, Zeit) im zweiten mit einer Heizplatte oder einem Ofen das Lösemittel entfernt werden. Die Art des Lösemittels kann von jedem CEN-Mitglied selbst festgelegt werden.

Unter Abschnitt 3.2 wird der unlösliche Bindemittelgehalt definiert als der Masseanteil in %, welcher nach der Extraktion den Mineralstoffen „anhaftet"(welche von den Mineralstoffen absorbiert werden und durch Lösemittel nicht extrahiert werden können wird vom Verfasser ergänzt).

Unter Abschnitt A.4 werden zur Bestimmung des Gesamtbindemittelgehaltes Aussagen getroffen, welche teilweise nicht nachvollziehbar sind.

Nicht das Mischgut enthält unlösliche Bindemittelanteile sondern die aus dem Mischgut extrahierten Mineralstoffe, was unter einer Anmerkung unter 5.2.3.3 bestätigt wird. In einer Gleichung zur Berechnung des Gesamtbindemittelgehaltes wird auf die DIN EN 12592 /25/ Bestimmung der Löslichkeit verwiesen, welche z.Z. von Unzulänglichkeiten befreit wird. Hierin wird am Originalbitumen entweder der unlösliche Anteil

$$m_i = (A/B)*100 \quad (7)$$

oder der lösliche Anteil

$$m_s = 100 - [(A/B) *100] \quad (8)$$

in einem Lösemittel (z.B. Toluol, Xylol) bestimmt. A bedeutet hierin die Masse der unlöslichen Bestandteile und B die Gesamtmasse der Probe. Im Anwendungsbereich dieser Norm wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß sie für wiedergewonnene bitumenhaltige Bindemittel nicht angewendet werden darf.

In A.4 wird der unlösliche Masseanteil in %, mit T bezeichnet. Der Gesamtbindemittelgehalt B wird nach folgender Gleichung, in welcher S den löslichen Bindemittelgehalt darstellt, berechnet:

$$B = \frac{100 \cdot S}{100 - T} \quad (9)$$

Diese Gleichung ist nicht nachvollziehbar.

2.3 SUPERPAVE /26/

Da der unlösliche Bindemittelgehalt in diesem Bericht eine dominierende Rolle spielt, soll hiermit aus einer anderen Sicht dessen Rolle betrachtet werden. (Anm. des Verfassers: Die Symbole und Indizes sind der Publikation entnommen und werden nur hier verwendet und gleichzeitig erklärt).

Die Entwickler von SUPERPAVE gehen davon aus, daß die volumetrische Rezeptierung von Asphalten äußerst wichtig ist. Es wird am Beispiel die volumetrische Analyse eines HMA (hot mixed asphalt) beschrieben, die eine signifikante Rolle bei den meisten Rezeptierungen, eingeschlossen in das SUPERPAVE –System spielt.

Volumetrische Kennwerte von verdichtetem Asphalt, sowohl für im Labor hergestellter Proben als auch von Bohrkernen (ungestörte Proben aus dem Felde) bestimmen das Gebrauchsverhalten der Straßenbefestigung. Dazu zählen der Resthohlraumgehalt im verdichteten Asphalt V_a, der Hohlraum im Mineralgerüst VMA, der mit Bitumen ausgefüllte Hohlraum VFA und der „wirksame Bitumengehalt P_{be}".

Man geht davon aus, daß Mineralstoffe mehr oder weniger porös sind und Wasser einerseits und Bitumen andererseits im unterschiedlichen Maße absorbieren können. Des weiteren ist das Verhältnis der Wasser- zur Bitumenabsorption mineralstoffspezifisch.

Es werden die 3 Methoden zur Bestimmung der Mineralstoffdichte (vgl. auch DIN EN 1097-6) beschrieben, welche die Notwendigkeit der volumetrischen Rezeptierung und Bewertung von Asphalten begründet.

Es wird unterschieden die sogenannte bulk –(Raum)-Dichte G_{sb}, die apparent- scheinbare Dichte G_{sa} und die effective-wirksame Dichte G_{se} der Mineralstoffe (vgl. auch Anhang B der DIN EN 12697 –5).

Unter „bulk –Dichte" wird die Masse des Mineralstoffes in Luft bezogen auf dessen als porenhaltiges Material betrachtetes Volumen einschließlich der zugänglichen und unzugänglichen Poren definiert.

Die scheinbare Dichte ist die Masse des Mineralstoffs in Luft bezogen auf dessen Volumen, als ein undurchlässiges, völlig dichtes Material angesehen.

Die wirksame Dichte ist die Masse des Mineralstoffs in Luft bezogen auf dessen als durchlässiges porenhaltiges Material betrachtetes Volumen , ausgeschlossen die von Bitumen zugänglichen Poren.

Die Definitionen für den fiktiven Hohlraum im Mineralgerüst des Asphaltes (VMA bzw. V_{ma} in Abb. 1 nur annähernd vergleichbar mit $H_{M,bit}$ nach DIN 1996 T.7, mit gleicher Symbolik in

DIN EN 12697-8), den wirksamen Bindemittelgehalt (P_{be}), den Resthohlraumgehalt im verdichteten Asphalt ($V_a \cong H_{bit}$ nach DIN 1996 T.7, mit V_m in DIN EN 12697-8 bezeichnet)

V_{mb} **b**ulk-Volumen des verdichteten Asphalts (**m**ixture)
V_{mm} hohlraumfreies Volumen des Asphaltmischgutes
V_a Volumen der Resthohlräume im verdichteten Asphalt (Luftporen)
$V_a + V_{mm} = V_{mb}$

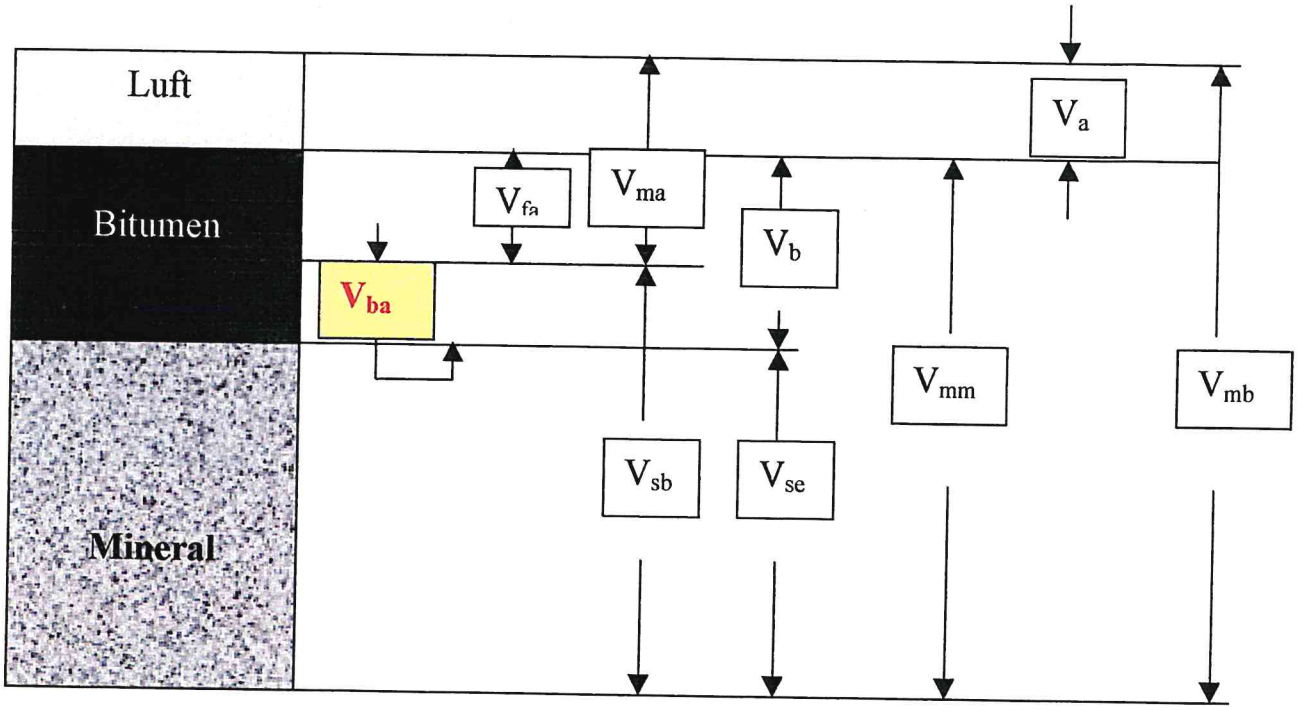


Abb. 1: Zusammensetzung einer verdichteten Asphaltprobe-Volumetrisches Diagramm /26/

V_b (Gesamt)-Volumen des Bitumens
V_{ba} Volumen des absorbierten Bitumens
V_{fa} Volumen des hohlraumfüllenden Bitumens
$V_b - V_{ba} = V_{fa}$
V_{se} Volumen der Mineralstoffe (beschrieben durch G_{se} wirksame Dichte der Mineralstoffe)
V_{sb} Volumen der Mineralstoffe (beschrieben durch G_{sb} bulk (Raum)-dichte der Mineralstoffe)
V_{ma} Volumen der (fiktiven) Hohlräume im Mineralgerüst des verdichteten Asphaltes (abzüglich des Volumen V_{ba} des absorbierten Bitumens)
$V_{ma} = V_{mb} - V_{sb}$

und Hohlraumfüllungsgrad/ Ausfüllungsgrad durch Bitumen (VFA = VFB nach DIN EN 12697-8) sind angeführt.

VMA bzw. V_{ma} ist der fiktive Hohlraum im Mineralgerüst eines verdichteten Asphaltes, der sich aus der Summe von verbleibenden Resthohlraum V_a und dem effektiven Bindemittelvolumen V_{fa} (man könnte auch in Anlehnung an P_{be} die Bezeichnung V_{be} wählen) ergibt. Der effektive –wirksame Bindemittelgehalt P_{be} wird als der Gesamtbindemittelgehalt vermindert um die Menge des in den Mineralstoffpartikeln (Korn) absorbierten Bitumens definiert und kann sowohl auf die Gesamtmasse des Asphaltes oder auf die Masse der Mineralstoffe bezogen werden.

V_a der Hohlraumgehalt im verdichteten Asphalt entspricht unserem $H_{bit,T}$ bzw. $H_{bit,A}$ nach DIN 1996 T.7, vorausgesetzt, daß das Volumen des verdichteten Asphaltes entweder durch Tauchwägung oder durch Ausmessen ermittelt wurde (ASTM D 1188/D 2776 oder AASHTO T166).

Da VMA, VFA, V_a volumetrische Größen darstellen, sollte auch der Bitumengehalt und der Minerastoffgehalt volumetrisch bemessen werden.

Die effektive Dichte des Mineralstoffs G_{se} muß Grundlage für die Berechnung des Restporengehaltes im verdichteten Asphalt sein, wird beim Superpave mix design gefordert. Mit einem Beispiel wird die Herangehensweise demonstriert.

Tab.1: Basisdaten für eine Probe einer Asphaltdeckenmischung

Material	Dichte	Testmethoden		Mischrezeptur	
1	2	3.1	3.2	4.1	4.2
	g/cm³			M.-%	M.-%
	Bulk	AASHTO	ASTM	Bezogen auf Asphalt 100 M.-%	Bezogen auf Mineralstoff 100 MT
Bitumen	1,030 (G_b)	T 228	D 70	5,3 (P_b)	5,6 (P_b)
Splitt, (gebrochenes Material)	2,716 (G_1)	T 85	C 127	47,4 (P_1)	50,0 (P_1)
Fine aggregates	2,689 (G_2)	T 84	C 128	47,3 (P_2)	50,0 (P_2)
Füller	-	T 100	D 854	-	-

Die Raumdichte der verdichteten Asphaltprobe beträgt $G_{mb} = 2{,}442$ g/cm³
(AASHTO T 166 oder ASTM D 1188/D 2726)

Die maximale Dichte (Rohdichte) der Asphaltprobe beträgt $G_{mm} = 2{,}535$ g/cm³
(AASHTO T209 oder ASTM D 2041)

Bei Verwendung der Daten (Mineralstoff 1 und 2) aus Tab. 1 ergibt sich aus nachstehender Gleichung für die" bulk-Rohdichte" der eingesetzten Mineralstoffe $G_{sb} = 2{,}7024$ g/cm³.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + ... + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + ... + \frac{P_N}{G_N}} \qquad (10)$$

Es wird angemerkt, daß die Dichte von Füller schwierig zu bestimmen ist.

Die wirksame Dichte der Mineralstoffe G_{se} (Masse bezogen auf ein Gesamtvolumen, das aber nur den Anteil des Porenraums berücksichtigt, in welchem kein Bitumen absorbiert ist) wird berechnet mittels der experimentell bestimmten maximalen Dichte G_{mm} des porenfreien Asphaltes (Mischgut) nach ASTM D2041/AASHTO T 209. Hierbei sollte sie doppelt, besser dreifach mit den in der Eignungsprüfung vorgegebenen Mineralstoffen und dem vorgeschlagenen Bindemittelgehalt gemessen werden. In der Gleichung (11) ist $P_{mm} = 100$ M.-% und stellt das gesamte Mischgut dar. P_b (s.o. Tab. 1) ist der prozentuale Bindemittelanteil bezogen auf die Gesamtmasse des Asphaltes

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \qquad (11)$$

Es ergibt sich eine wirksame Mineralstoffdichte von $G_{se} = 2{,}761$ g/cm³ (> G_{sb}).

Das Porenvolumen im Mineralstoff, das von Bitumen eingenommen wird, ist fast gleichbleibend geringer als das Volumen, in welchem Wasser absorbiert werden kann. Daraus wird geschlußfolgert, daß die wirksame Dichte G_{se} zwischen der niedrigeren bulk Rohdichte G_{sb} und der höheren scheinbaren Dichte G_{sa} der Mineralstoffe liegen muß. Liegt der Wert außerhalb dieser Grenzen, ist der ermittelte Wert als falsch zu betrachten und erneut zu bestimmen.

Die maximale Dichte des Asphalts G_{mm} wird vergleichbar mit DIN 1996 T.7 ($\rho_{R,bit}$) bzw. DIN EN 12697 –5 (ρ_m) bestimmt und kann auch bei einer gesicherten Kenntnis von G_{se} für andere Bindemittelgehalte berechnet werden. In die zutreffende Gleichung wird die effektive wirksame Dichte der Mineralstoffe G_{se} zur Bestimmung des wirksamen Mineralstoffvolumens eingesetzt. P_s ist hierin der prozentuale Masseanteil der Mineralstoffe.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \qquad (12)$$

Daraus ergibt sich für die in Tab. 1 angegebene Rezeptur (für eine davon abweichende Rezeptur mit 4,0 M.-% Bitumen) eine maximale Dichte des Asphaltes von $G_{mm} = 2{,}535$ g/cm³ (2,587 g/cm³).

Die **Bitumenabsorption P_{ba}** wird ausgedrückt als Masseprozent entweder bezogen auf das Mineralgemisch oder auf den Asphalt. Und sie wird berechnet nach folgender Gleichung bezogen auf die Mineralstoffe.

$$P_{ba} = 100\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \cdot G_{se}} \cdot G_b = 0{,}8 M.-\% \qquad (13)$$

Der wirksame Bindemittelgehalt P_{be} im Asphalt wird definiert als der Gesamtbindemittelgehalt P_b vermindert um den Bindemittelgehalt P_{ba}, welcher sich durch Absorption in den Mineralstoffen ergibt. „Er P_{be}, der wirksame Bindemittelgehalt ist der Anteil vom Gesamtbindemittelgehalt, welcher als Schicht /Überzug auf der Oberfläche/ Außenseite der Mineralstoffkörner bleibt und ist der Bindemittelgehalt, der das Gebrauchsverhalten, die Performance des Asphaltes bestimmt." P_s stellt dabei den prozentualen Anteil der Mineralstoffe im Asphalt dar.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \cdot P_s = 5{,}3 - \frac{0{,}8}{100} \cdot 94{,}7 = 4{,}54 M.-\% \qquad (14)$$

VMA berechnet sich zu 14,44 Vol.%. bei Verwendung von G_{mb} , der Raumdichte der verdichteten Probe, und G_{sb} und Bezugnahme auf den in der Tab.1 beschriebenen Asphalt.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \cdot P_s}{G_{sb}} = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \cdot \frac{100}{100 + P_b} Vol.-\% \qquad (15)$$

Ebenso ergibt sich VMA unter Bezugnahme auf den Bindemittelgehalt im Mineralgemisch und dem Faktor (100/ 100 + P_b) zu 14,44 Vol.-%. P_b stellt hierbei den Bindemittelgehalt bezogen auf 100 M.-% Mineralmasse dar, wird im Artikel aber **nicht** durch ein anderes Symbol gekennzeichnet (siehe Spalte 4.2 in Tab. 1).

V_a der Restluftporengehalt im verdichteten Asphalt wird mit Daten aus der Tabelle folgendermaßen ermittelt und beträgt 3,7 Vol.-%.

$$V_a = 100 \cdot \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} = 3{,}7 Vol.-\% \qquad (16)$$

VFA, der Prozentsatz des Hohlraumes im Mineralgerüst des verdichteten Asphaltes, der mit Bitumen verfüllt ist, aber unter Ausschluß des absorbierten Bitumens, wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$VFA = 100 \cdot \frac{VMA - V_a}{VMA} \% \qquad (17)$$

Er beträgt 74,3 %.

Bei der Bestimmung des Hohlraumgehaltes /27/ können schon geringe Mengen an Bindemittel, welche von den Mineralstoffen absorbiert werden, zu falschen Schlußfolgerungen bei der Mischgutzusammensetzung mit entsprechenden Auswirkungen auf Verdichtbarkeit und Dauerhaftigkeit führen. Es wird sogar empfohlen, in der Mischgutprobe

bei der Eignungsprüfung den gleichen Absorptionszustand zu simulieren, wie das beim Einbau des Mischgutes auf der Baustelle erfolgt. Durch mehrstündige Heißlagerung des Mischgutes läßt sich der Absorptionszustand steuern. Bei wenig absorptiven Gesteinen genügen 2 Stunden bei 200 °C, bei stärker absorptiven Gesteinen sind vier Stunden erforderlich. Die Absorption von Wasser korreliert nicht mit der Absorption von Bitumen. Letztere macht etwa 50 % bis 80 % der Wasserabsorption aus, abhängig von der Viskosität des Bindemittels, der Gesteinsart und den Porengrößen der Mineralstoffe. Da die Mischtemperatur in der Mischanlage, die Lager- und Transportdauer des Mischgutes die Absorption beeinflussen können, sollte dieser Prozeß vor dem Einbau abgeschlossen sein und ebenso bei der Durchführung der Kontrollprüfung. Bei stärker absorptiven Gestein wird daher eine mindestens zweistündige Erwärmung vor der Durchführung der Hohlraumgehaltsbestimmung bei Eigen –oder Fremdüberwachung empfohlen.

In einer weiteren Publikation von Horan /28/ wird zwischen $VMA_{effectiv}$ basierend auf G_{se} und VMA_{actual} basierend auf G_{sb} unterschieden, wobei ersterer höher ist.

Zwei Methoden zur Bestimmung von $VMA_{effectiv}$ werden vorgeschlagen.

Der effektive Hohlraumgehalt im Mineralgerüst wird ermittelt unter Berücksichtigung von G_{se}, der wirksamen Dichte der Gesteine anstatt von der „bulk Rohdichte“ G_{sb}. G_{se} (Gleichung 11) kann nur bei Kenntnis des aktuellen Bindemittelgehaltes P_b des Mischgutes, der Dichte des Bindemittels G_b und der maximalen Dichte G_{mm} des porenfreien Asphaltes nach oben angeführter Gleichung berechnet werden. Das setzt die laufende Ermittlung dieser Kennwerte, insbesondere beim Wechsel des Bindemittels und/oder der Mineralstoffe an der Mischanlage voraus. Eine oben angeführte analoge Gleichung 15 unter Verwendung von G_{sb} wird durch den Index „effective“ modifiziert, wobei im Nenner der vergleichsweise höhere Wert von G_{se} eingesetzt wird und der wirksame Hohlraumgehalt berechnet.

$$\mathbf{VMA_{effective} = 100 - \frac{G_{mb} \cdot P_s}{G_{se}}} \quad \text{vgl. mit} \quad \mathbf{VMA_{actual} = 100 - \frac{G_{mb} \cdot P_s}{G_{sb}}} \qquad (18/15)$$

Der so berechnete wirksame „effektive“ Hohlraumgehalt ist größer als der auf G_{sb} bezogene, am Beispiel berechnete. Anstatt 14,44 Vol.-% beträgt er 16,24 Vol.-%.

Die zweite Methode wird durch Einführung eines auf langzeitigen Erfahrungen beruhenden Korrekturfakors ($G_{se} - G_{sb}$) realisiert.

Bei der Bindemittelgehaltsbestimmung, bei welcher besonders akkurat gearbeitet werden soll, wird die Bitumenabsorption der Mineralstoffe für jede Mischgutprobe berücksichtigt.

Es ist davon auszugehen, daß das absorbierte Bindemittel nicht oder nur partiell gelöst bzw. extrahiert werden kann, so daß sich hiermit eine unmittelbare Verbindung zum unlöslichen Bindemittelgehalt ergibt.

3. Ausgangsmaterialien für Untersuchungen an Modell-Asphalten, Bindemittel-Mineralstoff-Gemischen unterschiedlicher Kornklassen und für Untersuchungen von Praxisgemischen

3.1 Bindemittel

Für Untersuchungen an Modell-Asphalten wurden zwei Bindemittelsorten eingesetzt, ein Bitumen 70/100 und 30/45 gemäß DIN EN 12591, die Untersuchungen an Bitumen-Mineralstoff-Gemischen wurden nur mit Bitumen 70/100 durchgeführt.
Diese Bindemittel sowie vier weitere Bitumen 50/70 gemäß DIN EN 12591 und drei PmB gemäß Tab. 2 der TL PmB-StB, ein PmB 65 A, PmB 45 A und PmB 25 A werden verwendet. Diese Bindemittelsorten bzw.-arten, Original- oder frischen Ausgangsbitumen, werden sowohl an Mischanlagen als auch bei „großen" Labormischungen eingesetzt.
Sämtliche aus den Modell-Asphalten und den Mischgütern nach dem Verfahren DIN 1996-06A-W1-KR-Z zurückgewonnenen Bitumen wurden auch für umfassende Untersuchungen erstellt, wobei aufgrund der Vielzahl der Modell-Asphalte und der relativ geringen Mengen an zurückgewonnenen Bitumen je Variante nur ein kleines Untersuchungsprogramm realisiert wurde.
Außerdem wurden drei aus Asphaltgranulaten auf gleiche Art zurückgewonnene Bitumen durch umfängliche Untersuchungen bewertet. Die Granulate sind Ausgangsstoffe und Untersuchungsobjekte zugleich.
Das bedeutet, daß je nach Bitumenart sechs Originalbitumen und zwölf zurückgewonnene Bitumen einer vollständigen Bewertung nach DIN EN 12591 bzw. DIN 1995 T.1 und gemäß TL PmB-StB unterzogen wurden. Es wurden noch über die Regelwerke hinausgehende zusätzliche Kennwerte ermittelt.
Da der Bedarf an zurückgewonnenen Bitumen nicht durch eine Extraktion gedeckt werden konnte sowie andersgearteten Gründen, mußte der Extraktionsvorgang mindestens an 10 Proben quantitativ durchgeführt werden. Die einzelnen aus je einer Extraktion gewonnenen Bitumenportionen wurden in Schachteln aus mit Formtrennmittel beschichteten Papier, luftdicht verschlossen im Dunklen, aufbewahrt, und die Extraktionen so oft wiederholt, bis die Gesamtmenge der Portionen ausreichend für die geplanten Untersuchungen erschien.

3.2 Mineralstoffe

Als frische Mineralstoffe für die Modell-Asphalte, die Bitumen-Mineralstoff-Gemische und die großen Labormischungen wurden die sechs bzw. sieben folgenden Mineralstoffe aus sächsischen Steinbrüchen, welche durch eine Eignungsbeurteilung zertifiziert sind,

ausgewählt: Syenodiorit S, Quarzporphyr Q, Diabas D, Lamprophyr L, Amphibolit A, Granodiorit (Diorit) G und Kalkstein K.

Mit Ausnahme von Kalkstein, welcher nur als Fremdfüller (FF) zum Einsatz kam, wurden die Lieferkörnungen 0,09/0,25; 0,25/0,71; 0,71/2; 2/5; 5/8; 8/11,2 für die Herstellung von Modell-Asphalte gewaschen, von Über- und Unterkorn befreit, bei 110 °C getrocknet und in verschlossenen Behältern aufbewahrt. Sowohl der Fremdfüller K als auch sämtliche sechs Eigenfüller (EF) der angeführten Mineralstoffe wurden in zwei Kornklassen 0/0,063 und 0,063/0,09 (ungewaschen) gesiebt. Wenn für große Labormischungen noch gröbere Kornklassen benötigt wurden, erfolgte eine gleichartige Behandlung der vorhandenen Lieferkörnungen. Einige wenige Kennwerte dieser Mineralstoffe wurden untersucht.

Von den angeführten Mineralstoffarten kamen vier bzw. fünf an Mischanlagen, welche die zu untersuchenden Mischgüter herstellten (Syenodiorit, Diabas, Amphibolit und Granodiorit [Diorit], Kalkstein) zum Einsatz.

Die extrahierten vom Bindemittel befreiten und klassifizierten Mineralstoffe dienten insbesondere der Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes.

Die aus den drei Asphaltgranulaten zurückgewonnenen Mineralstoffe waren in einem Falle bekannt (S,D,K), im zweiten Falle war Orthophyr O zum großen Anteil enthalten und beim dritten Granulat gab es keinerlei Vorinformationen über die eingesetzten Mineralstoffe, wie auch über das enthaltene Bitumen.

Alle extrahierten Mineralstoffe wurden noch bezüglich mindestens eines Kennwertes untersucht.

Sie wurden in Plasttüten verschlossen aufbewahrt.

3.3 Asphaltsorten und –arten

Als Modell-Asphalte wurden Modell-Asphaltbeton 0/11 und Modell-Asphaltmastix 0/2 mit sämlichen angeführten Mineralstoffen hergestellt, mineralstoffkonform bei Eigenfüller-beteiligung, und abgesehen vom Fremdfüllerzusatz durch Kalkstein K, so daß sich folgende Mineralstoffzusammensetzungen für Asphaltbeton und Asphaltmastix ergeben: S(K), S(S), Q(K), Q(Q), D(K), D(D), L(K), L(L), A(K), A(A), G(K), G(G).

Die Modell-Asphaltmastices wurden nur mit Fremdfüllerzusatz z. B. S(K) hergestellt und untersucht.

Die Mischgüter aus Mischanlagen MA sind folgende: Asphaltbinder Abi 0/16 S mit PmB 25 A aus MA 1, Gußasphalt GA 0/11 S mit Bitumen 30/45 aus MA 2, Splittmastixasphalt

SMA 0/11 S mit PmB 45 A aus MA 2, Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und 25 M.-% Asphaltgranulat AG 2 (vgl. 3.4) aus MA 3 und Asphaltbeton AB 0/11 S mit Bitumen 70/100 aus MA 2. Mischgüter aus großen Labormischungen (25 kg) sind folgende: Asphaltbinder Abi 0/16 mit Bitumen 50/70, Asphaltbinder Abi 0/16 mit Bitumen 50/70 und 20 M.% Asphaltgranulat AG 1 (vgl. 3.4), Splittmastixasphalt SMA 0/8 S mit PmB 65 A und Asphaltbinder Abi 0/22 S mit Bitumen 30/45 und 25 M.-% Asphaltgranulat AG 3 (vgl. 3.4).

3.4 Asphaltgranulate

Das Asphaltgranulat AG 1, ein Gußasphalt 0/11 S stammt aus einer Straßenkonstruktionsschicht, welche im Jahre 2000 eingebaut wurde und enthält als Bindemittel PmB 45 A. Die Zusammensetzung und die verwendeten Mineralstoffe (D, S, K) sind bekannt.

Das Asphaltgranulat AG 2 stammt noch aus in der ehemaligen DDR eingebauten Straßenbefestigungen, d.h. von vor 1989 und es gibt keinerlei Hinweise auf dessen Zusammensetzung.

Das Asphaltgranulat AG 3 wurde aus Deck- und Binderschicht einer Autobahn, Einbau 1991/1994 (teilweise Überbauung), deren Eignungsprüfungen bekannt sind, gewonnen. Als Bindemittel wurde ein damals noch mit B 65 (jetzt Bitumen 50/70) bezeichnetes Bitumen eingesetzt. Als Mineralstoff wurde vorwiegend Orthophyr (O) verwendet.

4. Untersuchungen zu ausgewählten Ausgangstoffen

4.1 Bitumen

Für Modell-Asphalte, Bitumen-Mineralstoff-Gemische unterschiedlicher Kornklassen, für große Labormischungen und Mischgüter aus Mischanlagen wurden die drei Straßenbaubitumen 70/100, 50/70 und 30/45 nach DIN EN 12591 und die polymermodifizierten Bitumen PmB 65 A, PmB 45 A und PmB 25 A nach TL PmB-StB Tab. 2 als Ausgangsbitumen eingesetzt.

Die Kennwerte, Merkmale bzw. Eigenschaften dieser sechs originalen Bindemittel sind in Tab. 2 zusammengefaßt, die Einzelwerte sind in den Anlagen 4.1.1 bis 4.1.6 enhalten.

Außer den Anforderungen nach den beiden Regelwerken wurden zusätzlich folgende Kennwerte bestimmt:

Die Nadelpenetration wurde außer unter Standardbedingungen auch bei einer zweiten Temperatur bei 40°C (1 N, 5 s) bestimmt, um daraus den Penetration-Temperatur-Anstiegsfaktor A_{Pen} und den Pentrationsindex $I_{P,Pen}$ zu berechnen ohne die Näherung nach Pfeiffer/Doormaal, die Penetration beim Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK betrage 800 0,1 mm, in Anspruch zu nehmen.

Der im Anhang B der DIN EN 12591 angeführte Berechnungsweg für den Penetrationsindex, hier zur Unterscheidung mit $I_{P,EP}$ bezeichnet, wurde ebenso wie der zugehörige Pentration-Temperatur- Anstiegsfaktor A_{EP} geringfügig modifiziert. Folgende Gleichungen wurden angewendet:

$$A_{Pen} = \frac{\lg Pen_{T1} - \lg Pen_{T2}}{T_1 - T_2} \qquad I_{P,Pen} = \frac{500 \cdot A_{Pen} - 20}{-50 \cdot A_{Pen} - 1} \quad \text{bzw.} \qquad (19)$$

$$A_{EP} = \frac{\lg 800 - \lg Pen25}{T_{EP} - 25} \qquad I_{P,EP} = \frac{500 \cdot A_{EP} - 20}{-50 \cdot A_{EP} - 1} \qquad (20)$$

Die Plastizitätsspanne als Differenz zwischen Erweichungspunkt Ring und Kugel und Brechpunkt nach Fraass wurden berechnet.

Die Dichte wurde bei mehreren Temperaturen T bestimmt, um den Ausdehnungskoeffizienten β der Bitumen nach folgender Gleichung zu bewerten.

$$\beta = \frac{\rho_{25} - \rho_T}{\rho_T (T - 25)} \qquad (21)$$

Die destruktive Duktilität wurde in Übereinstimmung mit den Modalitäten der DIN 1995 T.1 bestimmt.

Der Aschegehalt wurde bestimmt in Hinblick eines Vergleiches mit dem der zurückgewonnenen Bitumen.

Die Kraftduktilität (maximale Kraft und maximaler Weg eingeschlossen) wurde für PmB bei Temperaturen, welche die TL PmB-StB vorgibt aber mit den nach pr EN 13589 vorgeschriebenen Formen, die Formänderungsarbeit bis Mindestduktilität nach TL PmB-StB in Verbindung mit pr EN 13703 (Arbeit für eine vorgegebene Dehnung/Duktilität) bestimmt.
Die Untersuchung im DSR bei 60 °C mit der Ermittlung der Kennwerte G*, δ, G′, G″, η* und γ wurde für sämtliche sechs Original-Bitumen und den nach DIN EN 12607-3, RFT-Verfahren (RFT_{1000}) thermisch beanspruchten Bitumen durchgeführt. Das verwendete Gerät Bohlin CVO ließ nur Lufttemperierung zu.
Mit Ausnahme des PmB 65 A wurde die Beanspruchung der Bindemittel unter dem Einfluß von Wärme und Luft parallel, bedingt durch die Laufzeit des Forschungsvorhabens, auch nach DIN 52 016 (RFT_{500}) durchgeführt. In der Anlage 4.1.7 sind die Ergebnisse für die Masseänderung, die Nadelpenetration und den Erweichungspunkt EP RuK vergleichsweise tabelliert. Die zu erwartenden Tendenzen einer Zunahme der Härte der Bindemittel durch diese Beanspruchung im Vergleich zum Ausgangszustand sind ersichtlich. Die Masseänderung wird von den fünf durch beide Verfahren beanspruchten Bindemitteln als Massezunahme, in zwei Fällen gleich und in drei Fällen für RFT_{1000} größer festgestellt. Die Nadelpenetration ist wiederum im zwei Fällen gleich und in drei ist sie für RFT_{1000} geringer als für RFT_{500} beanspruchte Bitumen. Der Erweichungspunkt Ring und Kugel liegt bei allen fünf Bitumen bei einer Beanspruchung im 1000-ml-Kolben höher als vergleichsweise im 500-ml-Kolben.
Der Einfluß von mit Polymeren modifizierten Bitumen ist ersichtlich, z.B. durch eine signifikant höhere Plastizitätsspanne, die deutlich höheren Pendetrationsindizes $I_{P,Pen}$ und $I_{P,EP}$, höhere komplexe Schubmoduli G* und durch niedrigere Phasenwinkel δ. Eine Tendenz zur Verhärtung im allgemeinen und zum Anstieg von $I_{P,EP}$ nach thermischer Beanspruchung ist zu verzeichnen.

Tab.2: Kennwerte der Ausgangsbitumen

Kennwert/Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Nr. 1013	Nr. 970	Nr. 934	Nr. 1204	Nr. 953	Nr. 936
Bitumensorte/-art			70/100	50/70	30/45	PmB 65 A	PmB 45 A	PmB 25 A
Nadelpenetration 25 °C 40 °C	DIN EN 1426	0,1 mm	93 394	53 231	43 172	68 267	34 130	37 100
Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK	DIN EN 1427	°C	44,8	50,0	55,0	52,4	59,0	69,2
Penetrationsindex $I_{P,EP}$	DIN EN 12591 Anhang B mod.		- 1,07	- 1,07	- 0,37	+ 0,16	- 0,06	+ 1,95
Penetrationsindex $I_{P,Pen}$			- 0,29	- 0,42	- 0,23	+ 0,07	+ 0,20	+ 2,30
Brechpunkt nach Fraaß	DIN EN 12593	°C	- 14	- 10	- 8	- 16	- 11	- 5
Plastizitätsspanne		K	58,8	60,0	63,0	68,4	70,0	74,2
Duktilität	DIN 52013	cm	(bei 7 °C) >100 (bei 25 °C) > 100	(bei 13 °C) > 100 (bei 25 °C) > 100	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) > 100	(bei 13 °C) > 100	(bei 25 °C) > 100	(bei 25 °C) 50
Dichte 25 °C 40 °C 60 °C	DIN EN ISO 3838	g/cm³	1,017 1,006 -	1,025 1,013 -	1,031 1,019 -	1,019 1,008 -	1,034 - 1,009	1,024 - 0,994
Volumenausdehnungs-koeffizient		K^{-1}	7,29 e-04	7,90 e-04	7,85 3-04	7,28 e-04	7,08 e-04	8,62 e-04
elastische Rückstellung 25 °C	DIN V 52021 T.1	%				93	76	82
Stabilität gegen Entmischung nach Heißlagerung Differenz der EP RuK	TL PmB 2001 Anhang A DIN EN 1427	°C oben °C unten K				51,2 51,8 0,6	63,6 59,2 4,4	78,0 69,2 8,8
Aschegehalt	DIN 52 005	M.-%	0,13	0,14	0,08	0,13	0,12	0,16
Kraftduktilität Formänderungsarbeit bis Mindestduktilität Maximale Kraft Maximaler Weg	TL PmB 2001 Anhang B unter Berücksichtigung von pr EN 13589	 J N cm				(bei 13 °C) 1,95 11 >100	(bei 25 °C) 0,51 5,3 >100	(bei 25 °C) 1,63 17 64,4

Fortsetzung von Tab. 2

Kennwert/Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Nr. 1013	Nr. 970	Nr. 934	Nr. 1204	Nr. 953	Nr. 936
Bitumensorte/-art			70/100	50/70	30/45	PmB 65 A	PmB 45 A	PmB 25 A
Massenänderung unter Einfluß von Wärme und Luft bei (th. B.) 163 °C	DIN EN 12607-3	M.-%	+ 0,05	+ 0,03	+ 0,01	+ 0,02	+ 0,03	+ 0,02
Untersuchung im DSR 60 °C	TL PmB 2001							
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa	3 016	6 536	10 395	6 208	16 346	30 034
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°	85,7	84,2	78,2	78,1	74,9	65,2
G' elastischer Modul		Pa	230	665	2 125	1 285	4 276	12 574
G'' viskoser Modul		Pa	3 029	6 453	10 163	6 096	15 770	27 149
η* komplexe Viskosität		Pa·s	303	647	1 036	622	1 630	2 984
γ Deformation			39,87e-03	18,38 e-03	11,56 e-03	19,37 e-03	7,35 e-03	4,00 e-03
Nadelpenetration nach th. B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN EN 1426	0,1 mm	60	38	27	52	23	27
Änderung der Nadelpenetration auf		%	64,5	71,7	62,8	76,5	67,6	73,0
EP RuK nach th.B.	DIN EN 12607-3 DIN EN 1427	°C	50,6	56,2	64,6	55,4	66,0	72,4
Änderung des EP RuK um		K	5,8	6,2	9,6	3,0	7,0	3,2
Penetrationsindex $I_{P,EP}$ nach th. B.	DIN EN 12591 Anhang B		- 0,62	- 0,39	+ 0,50	+ 0,16	+ 0,42	+ 1,75
Duktilität nach th. B.	DIN EN 12607-3 DIN 52013	cm	(bei 7 °C) 19 (bei 25 °C) > 100	(bei 13 °C) 24 (bei 25 °C) > 100	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) 72	(bei 13 °C) > 100	(bei 25 °C) > 100	(bei 25 °C) 41
Elastische Rückstellung nach th. B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN V 52021 T.1	%				64	69	76
Untersuchung im DSR nach th.B. 60 °C	DIN EN 12607-3 TL PmB 2001							
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa	7 356	13 813	34 811	10 152	48 066	67 427
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°	81,4	80,1	69,4	73,5	68,7	62,2
G' elastischer Modul		Pa	1 113	2 418	12 290	2 887	17 660	30 952
G'' viskoser Modul		Pa	7 305	13 660	32 671	9 742	44 987	58 923
η* komplexe Viskosität		Pa·s	738	1 384	3 482	1 014	4 821	6 639
γ Deformation			16,33 e-3	8,69 e-03	3,45 e-03	11,84 e-03	2,20 e-03	1,78 e-03

4.2 Mineralstoffe

Von den Mineralstoffen, unter 3.2 angeführt, wurden nur die sieben Füller, von denen sechs nur für Modell-Asphaltbetone zum Einsatz kamen als Eigenfüller EF der jeweiligen Mineralstoffe, und Kalksteinmehl als Fremdfüller FF, sowohl für die Modell-Asphaltbetone als auch für Modell-Asphaltmastices und für große Labormischungen verwendet, bezüglich ausgewählter Kennwerte untersucht.

Die Korngrößenverteilung der Lieferkörnung wurde durch Siebung festgestellt. Die abgesiebte Kornklasse < 0,09 mm wurde für die Untersuchungen eingesetzt und anschließend der Sedimentationsanalyse unterzogen. Des weiteren wurde der Hohlraumgehalt nach Rigden noch nach TP Min-StB T. 3.8.3, für Asphalt momentan noch zutreffend (die DIN EN 1097-4 geht von einer Kornklasse < 0,063 mm aus), festgestellt und die Dichte nach DIN EN 1097-7 ermittelt (Tab. 3)

Da der Füller eine zentrale Rolle bei der Ermittlung des Bindemittelgehaltes in der noch gültigen DIN 1996 T. 6 (Abschnitt 8) spielt, schienen diese Untersuchungen notwendig.

Die Siebdurchgänge durch das 0,09-mm-Sieb der Lieferkörnung erstrecken sich von 99,3 M.-% bei L bis auf 87,4 M.-% für A.

Die Siebdurchgänge < 0,063 mm wurden mit 97,2 M.-% als Maximalwert für L und mit 72,9 M.-% für A festgestellt.

Die Hohlraumgehalte nach Rigden schwanken bei den sieben Füllern zwischen 46,5 Vol.-% für den Mineralstoff A, ein nicht zulässiger Wert nach TL Min-StB, und 35,9 Vol.-% für K.

Die Dichten nehmen ein Spektrum von 2,639 g/cm³ für Q und 2,880 g/cm³ für D und A ein.

Tab. 3: Ausgewählte Kennwerte von Füllern für Modell-Asphalte, große Labormischungen und Praxisgemische

Lieferkörnug Füller	Einheit	S	Q	D	L	A	G	K
Sieblochweite		Siebrückstand in M.-%						
mm								
0,71/2,0		0,1	0,0	0,0	0,0	0	0,1	0,0
0,25/0,71		0,3	0,1	0,7	0,0	0	0,4	0,0
0,09/0,25		5,6	9,0	7,0	0,7	12,6	3,7	5,4
0,063/0,09		11,8	11,0	7,1	2,1	14,6	7,8	4,4
0/0,063		82,1	79,9	85,2	97,2	72,9	88,0	90,2
Zusammensetzung < 0,09		Siebrückstand in M.-%						
0,063/0,09		12,57	12,0	7,7	2,1	16,6	8,14	4,7
0/0,063		87,43	88,0	92,3	97,9	83,4	91,86	95,3
Lieferkörnung Füller		Korngrößenverteilung Siebdurchgang in M.-%						
2		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100,0
0,71		99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	99,90	100,0
0,25		99,5	99,9	99,2	100,0	100,0	99,50	100,0
0,09		93,9	90,9	92,3	99,3	87,4	95,80	94,6
0,063		82,1	79,9	85,2	97,2	72,9	88,00	90,2
Kornklasse < 0,09 mm		Korngrößenverteilung durch Sedimentationsanalyse nach DIN 18 123 "Sieb"durchgang in M.-%						
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
		0,09 100,0	0,09 100,0	0,09 100,0	0,09 100,0	0,09 100,0	0,09 100,0	0,09 100,0
		0,066 91,6	0,069 87,4	0,063 87,7	0,063 89,3	0,063 91,3	0,062 94,1	0,064 88,3
		0,048 83,2	0,049 78,3	0,047 75,0	0,045 83,7	0,046 82,1	0,045 82,3	0,046 78,5
		0,035 72,1	0,036 66,5	0,033 61,7	0,032 75,0	0,032 70,9	0,032 70,0	0,033 70,3
		0,029 56,8	0,023 48,2	0,021 46,9	0,021 61,2	0,022 52,5	0,022 54,7	0,022 57,5
		0,014 38,4	0,014 30,2	0,013 30,1	0,013 40,8	0,013 32,0	0,013 30,1	0,013 31,9
		0,0080 25,3	0,0082 22,0	0,0076 18,2	0,0077 23,0	0,0078 19,5	0,0077 19,4	0,0079 15,8
		0,0050 16,8	0,0052 14,1	0,0048 11 2	0,0048 15,3	0,0049 12,2	0,0049 14,7	0,0049 9,7
		0,0029 11,1	0,0030 10,6	0,0028 7,1	0,0028 10,2	0,0028 8,5	0,0028 9,7	0,0028 6,5
		0,0015 5,3	0,0015 7,9	0,0014 4,7	0,0014 5,7	0,0014 6,1	0,0014 4,0	0,0014 4,2
Rigden H_t DIN EN 1097-4/ TP Min-StB T. 3.8.3	Vol.-%	38,9	42,9	42,8	43,4	46,5	39,3	35,9
Dichte DIN EN 1097-7	g/cm³	2,710	2,639	2,880	2,875	2,880	2,867	2,860

4.3 Asphaltgranulat

Die drei unter 3.4 angeführten Asphaltgranulate sind einerseits Ausgangsstoff zur Herstellung von unterschiedlichen Mischgutsorten von Asphaltbindern im Labor wie auch an der Mischanlage. Sie sind auch Untersuchungsobjekte als Mischgüter separat für sich betrachtet. Als solche werden sie unter Kapitel 6 näher beleuchtet.

Hier soll u.a. die Stückgrößenverteilung, die mittlere Korngrößenverteilung Abb. 2, 3, 4 und der mittlere lösliche Bindemittelgehalt $B_{lös,W,K}$ sowie der empirisch ermittelte unlösliche Bindemittelgehalt $B_{unl,emp,A}$ und der Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} angeführt werden.

Tab. 4: Ausgewählte Kennwerte und Daten der Asphaltgranulate

Asphalt-granulat	Labor-Nummer	$B_{lös,W,K}$	Füllergehalt $F_{M,n}$ in extrahierten Mineralstoffen < 0,09 mm der Granulate (der Ausbaustücke)	$B_{unl,emp,A}$	B_{ges}	Ausgangs-mischgut-art/-sorte	Ausgangs-binde-mittel	Alter	Extrahierte Mineral-stoffe	Penetrations-bezogene Einstufung des zurück-gewonnenen Bindemittels (EP RuK)
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%					
AG 1	1168	6,75	33,04 (29,3)	0,53 (0,48)	7,28 (7,23)	GA 0/11 S	PmB 45 A	2000	D,S,K	PmB 45 A (67 °C)
AG 2	124	5,14	12,22	0,26	5,40	unbekannt	unbekannt	vor 1989	unbekannt	30/45 (54,8 °C)
AG 3	1199	4,59	13,97	0,38	4,89	AB 0/11 S Abi 0/22	B 65/ 50/70	1991/94	O,K*n.b.	20/30 (61,6 °C)

Interessant ist die bei der Granulierung bzw. beim Fräsen auftretende Kornverfeinerung, speziell der Zunahme des Füllergehaltes.

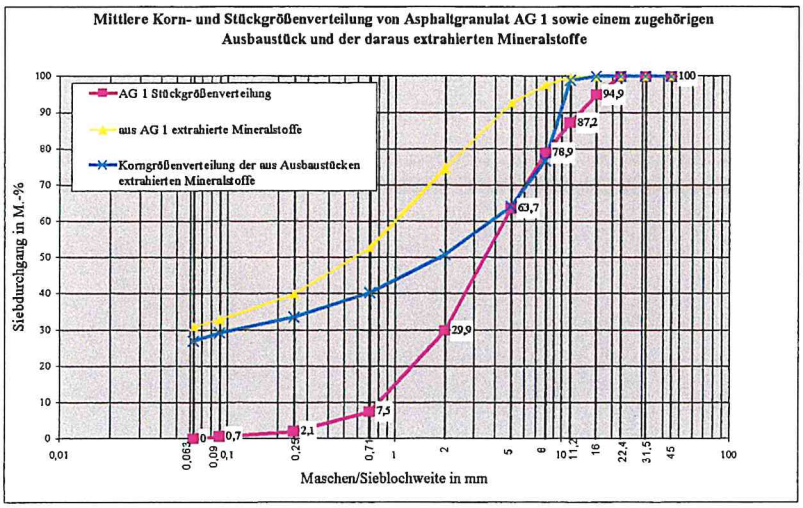


Abb. 2: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulates AG 1 und Korngrößenverteilung der aus dem Granulat und dem zugehörigen Ausbaustück extrahierten Mineralstoffe

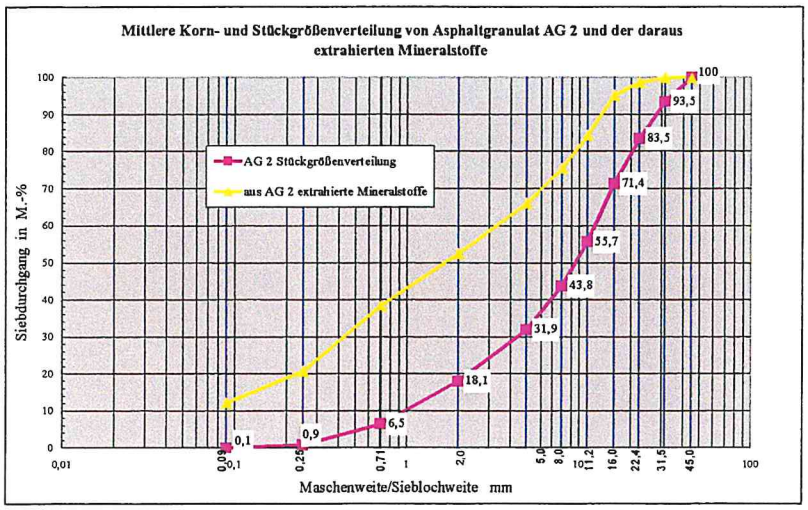


Abb. 3: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulates AG 2 und Korngrößenverteilung der aus dem Granulat extrahierten Mineralstoffe

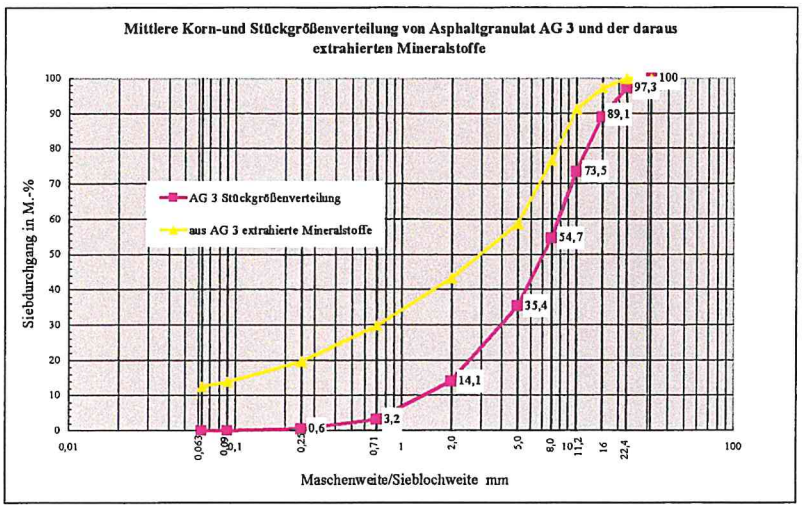


Abb. 4: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulates AG 3 und Korngrößenverteilung der aus dem Granulat extrahierten Mineralstoffe

5. Voruntersuchungen zur Bindemittelgehaltsbestimmung einschließlich Korngrößenverteilung und Untersuchung der zurückgewonnenen Bindemittel an Modell-Asphalten und Bitumen-Mineralstoff-Gemischen unterschiedlicher Kornklassen

5.1 Theoretische Vorbetrachtungen

Die Bestimmung des Bindemittelgehaltes spielt bei der Eigenüberwachung wie bei der Kontrollprüfung eine entscheidende Rolle, einmal um die Übereinstimmung mit den Regelwerken und zum anderen mit der zutreffenden Eignungsprüfung nachzuweisen.

Bei der Eigenüberwachung in Mischanlagenlaboratorien wird in der Regel zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes mit automatischen Extraktionsanlagen unter Verwendung von kaltem Trichlorethylen als Lösemittel gearbeitet, d.h. das Verfahren DIN 1996-06A-D2-K-E angewendet, nur zur Ermittlung der Bindemitteleigenschaften, speziell des Erweichungspunktes Ring und Kugel wird die Rückgewinnung mit Rotationsverdampfer durchgeführt (DIN 1996-06A-W2-KR).

Die Kontrollprüfungen in Laboratorien von Prüfstellen können auch im Soxhlet und in Heißextraktionsgeräten mit Einsatzzylinder und Kühlerdeckel in Verbindung mit einer Standzentrifuge, um die mehlfeinen Bestandteile aus der Bitumenlösung zu separieren, durchgeführt werden. Für Schiedsanalysen ist jedoch eine Kaltextraktion mit Toluol als Lösemittel (Verfahren DIN 1996-06A-W1-KR- E (Z, F)) vorgeschrieben.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird generell letzteres Verfahren angewendet und im Ausnahmefall vergleichsweise die Heißextraktion mit Trichlorethylen durchgeführt.

Ausgangspunkt für die folgenden Untersuchungen war, die Zugabezusammensetzung bzw. Synthese eines Asphaltes aus den beiden Komponenten Bitumen und Mineralstoffe mit der Ergebniszusammensetzung bzw. Analyse eines Asphaltes und Trennung in die Komponenten zurückgewonnenes Bitumen und extrahierte Mineralstoffe zu vergleichen. Das könnte durch folgende Gleichungen ausgedrückt werden:

$$m_{B,v} + m_{M,v} \longrightarrow m_{A,theor.} \quad (22)$$

$$m_{A,theor.} \longrightarrow m_{B,n} + m_{M,n} \quad (23)$$

Aber die Summe der eingesetzen Bitumenmasse (kalt gewogen) $m_{B,v}$ und der Masse der im voraus bei (110 ± 5) °C getrockneten Mineralstoffe (kalt eingewogen) $m_{M,v}$ ergeben nach Mischen bei 160 °C und nach dem Abkühlen aber vor der Extraktionsanalyse nicht die theoretische Masse an Asphalt $m_{A,theor.}$ sondern, abhängig vom eingesetzten Mineralstoff, von der rezeptierten Masse des Asphaltes und der Asphaltsorte bzw. –art - eine verminderte Menge an Asphalt $m_{A,v}$.

$m_{A,theor.} > m_{A,v}$

Dieser z.T. ungeklärte Masseverlust für Modell-Asphaltbetone und Modell-Asphaltmastices $m_{A,theor.} - m_{A,v}$ (vgl. Anlagen 5.1.1, 5.1.2) kann nicht vollständig auf den Restwassergehalt m_w, welcher sich aus der Trocknung bei 110 °C und dem Vorwärmen der Mineralstoffe vor dem Mischen auf 160 °C ergibt, zurückgeführt werden, d.h.

$$m_{A,theor.} - m_w \neq m_{A,v}$$

$$m_{A,theor.} - (m_{A,v} + m_w) = \Delta m_{A,Verlust} \qquad (24)$$

Die theoretische Einwaage EW von Modell-Asphalt entspricht nicht der praktischen Auswaage AW des erkalteten Modell-Asphaltes. Dies führt bei Bezugnahme auf die jeweiligen Werte zu unterschiedlichen Ergebnissen, insbesondere des löslichen Bindemittelgehaltes beim Differenzverfahren.

Nach der Extraktion (Verfahren DIN 1996-06A-W1-KR- E (Z)) werden die beiden Komponenten lösliches Bitumen $m_{B,lös}$ bzw. $m_{B,n}$ und die extrahierten Mineralstoffe $m_{M,n}$ gewonnen und können bzw. müssen vergleichsweise summiert werden.

$$m_{A,v} \longrightarrow m_{B,n} + m_{M,n}$$

Die Summe dieser Massen entspricht, wie auch in der DIN 1996 T.6 gefordert, im wesentlichen der Masse des eingesetzten Asphaltes. Während die quantitative Übereinstimmung gesichert erscheint, ist jedoch mit der Extraktion und Gewinnung der Komponenten eine qualitative Veränderung eingetreten. Die Kennwerte des ursprünglich eingesetzten originalen Bindemittels haben sich verändert. Bei dem zurückgewonnenen löslichen Bitumen ($m_{B,v} > m_{B,n} = m_{B,lös}$) tritt in der Regel, PmB ggf. ausgenommen, eine Verhärtung vor allem durch die thermische Beanspruchung beim Mischprozeß und partiell ggf. durch das Verfahren der Rückgewinnung ein. Die meist nur geringfügige Zunahme des Aschegehaltes im löslichen Bitumen kann m.E., exakte Abtrennung der mehlfeinen Stoffe aus der Bitumenlösung vorausgesetzt, als Einflußgröße vernachlässigt werden.

Die Differenz zwischen dem eingesetzten Bitumen $m_{B,v}$ und dem zurückgewonnenen Bitumen muß bei analytischem Arbeiten der Masse des unlöslichen Bitumens $m_{B,unl}$ im Asphalt entsprechen und wird im Rahmen des Berichtes als $m_{B,unl,SAP,A}$ bezeichnet, da sie das Ergebnis des Synthese-Analyse-(Prinzip)Verfahrens SAP ist. Daraus ergibt sich ($B_v - B_{lös,W}$) der unlösliche Bindemittelgehalt im Asphalt $B_{unl,SAP,A}$.

Diese Möglichkeit der Erfassung des unlöslichen Bindemittelgehaltes besteht bei den im folgenden näher erläuterten Modell-Gemischen.

Die Mineralstoffe, je nach Art, absorbieren mehr oder weniger Anteile des eingesetzten Bitumens, welches durch die in Frage kommenden Lösemittel nicht wieder zurückgewonnen, gelöst, extrahiert werden können. Das unlösliche Bitumen $m_{B,unl}$, welches die

Mineralstoffoberfläche hydrophobiert, läßt sich jedoch bei der massemäßig im Asphalt überwiegenden Komponente Mineralstoff kaum in einer Massezunahme erfassen. Die Masse der qualitativ veränderten extrahierten Mineralstoffe ist eher aus bereits oben angeführten Ursachen im Vergleich zur Einwaage geringer $m_{M,n} \cong m_{M,v}$.

Üblicherweise wird der unlösliche Bindemittelgehalt empirisch/rechnerisch nach Abschnitt 8.2 der DIN 1996 T.6 bestimmt nach der bekannten Gleichung.

$$B_{unl} = 0{,}013*F + 0{,}1, \qquad (25)$$

welche im Bericht durch zusätzliche Indizes, die den derzeit definierten Inhalt treffen, konkretisiert und ergänzt wird

$$B_{unl,emp,A} = 0{,}013*F_M + 0{,}1 \qquad (25a)$$

sowie eine modifiziere Form dieser Gleichung betrachtet wird.

$$B_{unl,emp,A,mod} = 0{,}013*F_M*M/A + 0{,}1 = 0{,}013\ *F_A + 0{,}1 \qquad (26)$$

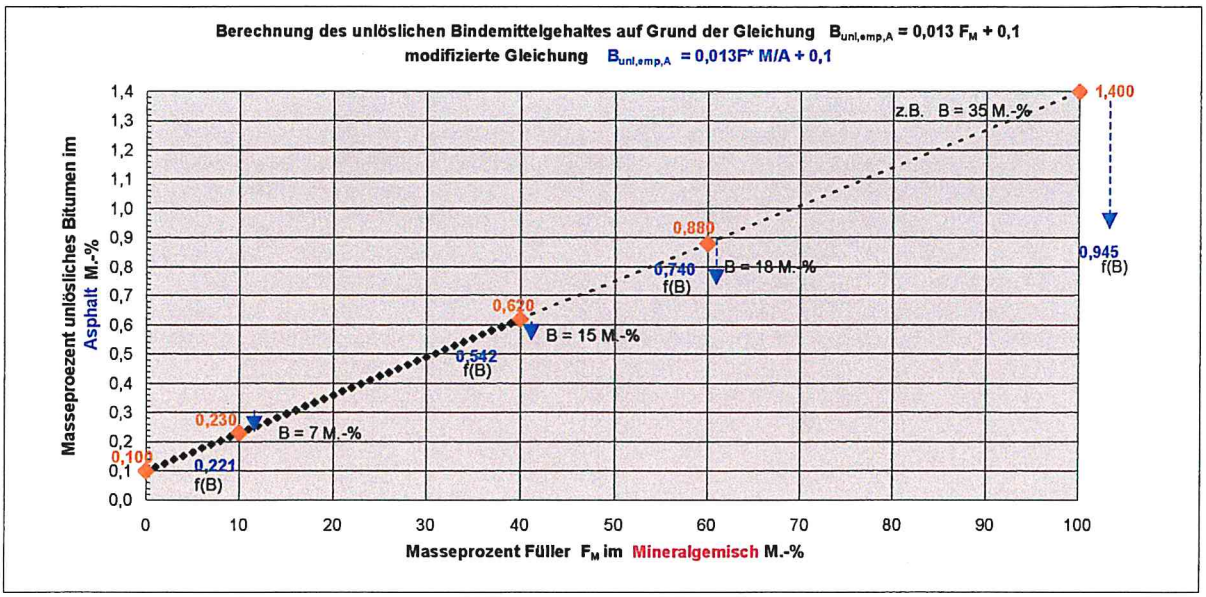


Abb. 5: Grafische Darstellung der Abhängigkeit des unlöslichen Bindemittelgehaltes (E) nach DIN 1996 T.6 Abschnitt 8.2 und nach einer modifzierten Füllergleichung

Wäre diese Gleichung 25 ohne Einschränkungen gültig (Abb. 5), bedeutete dies, daß bei einem Füllergehalt von $F_M = 0$ M.-% im Mineralgemisch der unlösliche Bindemittelgehalt B_{unl} generell 0,1 M.-% im füllerfreiem Asphalt betragen würde und bei einem Füllergehalt $F_M = 100$ M.-% im Mineralgemisch der unlösliche Bindemittelgehalt in der Bitumen-Füller-Mischung, quasi Asphalt, 1,4 M.-% betragen müßte. Von den Einschränkungen der Gültigkeit dieser Gleichung auf $B_{unl,emp,A}$ auf < 0,6 M.-% sei hier abgesehen und gleichzeitig auf eine Anmerkung des Verfassers unter 2.1 hingewiesen, die ihren Niederschlag auch in Tab.5 findet (Gl. 26).

Tab. 5: Berechnung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach modifizierter Füllergleichung in Bitumen-Füller-Gemischen

$B_{unl,emp,A}$ M.-% 100 M.-% Füller nach gültiger Füller- Gleichung DIN 1996 T.6 Abschn. 8.2	mod. $B_{unl,emp,A}$ M.-% 100 M.-% Füller (lt. mod. Gl. 26)	M < 0,09 mm Füller M.-%	M/A	B M.-%
1,4	1,27	90	0,90	10
1,4	1,14	80	0,80	20
1,4	1,08	75	0,75	25
1,4	1,01	70	0,70	30
1,4	0,95	65	0,65	35
1,4	0,88	60	0,60	40
1,4	0,75	50	0,50	50
1,4	0,62	40	0,40	60
1,4	0,49	30	0,30	70
1,4	0,36	20	0,20	80
1,4	0,23	10	0,10	90
0		0	0	100

Bei Gültigkeit der Gleichung 25 anstatt 26 bestimmt der Anteil des Füllergehaltes im Mineralstoffgemisch den unlöslichen Bindemittelgehalt im Asphalt. Unter Füller $F_{0,09}$ wird der prozentuale Anteil der Kornklasse < 0,09 mm im Mineralstoffgemisch verstanden. Ob ein Bezug der Gleichung auf einen Füllergehalt der Kornklasse < 0,063 mm $F_{0,063}$ wesentlich andere Ergebnisse liefert, wurde auch in Hinblick auf die europäische Normung in Betracht gezogen. Diese Art der Auswertung setzt die Bestimmung der Korngrößenverteilung, zumindest des Füllergehaltes voraus, was in Pkt.7.4 wie auch Pkt.1 der DIN 1996 T.6 als Kannentscheidung formuliert ist.

Richtiger wäre, wenn die Gleichung Gültigkeit hätte, was zu widerlegen oder zu bestätigen Inhalt des Forschungsvorhabens ist, diese Gl. 25 durch den Faktor M/A, Anteil der Mineralstoffe im Asphalt, zu ergänzen, was zu Gl. 26 (vgl. Tab. 5) führt.

Würde Gl. 25 Gültigkeit haben, bestünde zwar nur für Modell-Asphalte die Möglichkeit, im Rückschluß auf einen im Bericht mit $B_{lös}$* bezeichneten löslichen Bindemittelgehalt im Asphalt zu schließen. Vom Zugabebindemittelgehalt B_v wird der auf Grund des Füllergehaltes F_M berechnete unlösliche Bindemittelgehalt subtrahiert.

$$B_v - B_{unl,emp,A} = B_{lös}^*. \qquad (27)$$

Um die aufwendige Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach Anhang C der DIN 1996 T.6 zu vermeiden, wurde nach alternativen Methoden gesucht.

Da sich die SAP-Methode (Synthese-Analyse-Prinzip) nicht für Mischgüter aus Mischanlagen eignet, wurde unter anderem nach Studium der Historie der Glühverlust der extrahierten HCl-unlöslichen carbonatfreien Mineralstoffe $GV_{T,cf}$ bei unterschiedlichen Temperaturen in Erwägung gezogen. Es wird davon ausgegangen, daß das in den carbontatfreien Mineralstoffen befindliche unlösliche Bitumen unter Einfluß erhöhter Temperaturen mit Sauerstoff reagiert, d.h. zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt wird. Aus $GV_{T,cf}$ läßt sich bei Kenntnis des prozentualen Anteils der carbonatfreien Mineralstoffe M_{cf} der Glühverlust in den gesamten Mineralstoffen $GV_{T,M}$ und bei Kenntnis des Ausgangsbindemittelgehaltes der Glühverlust im Asphalt $GV_{T,A}$-Wert ermitteln, der dem Gehalt an unlöslichen Bindemittel im Asphalt entspräche.
Die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes erfolgte in Anlehnung an Anhang C der DIN 1996 T.6. und zwar nach dem Zentrifugenverfahren Z, was eigentlich ebenso wie das gleichwertige Filtrationsverfahren F nur die Gewinnung der HCl-unlöslichen, carbonatfreien Mineralstoffe beinhaltet. Die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes setzt die Kenntnis der Korngrößenverteilung nach DIN 1996 T. 14 voraus. Nach Mahlen auf eine Korngröße < 0,09 mm der einzelnen beteiligten Kornklassen eines extrahierten Mineralgemisches und sinngemäßem Zusammensetzen der einzelnen Mahlgüter wird dieses Pulver unter Rückfluß mit Salzsäure HCl von Carbonaten und sonstigen in HCl löslichen Verbindungen befreit und der Rückstand abzentrifugiert (filtriert), chloridfrei gewaschen und getrocknet und der prozentuale Anteil an carbonatfreien extrahierten Mineralstoffen M_{cf} (Gl. 29) bestimmt. Diese Prozedur wird auch bei den nicht mit Bitumen in Kontakt getretenen frischen Mineralstoffen /18/ durchgeführt, um ggf. organischen Kohlenstoff als Null- oder Blindwert nachweisen zu können. Man erhält $M_{cf,bl}$.
An einer Teilprobe des carbonatfreien Mahlgutes m_{cf} wird im Elemental Analyzer EA 3000 neben Wasserstoff H, Schwefel S und Stickstoff N der prozentuale Gehalt an organischem Kohlenstoff $C_{org,unkorr,EA}$ bestimmt.
Er ergibt sich theoretisch aus

$$100 * m_{Corg}/m_{cf} = C_{org,unkorr,EA} \qquad \text{(vgl. Abbn. b Kap.6.2.1)} \qquad (28)$$

wobei der organische Kohlenstoff als Kohlendioxid gaschromatographisch dedektiert wird. Ebenso können Wärmeleitzellen oder Massespektrografen dafür benutzt werden.
Von Interesse ist aber der Gehalt an organischem Kohlenstoff bzw. Bitumen im gesamten Mineralstoff bzw. im Asphalt.

$$M_{cf} = 100 * m_{cf}/m_{M,n} \qquad \text{(vgl. Abbn. a Kap.6.2.1)} \qquad (29)$$

Daraus ergibt sich für

$$m_{cf} = M_{cf} * m_{M,n}/100 \qquad (30)$$

und für den Gehalt an organischem Kohlenstoff in den gesamten Mineralstoffen $C_{M,unkorr}$, ohne Berücksichtigung des Blindwertes bzw. ohne Korrektur

$100 * m_{Corg}/m_{cf} = C_{org,unkorr,EA} = 100\ m_{Corg} * 100/M_{cf} * m_{M,n}$ (31)

$C_{M,unkorr.} = C_{org,unkorr,EA} * M_{cf}/100 = 100 * m_{Corg}/m_{M,n}$ (32)

Für den Blindwert der unbehandelten Mineralstoffe, welcher nur an den Kornklassen 2/5 und 0/0,09 bestimmt wurde (vgl. Anlage 5.1.3), ergibt sich dann folglich

$C_{M,bl} = C_{org,bl,EA} * M_{cf,bl}/100.$ (33)

Die Blindwerte $C_{M,bl}$ sind zur Korrektur des organischen Kohlenstoffs in den Mineralstoffen $C_{M,unkorr.}$ erforderlich.

Um den Gehalt an unlöslichem Bitumen in den gesamten Mineralstoffen ohne Berücksichtigung des Blindwertes zu bestimmen, wäre die Multiplikation mit dem Faktor 1,18 notwendig, d.h.

$B_{unl,exp,unkorr,M} = 1,18 * C_{M.unkorr.}$ (34)

obwohl der organische Kohlenstoff im frischen Mineralstoff sicher kein Bitumen ist.

Der nur im Weiteren berücksichtigte korrigierte Wert ergibt sich demzufolge aus

$B_{unl,exp,\ korr,M} = 1,18 * (C_{M,unkorr.} - C_{M,bl})$. (vgl. Abbn. c Kap.6.2.1) (35)

Da der unlösliche Bindemittelgehalt zum löslichen Bindemittelgehalt im Asphalt addiert wird, muß im nächsten Schritt $B_{unl,exp,\ korr,M}$ durch Multiplikation mit dem Faktor M/A der entsprechende Wert berechnet werden, d.h. der unlösliche Bindemittelgehalt im Asphalt ergibt sich aus folgender Gleichung

$B_{unl,exp,korr,A} = M/A * B_{unl,exp,\ korr,M}$. (vgl. Abbn. d Kap.6.2.1) (36)

Letztendlich kann dieser experimentell ermittelte unlösliche Bindemittelgehalt mit dem empirisch mittels der Füllergleichung (Gl. 25) berechnetem Wert verglichen werden. Er wird als unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) bezeichnet und gibt den prozentualen Anteil des experimentellen zum errechneten Wert $100 * B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ (vgl. Abbn. e Kap.6.2.1) an.

5.2 Zusammensetzung, Herstellung und Weiterbehandlung der Modell-Asphaltgemische vor der Untersuchung durch Extraktion

5.2.1 Modell-Asphaltbeton 0/11

Die Modell-Asphaltbetone wurden mit Bitumen 70/100 (Nr. 1013) hergestellt. Der Zugabebindemittelgehalt beträgt 7,0 M.-%.

Als Mineralstoffe werden gewaschene, von Überkorn und Unterkorn befreite bei 110 °C getrocknete Kornklassen eingesetzt. Dabei werden Mineralgemische gleicher Korngrößenzusammensetzung hergestellt, welche sich durch den eingesetzten Mineralstoff selbst (je sechs Mineralstoffe S, Q, D, L, A, G als Referenzgesteine) und die Beteiligung von 10 M.-%

Fremdfüller (K) oder Eigenfüller der angeführten Mineralstoffe unterscheiden. Die Füller wurden in zwei Kornklassen 0/0,063 und 0,063/0,09 im Verhältnis der Kornzusammensetzung der vom Überkorn befreiten Lieferkörnung eingesetzt.

Die übrigen Kornklassen waren wie folgt beteiligt:

8/11	20 M.-%	204,60 g
5/8	15 M.-%	153,45 g
2/5	15 M.-%	153,45 g
0,71/2	10 M.-%	123,00 g
0,25/0,71	15 M.-%	153,45 g
0,09/0,25	15 M.-%	153,45 g
0/0,09	10 M.-%	123,00 g mit füllerspezifischer Zusammensetzung

Zur Herstellung von theoretisch 1100 g Modell-Asphaltbeton 0/11 wurden 1023,00 g der Mineralstoffe genannter Rezeptur benötigt und entsprechend im kalten Zustand eingewogen. Anschließend wurden sie die im Wärmeschrank auf 160 °C einzeln je Kornklasse für 2 Stunden gelagert.

77,00 g Bitumen 70/100, ebenfalls kalt eingewogen, wurden innerhalb von 15 Minuten verflüssigt und die Mischung auf dem erhitzten Sandbad vollzogen. Die zum Mischen benötigten Geräte (Mischschüssel und Schaufel) wurden zuvor im sauberen Zustand gewogen zwecks Kontrolle der Masse des hergestellten Asphaltes. Bei der nachfolgenden Extraktion wurden Schüssel und Schaufel quantitativ vom anhaftenden Bitumen oder Mörtelresten befreit und mit der Mischung vereinigt.

Bevor die Extraktion erfolgte, wurden drei Varianten einer Vorgeschichte realisiert.

Die Ziffer 1 ist gleichbedeutend, daß nach Abkühlen und Wägen des Modell-Asphaltbetons sofort mit der Extraktion und anschließender Wiedergewinnung des löslichen Bitumens (Verfahren DIN 1996-06A-W1-KR-Z) begonnen wurde.

Die Ziffer 2 ist gleichbedeutend damit, daß der frisch hergestellte Asphalt mit Schüssel und Schaufel 4 Wochen bei Raumtemperatur staubfrei gelagert wurde und anschließend extrahiert wurde.

Die Ziffer 3 ist gleichbedeutend damit, daß der frisch hergestellte Asphalt unmittelbar angeschlossen an das Mischen wieder mit Schaufel und Schüssel, nicht abgedeckt (mit einer Ausnahme) einer Wärmebehandlung von 5 Stunden bei 163 °C und Umluft ausgesetzt wurde und nach dem Abkühlen und Wägen die Extraktion erfolgte.

Die Anzahl der Varianten, welche sich bei Annahme einer Einzeluntersuchung ergibt, beträgt 22 (tatsächlich 27), da die mit Eigenfüller dotierten Modell-Asphaltbetone nur der Sofortbehandlung 1 unterzogen wurden und die Mineralstoffe A und G nicht bezüglich der 4-Wochen-Lagerung untersucht wurden.

5.2.2 Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Bei gleicher Vorgehensweise wurden mit einem Bitumen 30/45 (Nr. 934) Mischungen von je 500 g hergestellt. Der Füllergehalt beträgt 40 M.-% und der Bindemittelgehalt 15 M.-%.
Die Anzahl der Mischungen wurde eingeschränkt. Es wurden nur AM 0/2 mit Fremdfüller (K) hergestellt und bezüglich der Vorgeschichte bis zur Extraktion wurden nur Verfahrensweise 1 (Sofortextraktion) und 3 (thermische Beanspruchung für 5 Stunden bei 163 °C) realisiert. Daraus ergeben sich für die sechs Referenzgesteine mindestens 12 Mischungen ohne Berücksichtigung von Doppelbestimmungen. Zur Herstellung von theoretisch 500 g Modell-Asphaltmastix 0/2 werden 75 g Bitumen und 425 g Mineralstoffe benötigt.

0,71/2	25 M.-%	106,25 g
0,25/0,71	20 M.-%	85,00 g
0,09/0,25	15 M.-%	63,75 g
0/0,09	40 M.-%	170,00 g

5.2.3 Bitumen-Mineralstoff-Gemische unterschiedlicher Kornklassen

Des weiteren wurden von sämtlichen sechs Referenzgesteinen alle Kornklassen < 11,2 mm mit Bitumen 70/100 unter gleichen Bedingungen mit Ausnahme des Bindemittelgehaltes gemischt und der Sofortextraktion – Verfahrensweise 1 unterzogen. Dabei wurden von den Kornklassen > 0,09 mm Mischungen von 100 g, (36 [+ 1 für Orthophyr 2/5] Mischungen ohne Wiederholungen) von < 0,09 mm Mischungen von 50 g (7 Mischungen ohne Berücksichtigung von Wiederholungen) herstellt.
Die genaue Zusammensetzung der Mischungen ist im Folgenden angeführt:

Mischung mit Kornklasse 8/11	95,00 g Mineralstoff	5,00 g Bitumen
Mischung mit Kornklasse 5/8	95,00 g Mineralstoff	5,00 g Bitumen
Mischung mit Kornklasse 2/5	95,00 g Mineralstoff	5,00 g Bitumen
Mischung mit Kornklasse 0,71/2	90,00 g Mineralstoff	10,00 g Bitumen
Mischung mit Kornklasse 0,25/0,71	90,00 g Mineralstoff	10,00 g Bitumen
Mischung mit Kornklasse 0,09/0,25	80,00 g Mineralstoff	20,00 g Bitumen
Mischung mit Füller 0/0,09	32,50 g Füller	17,50 g Bitumen
	37,50 g Füller	12,50 g Bitumen
	30,00 g Füller	20,00 g Bitumen

Da die Eigenfüller der unterschiedlichen Mineralstoffe unterschiedlichen Bindemittelbedarf besitzen, erfolgte hierbei eine Variation des F/B-Verhältnisses. Angestrebt wurde das Verhältnis 65 : 35.

5.3 Extraktionsverfahren zur Bestimmung des löslichen und des unlöslichen Bindemittelgehaltes

Sämtliche unter 5.2 beschriebenenVarianten der Modell-Asphaltbetone AB 0/11, der Modell-Asphaltmastices AM 0/2 und der Bitumen-Mineralstoff-Gemische verschiedener Kornklassen wurden mit Toluol (1) als Lösemittel kalt (K) durch wiederholtes (bis zu maximal 7 Wiederholungen) Lösen bzw. Extrahieren und Dekantieren der Bitumenlösung so lange behandelt, bis die überstehende Flüssigkeit farblos war. Anschließend wurden die gesammelten Extrakte mit einer Kühlzentrifuge in 1-l-Zentrifugenbechern zwecks Entfernen der feinen mineralischen Bestandteile zentrifugiert.

Die abgesetzten feinen Feststoffe wurden mehrfach mit Toluol nachgewaschen, solange bis die überstehende Flüssigkeit ebenfalls farblos erschien.

Aus den vereinigten Bindemittellösungen wird nach der in DIN 1996 T.6 angeführten Verfahrensweise, dem Zeit-Druck-Temperatur-Regime, mit einem Vakuumrotationsverdampfer /30/ das Lösemittel entfernt und das lösliche Bitumen $B_{lös,W}$ wiedergewonnen und quantitativ erfaßt. Anschließend werden erklärlicherweise mit Ausnahme der Bitumen-Mineralstoff-Gemische unterschiedlicher Kornklassen mangels ausreichender Menge an zurückgewonnenem löslichen Bindemittel, die Nadelpenetration, der Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Aschegehalt bestimmt.

In nur zwei Fällen wird die Mischung heiß mit Trichlorethylen extrahiert und dabei der Extraktor mehrfach mit frischem Lösemittel beschickt. Das Lösemittel blieb, um das Ergebnis partiell vorwegzunehmen, dennoch gelb gefärbt, obwohl die heruntertropfende Flüssigkeit farblos erschien.

Der unlösliche Bindemittelgehalt $B_{unl,emp,A}$, nach der Füllergleichung berechnet, (vgl. Abb. 5) müßte für Modell-Asphaltbeton 0/11 bei einem Zugabe-Füllergehalt im Mineralgemisch $F_{M,v}$ von 10 M.-% zumindest bei 0,23 M.-%, für Modell-Asphaltmastix AM 0/2 und einem Zugabe-Füllergehalt von $F_{M,v}$ = 40 M.-% zumindest bei 0,62 M.-%, bei den füllerfreien Bitumen-Mineralstoff-Gemischen der Kornklassen > 0,09 mm bei 0,1 M.-% und bei den Füller-Bitumen-Mischungen, d.h. $F_{M,v}$ = 100 M.-% theoretisch bei 1,4 M.-% im Asphalt liegen.

Das bedeutet für 1100 g eines Modell-Asphaltbetons 0/11 berechneten sich 2,53 g unlösliches Bitumen und für 500 g eines Modell-Asphaltmastix 0/2 ergäben sich für $m_{B,unl,emp}$ sogar 3,10 g.

Voraussetzung für die Bestimmung des unlöslichen Bindmittelgehaltes nach Anhang C der DIN 1996 T. 6 ist die Kenntnis der Korngrößenverteilung und die Gewinnung der carbonatfreien Mineralstoffe (Abb. 6).

Der unlösliche Bindemittelgehalt wurde experimentell mit dem Zentrifugenverfahren Z, was ja nur über die Separation der carbonatfreien HCl-unlöslichen Mineralstoffe eine Aussage trifft, bestimmt. Er wurde danach dem Stand der neuen Technik dahingehend modifiziert, daß der Gehalt an organischem Kohlenstoff mittels Elemental Analyzer EA 3000 an der TU Dresden, Abteilung analytische Chemie, bestimmt wurde.
Auf die einzelnen Verfahrensschritte soll nicht nochmals eingegangen werden, da diese bereits unter 2.1 erläutert wurden. Nur die dort angeführte Gleichung (Gl. 1) ändert sich etwas, da $C_{org,unkorr,EA}$ bereits den prozentualen organischen Kohlenstoffgehalt in den carbonatfreien HCl-unlöslichen Mineralstoffen M_{cf} als Ergebnis dieser Analyse darstellt, was dem Part der nachfolgenden Gleichung (Gl. 1) entspricht.

$$\mathbf{C_{org,unkorr,EA} = \frac{K \cdot 0{,}2729}{m_{E,q}} \cdot 100} \qquad (37)$$

$$\mathbf{C_M = \frac{m_{A,M1} \cdot K \cdot 0{,}2729}{m_{E,M} \cdot m_{E,q}} \cdot 100} \qquad (1)$$

C_M Gehalt an organischem Kohlenstoff in den vom Bindemittel befreiten Mineralstoffen in %
$m_{A,M1}$ Auswaage der von Carbonaten befreiten Mineralstoffe in g
K Menge des gefundenen Kohlendioxids in der aliquoten Einwaage $m_{E,q}$ in g
$m_{E,M}$ Einwaage an vom Bindemittel befreiten Mineralstoffen in g
$m_{E,q}$ Einwaage an von Carbonaten befreiten Mineralstoffen (aliquoter Teil von $m_{A,M1}$) in g

So errechnet sich C_M ($C_{M,unkorr}$) durch folgende vereinfachte Gleichung:

$$\mathbf{C_M = \frac{m_{A,M1}}{m_{E,M}} \cdot C_{org,unkorr,EA} = \frac{M_{cf}}{100} \cdot C_{org,unkorr,EA}} \qquad (32)$$

wobei M_{cf} den prozentualen Gehalt der carbonatfreien HCl-unlöslichen Mineralstoffe darstellt.

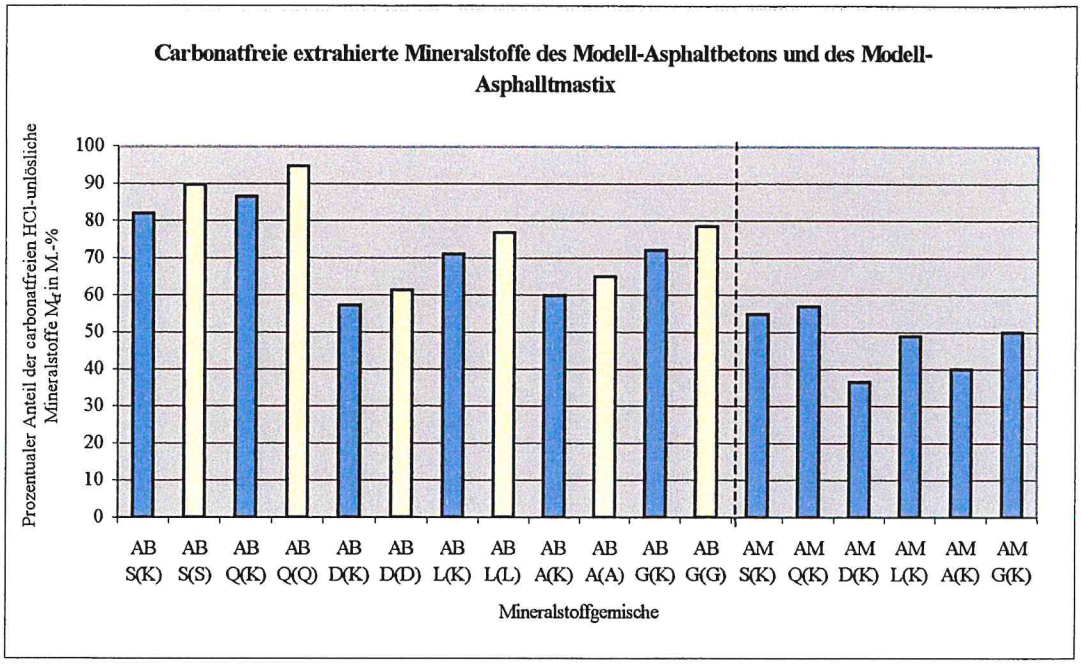


Abb. 6: Mittlere M_{cf}-Werte der extrahierten Mineralstoffgemische von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 und Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Daß die kalksteinmehlhaltigen (10 M.-%) Mineralgemische des Modell-Asphaltbetons stets einen niedrigeren M_{cf}-Wert ergeben im Vergleich zu den eigenfüllerhaltigen, wird deutlich. Ebenso ist erklärlich, daß die 40 M.-% Kalksteinfüller (FF) enthaltenden Modell-Asphaltmastices signifikant niedrigere M_{cf}-Werte besitzen.

Interessant ist auch Anlage 5.3, in der die harmonisch gemittelten M_{cf}-Werte der extrahierten Kornklassen entsprechend der Rezeptur der Modell-Asphalte, den daraus extrahierten Mineralgemisch gegenübergestellt werden. Die Übereinstimmung ist sehr gut.

5.4 Alternative Methoden zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes

5.4.1 Untersuchungen zum Glühverlust

In der DIN 1995 (von 1929) /1/ werden die in den Mineralstoffen verbliebenen organischen Bestandteile durch Glühen der vom Bindemittel befreiten und carbonatfrei gemachten Mineralstoffe ermittelt, wie unter 2.1 beschrieben.

Bereits in /18/ wurde festgestellt, daß dieser Wert zu hoch ausfallen könnte.

Es wurde dennoch versucht, auf diese Art und Weise das aufwendige analytische Verfahren nach Anhang C der DIN 1996 T.6 zur experimentellen Bestimmung des organischen Kohlenstoffs zu umgehen. Da in dieser DIN 1995 /1/ keine Aussage über die Glühtemperatur getroffen ist, wurde der Bereich von 200 °C bis 1000 (1200) °C in 200-K-Schritten für sämtliche Modell-Asphaltbetone überprüft. Das setzte mehrfach wiederholte Bestimmungen der carbonatfreien HCl-unlöslichen Mineralstoffe voraus (vgl. Abb. 6).

In Porzellanschiffchen wurde bei einer mittleren Einwaage von 1 g, genau auf 0,1 mg, die carbonatfreie Probe 2 Stunden der jeweiligen Temperatur ausgesetzt und der Glühverlust $GV_{T,cf}$ bestimmt. Daraus wurde durch Multiplikation mit dem Anteil an carbonatfreier Substanz $M_{cf}/100$ in den jeweiligen Mineralstoffen der Glühverlust bezogen auf das gesamte Mineralstoffgemisch $GV_{T,M}$ berechnet und daraus wiederum der auf den gesamten untersuchten Asphalt bezogene Anteil des Glühverlustes $GV_{T,A}$ durch Multiplikation von $GV_{T,M}$ mit dem Faktor M/A ermittelt.

$$GV_{T,M} = GV_{T,cf} * M_{cf}/100 \quad (38)$$

$$GV_{T,A} = GV_{T,M} * M/A \quad (39)$$

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Anlage 4.5.1 enthalten und auszugsweise in den Abb. 7 und 8 dargestellt.

Es ist ersichtlich, daß sogar die nur bei 200 °C geglühten Mineralstoffe i.d. R.einen höheren Glühverlust $GV_{200,M}$ anzeigen als dies sich durch die Berechnung mit der Füllergleichung für den Modell-Asphalbeton 0/11 von $B_{unl,emp,A} = 0,23$ M.-% ergeben würde. Auch die o.a. Multiplikation mit in diesem Falle für M/A =0,93, Glühverlust bezogen auf den Asphalt $GV_{200,A}$ (vgl. Anlagen 5.4.1.1 bis 5.4.1.3) führt nur in Ausnahmefällen zur Übereinstimmung mit den empirischen Werten der Füllergleichung.

Es ist davon auszugehen, daß in diesem Bereich noch keine Oxidation organischer Bestandteile zu Kohlendioxid erfolgt. Die Ursache der Masseabnahme wird ein Entweichen von Kristallwasser bzw. Dehydratation sein. Die $GV_{400,A}$ –Werte betragen bereits das Doppelte bis sechsfache des empirischen Wertes (Ausnahme Q(Q) 1-1).

Der Anstieg des Glühverlustes bei steigenden Temperaturen trat erwartungsgemäß ein. Die Anwendung dieser Methode zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes kann ausgeschlossen werden.

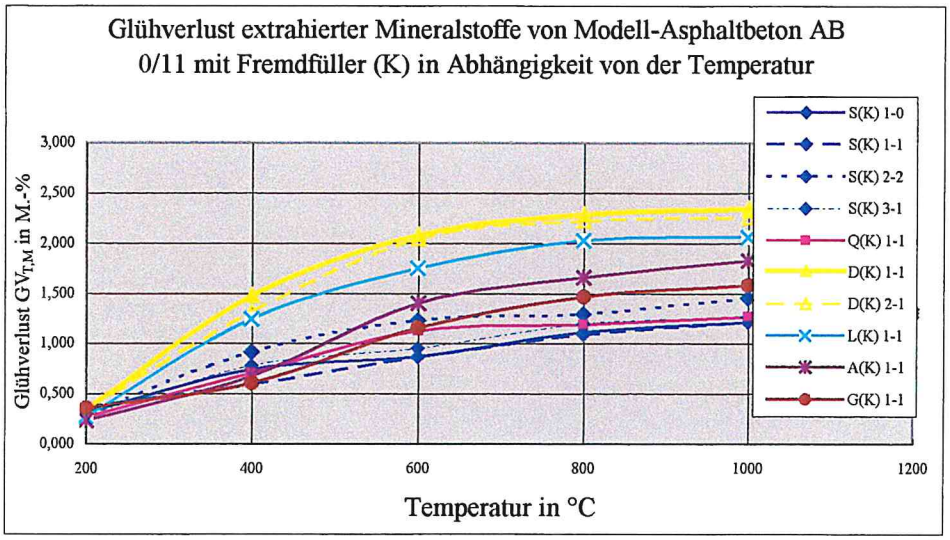


Abb. 7: Glühverlust der extrahierten Mineralstoffgemische eines Modell-Asphaltbetons mit Fremdfüller (K) in Abhängigkeit von der Glühtemperatur

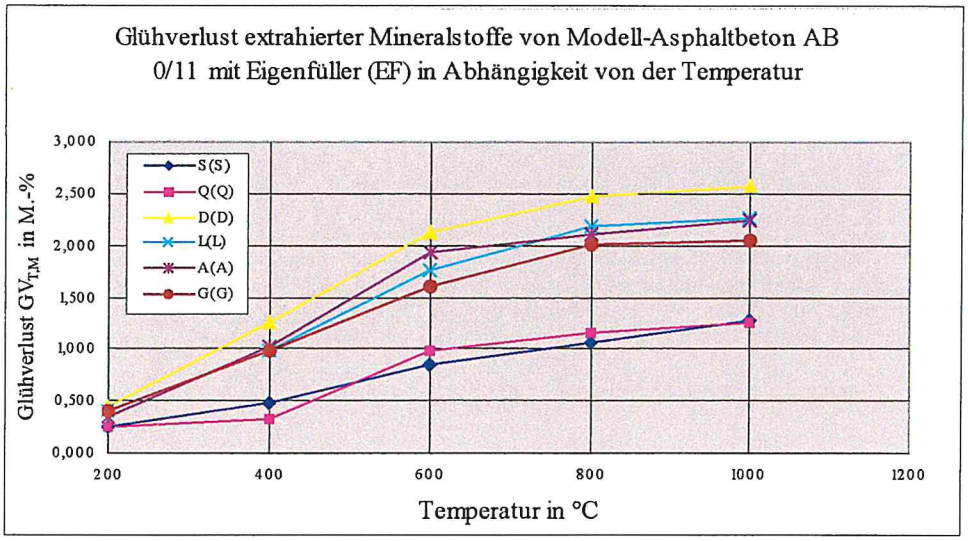


Abb. 8: Glühverlust der extrahierten Mineralstoffgemische eines Modell-Asphaltbetons mit Eigenfüller (S, Q, D, L, A, G) in Abhängigkeit von der Glühtemperatur

5.4.2 Synthese-Analyse-Prinzip

Für Modell-Asphalte besteht im Gegensatz zu den fertigen Praxisgemischen, den Asphaltgranulaten und auch nur bedingt bei den großen Labormischungen die Möglichkeit,

die analytisch exakte Zugabezusammensetzung mit der Ergebniszusammensetzung zu vergleichen. Unter 5.1 wurden bereits die theoretischen Voraussetzungen erläutert.
Dem Synthese-Analyse-Prinzip, kurz SAP bezeichnet, liegt der einfache Gedanke zugrunde, daß bei der Vereinigung zweier Komponenten und deren nachfolgender Trennung zumindest das Gesetz zur Erhaltung der Masse gelten müßte. Daß dem nicht so ist, daß ungeklärte Verluste (vgl. Anlagen 5.1.1) beim Mischen von Asphalt aus den beiden Komponenten unter den gegebenen Bedingungen auftraten, wurde bereits erläutert und soll dokumentiert sein (Tab.6).

5.4.2.1 Modell-Asphaltbeton AB 0/11

Die kalt eingewogenen Massen der einzelnen Kornklassen mit der für Modell-Asphaltbeton festgelegten Zusammensetzung (1023 g) und diese auf 160 °C erwärmten Massen der Mineralstoffe wurden für alle Mineralgemische mit FF und mit EF (sieben Kornklassen von sechs Referenzgesteinen) des Modell-Asphaltbetons auf Masseveluste überprüft. Diese Verluste ($m_{A,theor.} - m_{A,v}$), zunächst auf Wasser und Kristallwasser m_w in den Mineralstoffen zurückgeführt, waren tatsächlich größer und konnten nur unvollständig geklärt werden.
Daß sich die Qualität der nach der Vereinigung zu Asphalt wieder durch Extraktion getrennten Komponenten ändert, ist bekannt, die Mineralstoffe sind durch den Bitumenkontakt hydrophobiert und haben mehr oder weniger Bitumen absorbiert, worauf auch bei /26/27/28/ in Verbindung mit SUPERPAVE hingewiesen wird.
Geringfügige Kornverfeinererungen durch den Misch- und Wiedergewinnungsprozeß können ebenfalls auftreten. Das eingesetzte Bindemittel ändert sowohl seine Qualität in Abhängigkeit von dem Intermezzo zwischen Synthese und Analyse als auch seine Quantität in Form des wiedergewonnenen löslichen Bindemittels, vermindert um den absorbierten, den verschluckten Anteil, welcher nicht wieder durch organische Lösemittel herausgelöst werden kann. Das ist ein irreversibler Prozeß. Nur durch chemische Umwandlung/Oxydation zu CO_2 und H_2O und Zerstörung der ursprünglichen Molekülstruktur des Kohlenwasserstoff-gemisches ist dieses unlösliche Bitumen substanziell experimentell faßbar. Das kann prinzipiell durch Verbrennung im Ofen wie auch durch Verbrennung auf nassem Wege mit Chromschwefelsäure /18/ erfolgen. Bei letzteren Verfahren wird der anorganische Kohlenstoff mit HCl zum einen und der Gesamtkohlenstoff im Form von CO_2 zum anderen nachgewiesen und aus der Differenz auf den organischen Kohlenstoff geschlußfolgert.
Das Synthese-Analyse-Prinzip, das exaktes analytisches Arbeiten erfordert, ergibt eine relativ einfache Möglichkeit, das unlösliche Bitumen im Asphalt zu bestimmen. Dies ist auch eine

Art Differenzmethode, bei welcher die bekannte Masse des eingesetzten Bitumens $m_{B,v}$ mit der Masse des zurückgewonnenen löslichen Bitumens $m_{B,lös} = m_{B,n}$ verglichen wird.
Die Differenz wird als unlösliches Bitumen $m_{B,unl,SAP}$ bezeichnet, woraus sich der unlösliche Bindemittelgehalt im Asphalt durch Bezug auf die Asphaltmasse $B_{unl,SAP,A}$ berechnet.
Im folgenden sind die Ergebnisse tabellarisch (Tab. 6) erfaßt und in den Abb. 9, 10 dargestellt.

Tab. 6: Berechnung des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,SAP,A}$ im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 S

Mineral-stoffe des Modell-asphalt-betons AB 0/11	Vorbehand-lung des Asphaltes vor Extraktion mit Toluol - K Test-Nr.	$m_{B,v}$ eingewogene Masse Bitumen 70/100 B_v = 7 M.-%	$m_{M,v}$ eingewogene Masse Mineral-stoffe	$m_{A,v}$ Masse des Asphaltes nach dem Mischen ($m_{A,theor.}$ = 1100 g theoretisch)	$m_{B,n} = m_{B,lös}$ Masse des rückgewon-nenen Bitumens	$m_{M,n}$ Masse der extrahierten Mineralstoffe	$m_{A,n}$ Summe der Massen $m_{B,n} + m_{M,n}$	Asche im extra-hierten Bitumen DIN 52005	$B_{unl,SAP,A}$ nach Synthese-Analyse-Prinzip
		g	g	g	g	g	g	M.-%	M.-%
S(K)	1-1	77,00	1023,00	1093,44	75,43	1016,91	1092,34	0,21	0,144
S(K)	1-2	77,00	1023,00	1093,41	75,71	1020,52	1096,23	0,14	0,118
S(S)	**1-1 EF**	77,00	1023,00	1092,98	76,06	1017,46	1093,52	0,18	0,086
S(K)	2-1	77,00	1023,00	1093,77	75,57	1021,18	1096,75	0,17	0,131
S(K)	2-2	77,00	1023,00	1094,01	75,44	1019,30	1094,74	0,14	0,143
S(K)	3-1	77,00	1023,00	1093,94	75,00	1021,00	1096,00	0,34	0,183
S(K)	3-2	77,00	1023,00	1094,04	74,40	1019,75	1094,15	0,22	0,238
Q(K)	1-1	77,00	1023,00	1097,37	74,04	1024,58	1098,62	0,21	0,270
Q(Q)	**1-1 EF**	77,00	1023,00	1094,46	74,34	1023,40	1097,74	0,15	0,243
Q(K)	2-1	77,00	1023,00	1097,18	74,50	1022,65	1097,15	0,23	0,228
Q(K)	2-2	77,00	1023,00	1096,53	75,26	1022,60	1097,86	0,14	0,159
Q(K)	3-1	77,00	1023,00	1096,93	72,10	1026,27	1098,37	0,18	0,447
Q(K)	$3\text{-}3_{abgedeckt}$	77,00	1023,00	1097,25	73,33	1024,80	1098,13	0,18	0,334
D(K)	1-1	77,00	1023,00	1094,40	76,04	1022,90	1098,94	0,15	0,088
D(D)	**1-1 EF**	77,00	1023,00	1094,34	75,99	1020,72	1096,71	0,13	0,092
D(K)	2-1	77,00	1023,00	1096,32	76,37	1022,26	1098,63	0,14	0,057
D(K)	3-1	77,00	1023,00	1096,25	75,88	1021,00	1096,88	0,18	0,102
L(K)	1-1	77,00	1023,00	1099,06	76,33	1021,80	1098,13	0,12	0,061
L(L)	**1-1 EF**	77,00	1023,00	1098,21	76,23	1022,91	1099,14	0,15	0,070
L(K)	2-1	77,00	1023,00	1099,06	75,90	1023,70	1099,60	0,23	0,100
L(K)	3-1	77,00	1023,00	1099,12	75,78	1023,44	1099,22	0,28	0,111
A(K)	1-1	77,00	1023,00	1098,78	75,59	1022,74	1098,33	0,17	0,128
A(A)	**1-1 EF**	77,00	1023,00	1097,98	76,18	1021,63	1097,81	0,13	0,075
A(K)	3-1	77,00	1023,00	1099,18	75,32	1023,45	1098,77	0,23	0,153
G(K)	1-1	77,00	1023,00	1099,36	76,26	1022,69	1098,95	0,17	0,067
G(G)	**1-1 EF**	77,00	1023,00	1099,07	76,44	1023,05	1099,49	0,15	0,051
G(K)	3-1	77,00	1023,00	1099,54	76,28	1023,50	1099,78	0,16	0,065

Es ist ersichtlich, daß sich die sechs Referenzgesteine unterschiedlich verhalten. Das zeigt sich bereits nach der Sofortextraktion (1) des Asphaltmischgutes, die im wesentlichen mit der Extraktion nach der 4-Wochenlagerung übereinstimmt, so daß bei den Gesteinen A und G darauf verzichtet wurde.

Würde eine Reihenfolge, basierend auf dem Mittel der Ergebnisse der Vorgeschichte 1 und 2, eingeschlossen die Varianten mit Eigenfüller X(X) gebildet, so lassen sich die im AB 0/11 mit Bitumen 70/100 kontaktierten Mineralstoffe bezüglich ihrer Absorption wie folgt reihen: G, L, D, A, S, Q, wobei letzteres mit Abstand den höchsten Wert (0,223 M.-%) erreicht.

Wird die Reihenfolge nach thermischer Beanspruchung des Asphaltmischgutes vor der Extraktion bewertet, ergibt sich folgende unwesentlich veränderte Reihung auf höherem Niveau: G, D, L, A, S, Q. Wiederum nimmt Q (0,447 M.%) die Spitzenstellung ein. Daraus kann man auf eine unterschiedliche Empfindlichkeit der Grenzschichten Mineralstoff/ Bitumen gegenüber thermischen Einflüssen schließen. Die Variante, bei welcher das thermisch beanspruchte Mischgut abgedeckt wurde, zeigt eine signifikant niedrigere Absorption, einen deutlich niedrigeren unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,SAP,A}$.

Wie aus den Abb. 9, 10 ersichtlich, liegt der $B_{unl,SAP,A}$-Wert in der Mehrheit der Fälle unterhalb des nach der Füllergleichung berechneten Wertes von $B_{unl,emp,A}$ = 0,23 M.-%.

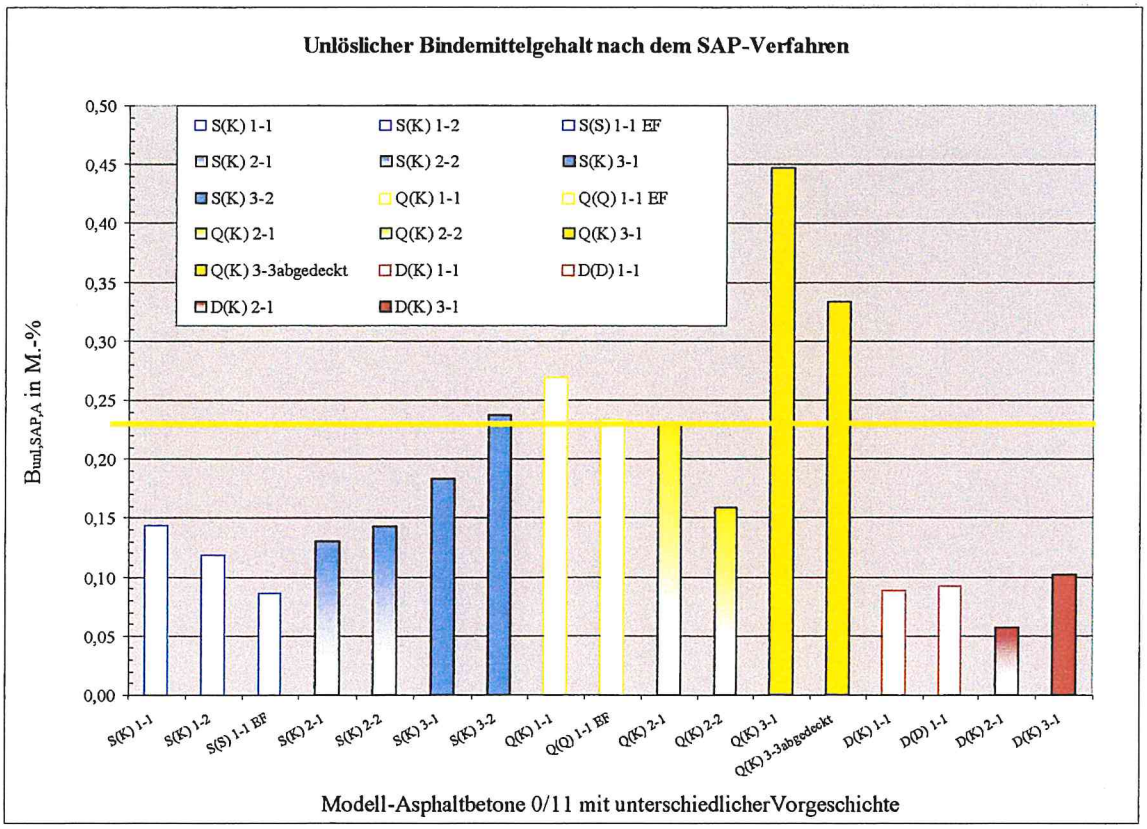


Abb. 9: Unlöslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbetonen AB 0/11 unterschiedlicher Mineralstoffe (S, Q, D)

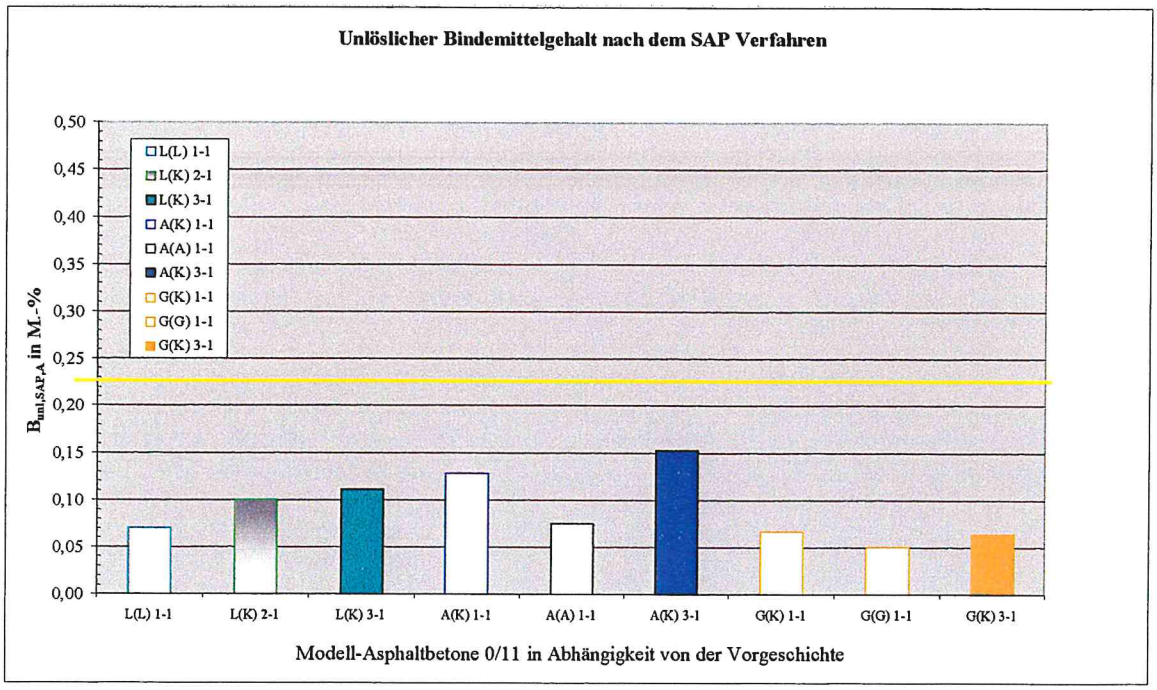


Abb. 10: Unlöslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbetonen AB 0/11 unterschiedlicher Mineralstoffe (L, A, G)

5.4.2.2 Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Die kalt eingewogene Masse der Mineralstoffgemische (425 g) und die Masse der auf 160 °C erwärmten Mineralstoffe wurde für alle Mineralgemische (4 Kornklassen) des Modell-Asphaltmastix auf Masseveluste überprüft. Diese Verluste (Anlage 5.1.2), auf Wasser und Kristallwasser zurückgeführt m_w klären nur unvollständig die tatsächlich aufgetretenen. Im folgenden sind die Ergebnisse tabellarisch (Tab. 7) erfaßt und in der Abb. 11 dargestellt.

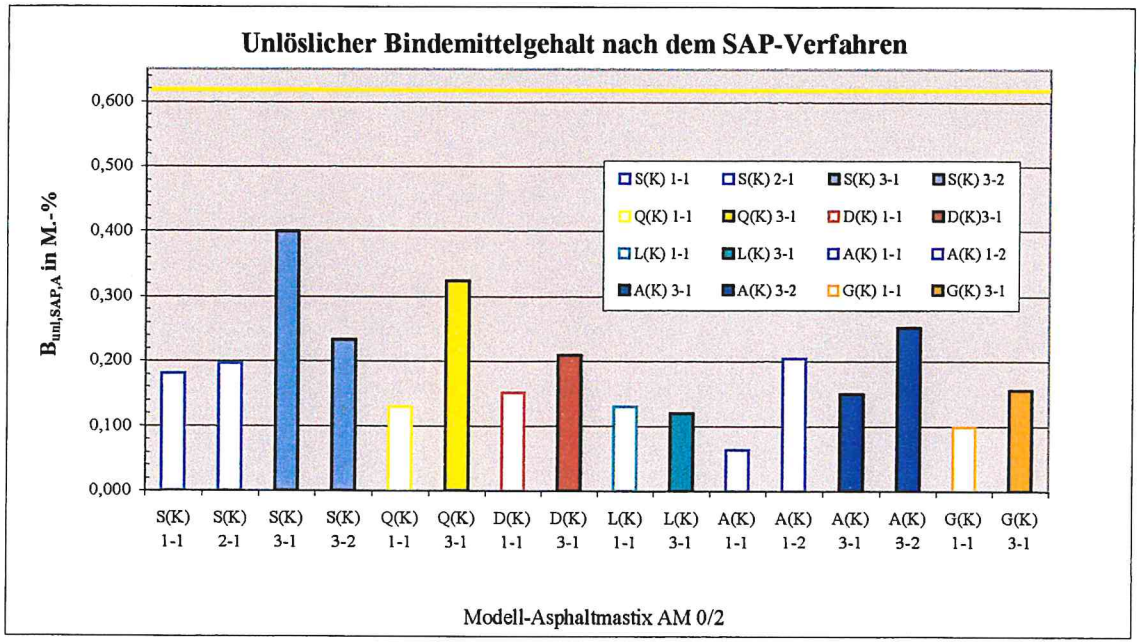


Abb. 11: Unlöslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltmastix AM 0/2 unterschiedlicher Mineralstoffe (S, Q, D, L, A, G)

Tab. 7: Berechnung des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,SAP,A}$ im Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Mineral-stoffe des Modell-asphalt-mastix AM 0/2	Vorbehand-lung des Asphaltes vor Extraktion mit Toluol - K Test-Nr.	$m_{B,v}$ eingewogene Masse Bitumen 30/45 B_v =15 M.-%	$m_{M,v}$ eingewogene Masse Mineral-stoffe	$m_{A,v}$ Masse des Asphaltes nach dem Mischen ($m_{A,theor.}$ = 500 g theoretisch)	$m_{B,n} = m_{B,lös}$ Masse des rückgewon-nenen Bitumens	$m_{M,n}$ Masse der extrahierten Mineralstoffe	$m_{A,n}$ Summe der Massen $m_{B,n} + m_{M,n}$	Asche im extra-hierten Bitumen DIN 52005	$B_{unl,SAP,A}$ nach Synthese-Analyse-Prinzip
		g	g	g	g	g	g	M.-%	M.-%
S(K)	1-1	75,00	425,00	497,84	74,10	426,10	500,20	0,18	0,181
S(K)	2-1	75,00	425,00	497,82	74,02	425,19	499,21	0,14	0,197
S(K)	3-1	75,00	425,00	497,52	73,01	425,94	498,95	0,26	0,400
S(K)	3-2	75,00	425,00	498,04	73,84	426,79	500,63	0,13	0,233
Q(K)	1-1	75,00	425,00	498,75	74,35	425,22	499,57	0,11	0,130
Q(K)	3-1	75,00	425,00	498,72	73,39	425,87	499,26	0,17	0,323
D(K)	1-1	75,00	425,00	498,41	74,24	424,54	498,78	0,13	0,152
D(K)	3-1	75,00	425,00	498,27	73,96	425,08	499,04	0,15	0,209
L(K)	1-1	75,00	425,00	499,30	74,35	425,38	499,73	0,12	0,130
L(K)	3-1	75,00	425,00	499,27	74,40	425,31	499,71	0,13	0,120
A(K)	1-1	75,00	425,00	499,10	74,68	425,28	499,96	0,12	0,064
A(K)	1-2	75,00	425,00	498,94	73,98	424,96	498,94	0,11	0,204
A(K)	3-1	75,00	425,00	499,33	74,25	425,71	499,96	0,09	0,150
A(K)	3-2	75,00	425,00	498,33	73,74	424,91	498,65	0,12	0,253
G(K)	1-1	75,00	425,00	499,50	74,50	425,31	499,81	0,13	0,100
G(K)	3-1	75,00	425,00	499,46	74,22	425,65	499,87	0,13	0,156

Es ist ersichtlich, daß der nach der Füllergleichung berechnete Wert für $B_{unl,emp,A}$ = 0,62 M.-% keinesfalls erreicht wird, weder bei der Sofortextraktion (1) noch nach thermischer Beanspruchung vor der Extraktion (3). Auf die Lagerungsvariante (2) wurde mit Ausnahme von S verzichtet. Es ist zu beobachten, daß die Unterschiede zwischen den beiden Varianten der Vorgeschichte z. T. nur geringfügig sind. Bei einer Reihung unter Berücksichtigung aller Tests je Mineralstoff (Mittelwerte von A) und zugehöriger Vorbehandlung ergibt sich für 1: G, L, Q, A, D, S und für die Vorbehandlung 3: L, G, A, D, S, Q.

Auch bei den thermisch beanspruchten Modell-Asphaltgemischen des AM 0/2 steht der Mineralstoff Q wie beim AB 0/11 an der Spitze. Bei Sofortextraktion (1) sind die Plätze zwischen S und Q vertauscht. Möglicherweise sind die feinen Kornklassen (0,09/2) des S stärker absorbierend.

An dieser Stelle sei vorweggenommen, sowohl für Modell-AB 0/11 als auch Modell-AM 0/2,

- die $B_{unl,SAP,A}$-Werte stimmen mit den $B_{unl,exp,korr,A}$ –Werten nahezu überein.

5.5 Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach DIN 1996 T.6

5.5.1 des unlöslichen Bindemittelgehaltes

Wie bereits beschrieben, bestehen nach DIN 1996 T. 6 zwei Möglichkeiten, den unlöslichen Bindemittelgehalt zu bestimmen. So wird er empirisch mittels der Füllergleichung nach Abschnitt 8.2 bestimmt oder auch experimentell nach Anhang C.
Die Ergebnisse der nach diesen zwei Verfahren bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalte $B_{unl,emp,A}$ und $B_{unl,exp.korr,A}$ sowie ergänzend die nach dem unter 5.4.2 beschriebenen SAP – Verfahren und damit bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalte $B_{unl,SAP,A}$ sollen im folgenden gegenübergestellt werden.

5.5.1.1 nach Abschnitt 8.2 der DIN 1996 T.6

Der nach Abschnitt 8.2 berechnete empirische unlösliche Bindemittelgehalt, der sich aus der Zugabezusammensetzung, d.h. für einen Füllergehalt im Mineralgemisch $F_{M.v}$ des Modell-Asphaltbeton von 10 M.-% und für Modell-Asphaltmastix von 40 M.-% berechnet, und sich somit exakt für $B_{unl,emp,A}$ mit 0,23 M.-% bzw. 0,62 M.-% ergibt, variiert geringfügig zu meist etwas höheren Werten infolge der Ergebniszusammensetzung für $F_{M,n}$ (vgl. Anlagen 5.5.1.1.1 und 5.5.1.1.2).
Für die füllerfreien Bitumen-Mineralstoffmischungen verschiedener Kornklassen > 0,09 errechnete sich theoretisch nach der genannten Gleichung (Gl. 25) 0,1 M.-% und für die Bitumen-Füller-Gemische 1,4 M.-% (Abb. 5).

5.5.1.2 nach Anhang C der DIN 1996 T.6 unter Berücksichtigung des Standes der heutigen Technik

Unter 5.1 sind die Vorgehensweise und die Berechnungen für den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt im Asphalt $B_{unl,exp,korr,A}$ über die Zwischenstationen unlöslicher Bindemittelgehalt im Mineralstoff $B_{unl,exp,korr,M}$ ($B_{unl,exp,unkorr,M}$) und ausgehend von M_{cf}, $M_{cf,bl}$ und $C_{org,unkorr,EA}$, $C_{org,bl,EA}$, $C_{M,unkorr}$, $C_{M,bl}$ angeführt, so daß hier auf die Anlagen 5.5.1.2.1 bis 5.5.1.2.4 verwiesen werden kann, in denen die konkreten Werte für Modell-Asphaltbeton, für Modell-Asphaltmastix, für die Bitumen-Mineralstoff-Gemische unterschiedlicher Kornklassen und für die Bitumen-Füller-Gemische aufgelistet sind. In den folgenden fünf Abb. 12 bis 16 sind die unlöslichen Bindemittelgehalte für Modell-Asphaltbetone AB 0/11, die sich aus 5.4.2.1, aus 5.5.1.1 sowie 5.5.1.2 ergeben, vergleichsweise dargestellt.

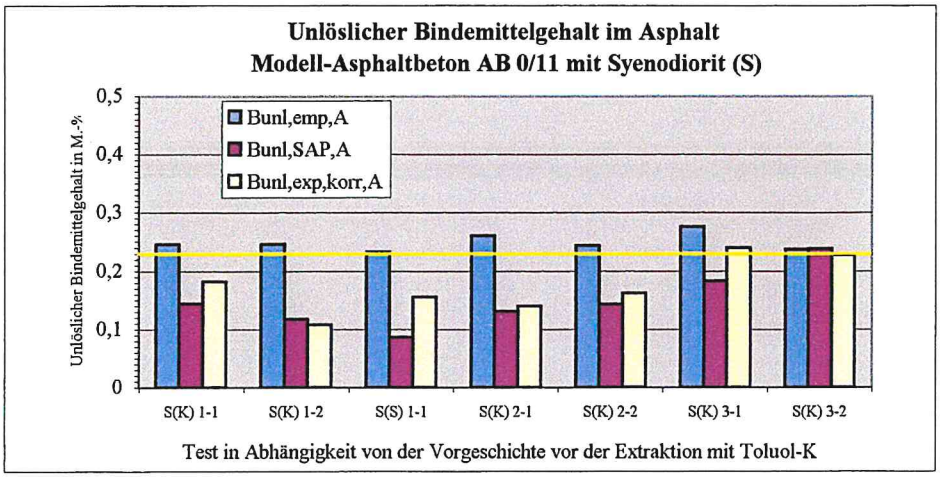


Abb. 12: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Syenodiorit)

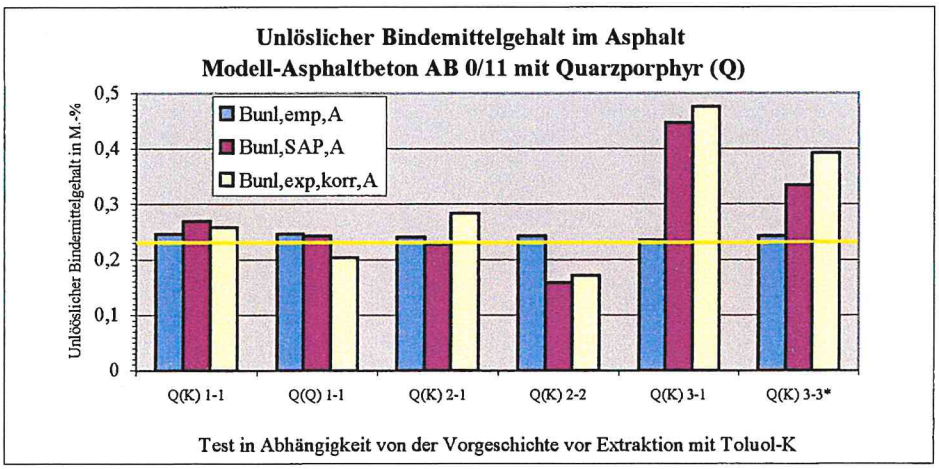


Abb. 13: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Quarzporphyr Q)

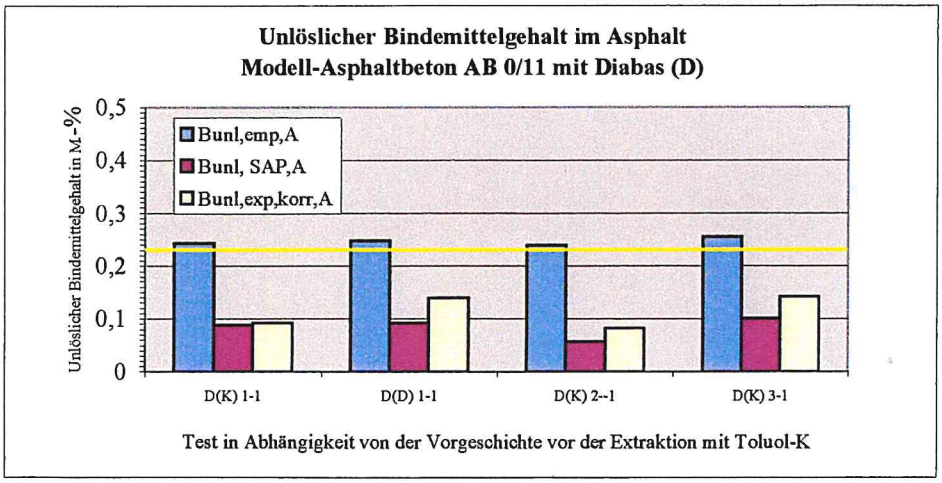


Abb. 14 : Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Diabas D)

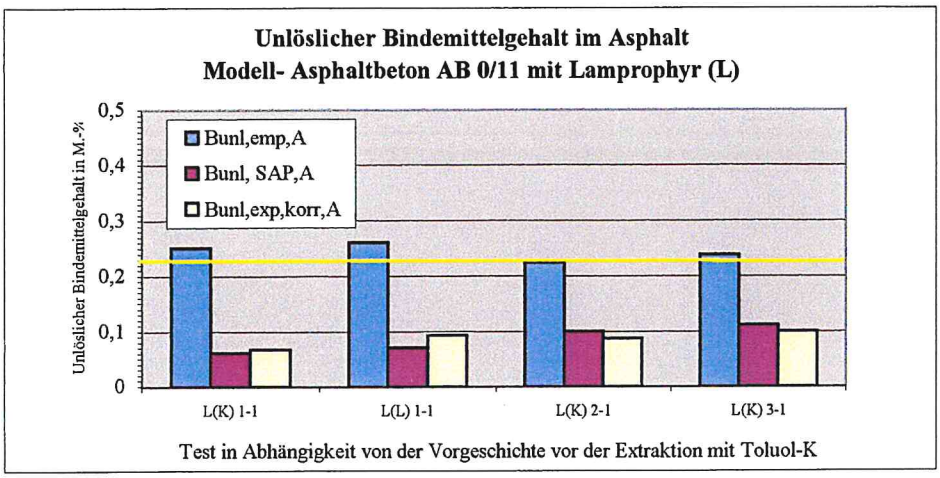


Abb. 15: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Lamprophyr L)

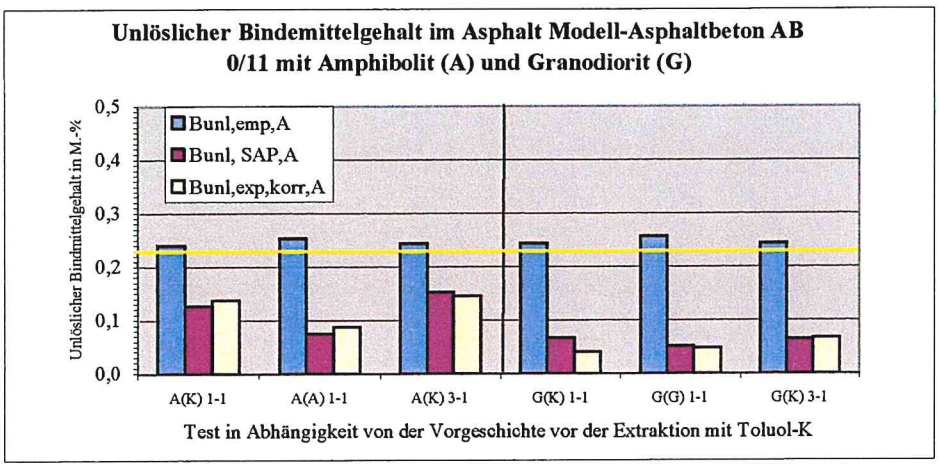


Abb. 16: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Amphibolit A und Granodiorit G)

Die experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalte, ermittelt durch das SAP-Verfahren und nach Anhang C der DIN 1996 T. 6, stimmen überwiegend gut miteinander überein. Eine Ausnahme macht der AB 0/11 mit Quarzporphyr Q, bei welchem die Größenordnung von $B_{unl,emp,A}$ erreicht oder gar überschritten wird. Ebenso stimmt bei AB 0/11 mit Syenodiorits S (Vorgeschichte 3) der empirisch bestimmte Wert etwa mit dem experimentell ermittelten überein.

Das prozentuale Verhältnis des experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,exp,korr,A}$ zum dem nach der Füllergleichung berechneten Bezugswert $B_{unl,emp,A}$ ist in folgender Tab. 8 dargestellt. Eine Reihung würde ergeben, daß die Modell-Asphalbetone mit G den niedrigsten Wert ausweisen, gefolgt von L und D, des weiteren schließen sich A, S und Q mit Spitzenstellung an.

Tab. 8: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von Modell-Asphaltbeton AB 0/11

Mineralstoffe des Modell-Asphalt-betons AB 0/11	Vorbehandlung des Asphaltes vor Extraktion mit Toluol-K Test-Nr.	$B_{unl,exp,korr,A}$ im Asphalt (B_v = 7,0 M.-%) unter Berücksich-tigung des Blindwertes	$F_{M,n}$ Füllergehalt im Mineralgemisch Ergebniszusam-mensetzung	$B_{unl,emp,A}$ im Asphalt nach Füllergleichung (0,23 M.-% theoretisch bei $F_{M,v}$ = 10 M.-%)	$100 \cdot \frac{B_{unl,exp,korr,A}}{B_{unl,emp,A}}$
		M.-%	M.-%	M.-%	%
S(K)	1-1	0,182	11,2	0,246	74,10
S(K)	1-2	0,107	11,2	0,246	43,57
S(S)	1-1 EF	0,155	10,2	0,233	66,64
S(K)	2-1	0,140	12,3	0,260	53,87
S(K)	2-2	0,162	11,1	0,244	66,31
S(K)	3-1	0,239	13,5	0,276	86,75
S(K)	3-2	0,227	11,3	0,247	91,94
Q(K)	1-1	0,259	11,2	0,246	105,46
Q(Q)	1-1 EF	0,204	11,2	0,246	83,06
Q(K)	2-1	0,284	10,8	0,240	118,14
Q(K)	2-2	0,171	11,0	0,243	70,37
Q(K)	3-1	0,476	10,3	0,234	203,51
$Q(K)_{abgedeckt}$	3-3	0,393	10,9	0,242	162,60
D(K)	1-1	0,092	11,0	0,243	37,86
D(D)	1-1 EF	0,140	11,4	0,248	56,41
D(K)	2-1	0,082	10,7	0,239	34,30
D(K)	3-1	0,143	12,0	0,256	55,86
L(K)	1-1	0,067	11,7	0,252	26,58
L(L)	1-1 EF	0,093	12,3	0,260	35,78
L(K)	2-1	0,087	9,6	0,225	38,70
L(K)	3-1	0,100	10,8	0,240	41,60
A(K)	1-1	0,138	10,8	0,240	57,40
A(A)	1-1 EF	0,087	11,8	0,253	34,33
A(K)	3-1	0,145	11,1	0,244	59,35
G(K)	1-1	0,040	11,0	0,243	16,46
G(G)	1-1 EF	0,048	12,1	0,257	18,66
G(K)	3-1	0,067	11,1	0,244	27,43

In den folgenden zwei Abb. 17, 18 sind die unlöslichen Bindemittelgehalte für Modell-Asphaltmastix AM 0/2, die sich aus 5.4.2.2, aus 5.5.1.1 sowie 5.5.1.2 ergeben, vergleichsweise dargestellt.

Bei AM 0/2 sind generell die empirisch berechneten Werte des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,emp,A}$ deutlich höher als die experimentell bestimmten $B_{unl,exp,korr,A}$.

In der Tab. 9 sind die prozentualen Relationen angeführt, welche sich zwar nicht in der Reihenfolge im Vergleich zum Modell-Asphaltbeton unterscheiden, aber im Niveau.

Die Ergebnisse des SAP-Verfahrens sind vorwiegend etwas kleiner als die nach Anhang C festgestellten.

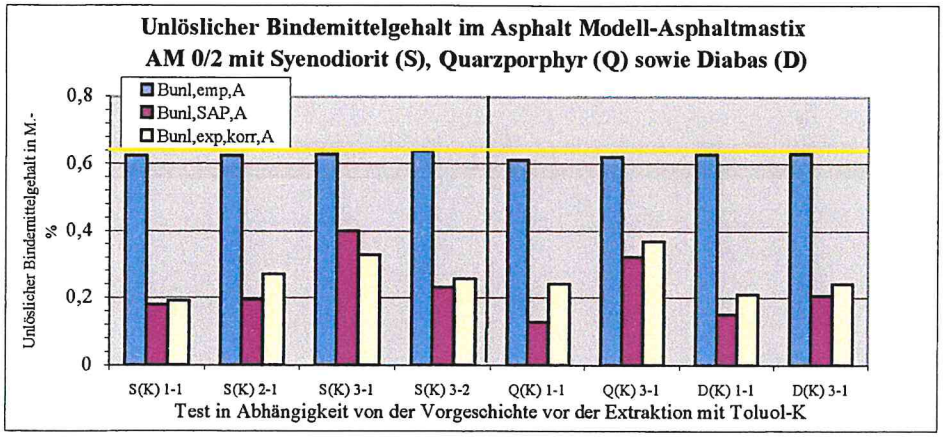


Abb. 17: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltmastix AM 0/2 (Syenodiorit S, Quarzporphyr Q, Diabas D)

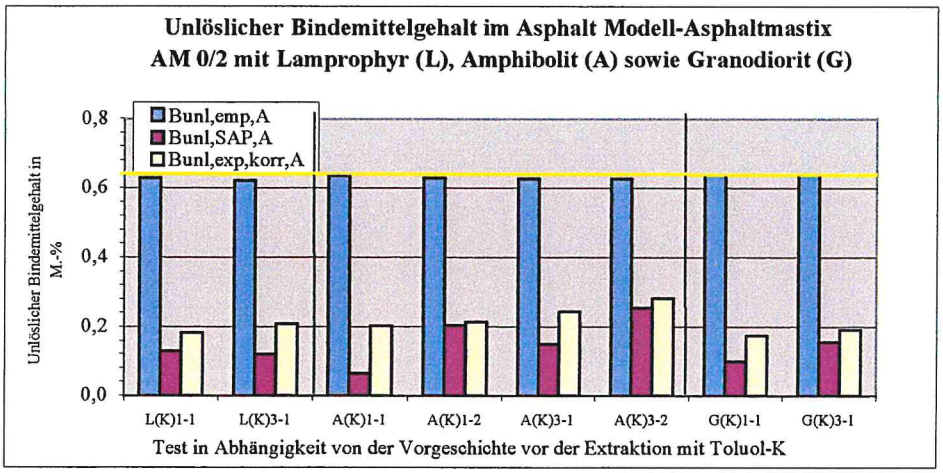


Abb. 18: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltmastix AM 0/2 (Lamprophyr L, Amphibolit A, Granodiorit G)

Tab. 9: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Mineralstoffe des Modell-Asphalt-matix AM 0/2	Vorbehandlung des Asphaltes vor Extraktion mit Toluol-K Test-Nr.	$B_{unl,exp,korr,A}$ im Asphalt (B_v = 15,0 M.-%) unter Berücksich-tigung des Blindwertes	$F_{M,n}$ Füllergehalt im Mineralgemisch Ergebniszusam-mensetzung	$B_{unl,emp,A}$ im Asphalt nach Füllergleichung (0,62 M.-% theoretisch bei $F_{M,v}$ = 40 M.-%)	$100 \cdot \frac{B_{unl,exp,korr,A}}{B_{unl,emp,A}}$
		M.-%	M.-%	M.-%	%
S(K)	1-1	0,192	40,3	0,624	30,77
S(K)	2-1	0,271	40,4	0,625	43,35
S(K)	3-1	0,329	40,7	0,629	52,30
S(K)	3-2	0,258	41,4	0,638	40,43
Q(K)	1-1	0,242	39,3	0,611	39,61
Q(K)	3-1	0,368	40,1	0,621	59,23
D(K)	1-1	0,211	40,6	0,628	33,61
D(K)	3-1	0,242	40,8	0,630	38,39
L(K)	1-1	0,182	40,8	0,630	28,87
L(K)	3-1	0,207	40,2	0,623	33,25
A(K)	1-1	0,202	41,3	0,637	31,72
A(K)	1-2	0,213	40,8	0,630	33,79
A(K)	3-1	0,243	40,5	0,627	38,79
A(K)	3-2	0,282	40,5	0,627	45,01
G(K)	1-1	0,174	41,6	0,641	27,15
G(K)	3-1	0,191	41,4	0,638	29,93

Um nachzuweisen, daß nicht der Füller F_M im Mineralstoffgemisch allein den unlöslichen Bindemittelgehalt im Asphalt bestimmt, wurden die sechs Kornklassen > 0,09 mm der sechs Referenzgesteine mit Bitumen 70/100 gemischt und sofort der Extraktion (Vorgeschichte 1) mit Toluol-K (nur im Ausnahmefall mit Trichlorethylen und heiß (TRI-H)) unterworfen. Sie werden als Bitumen-Mineralstoff-Gemische bzw. – Mischungen bezeichnet. Außerdem werden die sieben, da Kalkstein als Fremdfüller hinzukommt, Bitumen-Füller-Gemische, sofort extrahiert (Vorgeschichte 1), untersucht. Anschließend werden die extrahierten und gemahlenen Mineralstoffe durch Kochen unter Rückfluß mit HCl carbonatfrei (vgl. Anlagen 5.5.1.2.3 und 5.5.1.2.4) gemacht und im EA 3000 auf organischen Kohlenstoff analysiert. Nach Abb. 5 und uneingeschränkter Gültigkeit der Füllergleichung wäre für die füllerfreien Gemische für $B_{unl,emp,A}$ 0,1 M.-% und für die Bitumen-Mineralstoff-Gemische mit 100 M.-% Füller 1,4 M.-% zu erwarten.

Die Absolutwerte des unlöslichen Bindemittelgehaltes einschließlich der Blindwerte sind in den Anlagen 5.5.1.2.3, 5.5.1.2.4 tabelliert. Die Relativwerte, d.h. das prozentuale Verhältnis des experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,exp,korr,A}$ zu dem empirisch aus der Füllergleichung errechneten Wert $B_{unl,emp,A}$ ist in den folgenden Abb. 19 bis 25 dargestellt.

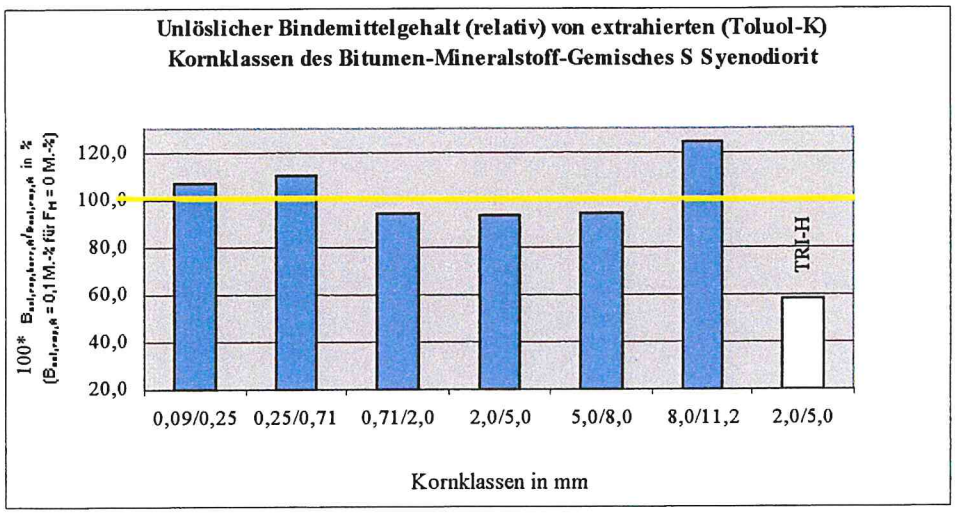


Abb. 19: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Syenodiorit-Gemische

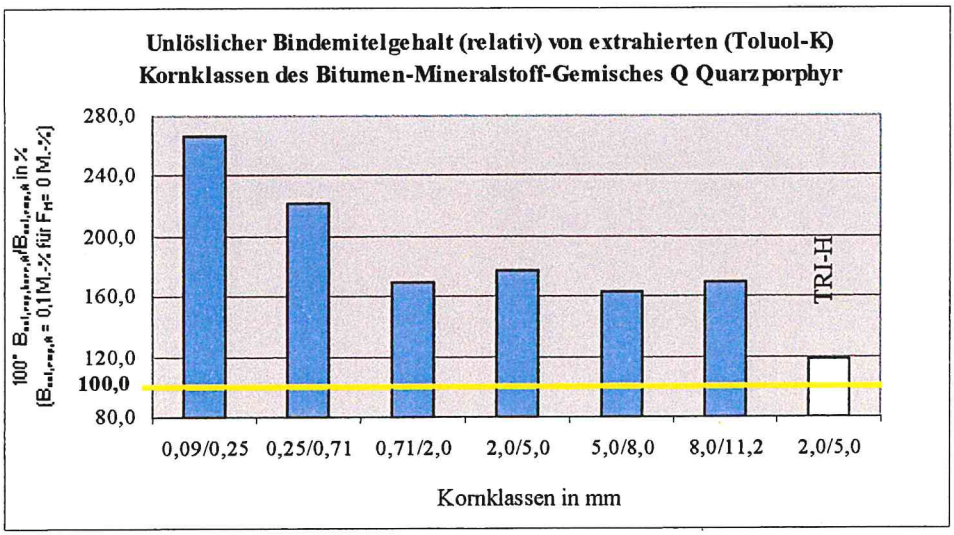


Abb. 20: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Quarzporphyr-Gemische

Die Tendenz zur Abnahme des unlöslichen Bindemittelgehaltes mit zunehmender Korngröße bzw. abnehmender Oberfläche ist, von einigen Ausnahmen abgesehen, ersichtlich.

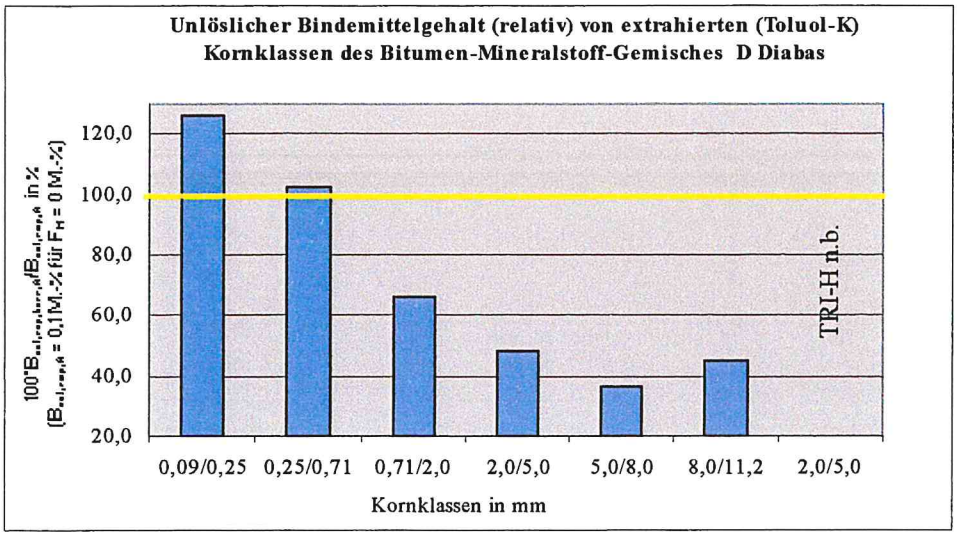


Abb. 21: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Diabas-Gemische

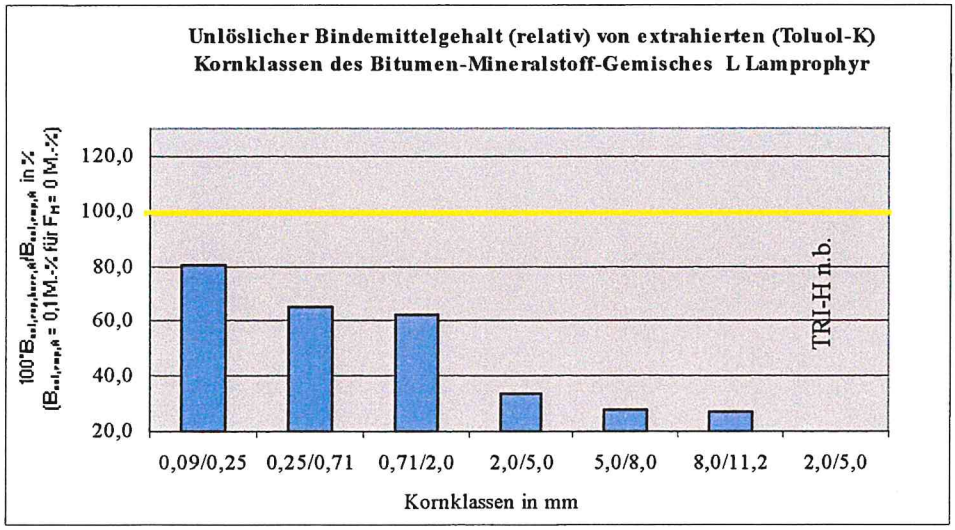


Abb. 22: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Lamprophyr-Gemische

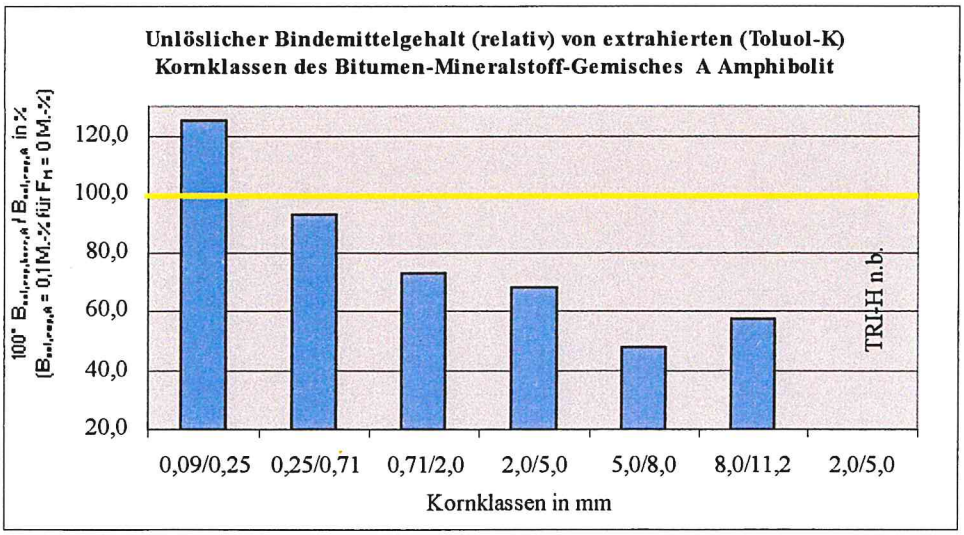
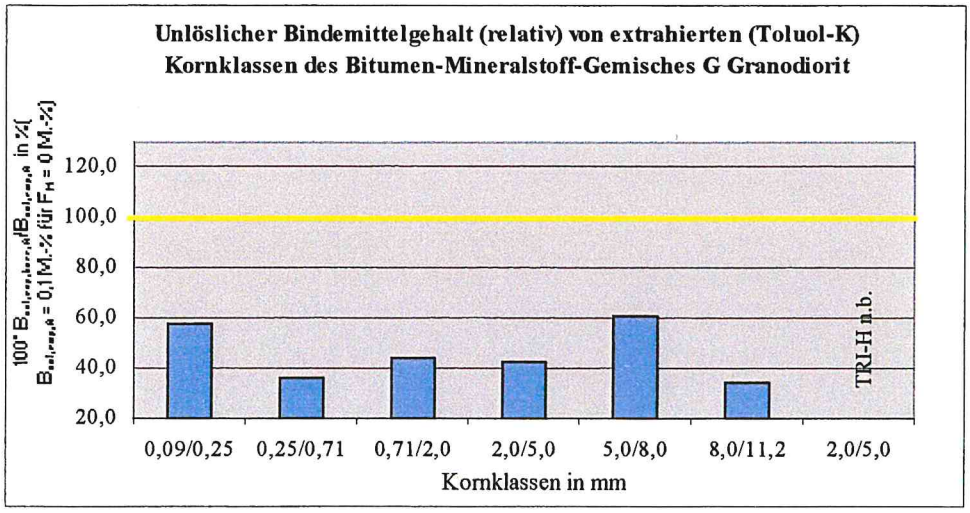


Abb. 23: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Amphibolit-Gemische

Abb. 24: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der



Bitumen-Granodiorit-Gemische

Die Mineralstoffe unterscheiden sich deutlich und bei einer Reihung unter der Prämisse, daß die sechs Kornklassen als gleichberechtigt (je 16,7 %) betrachtet werden. Mit in Folge G, L, D, A, S, Q ergibt sich erwartungsgemäß Übereinstimmung mit AB 0/11 und AM 0/2 (s. 5.4)

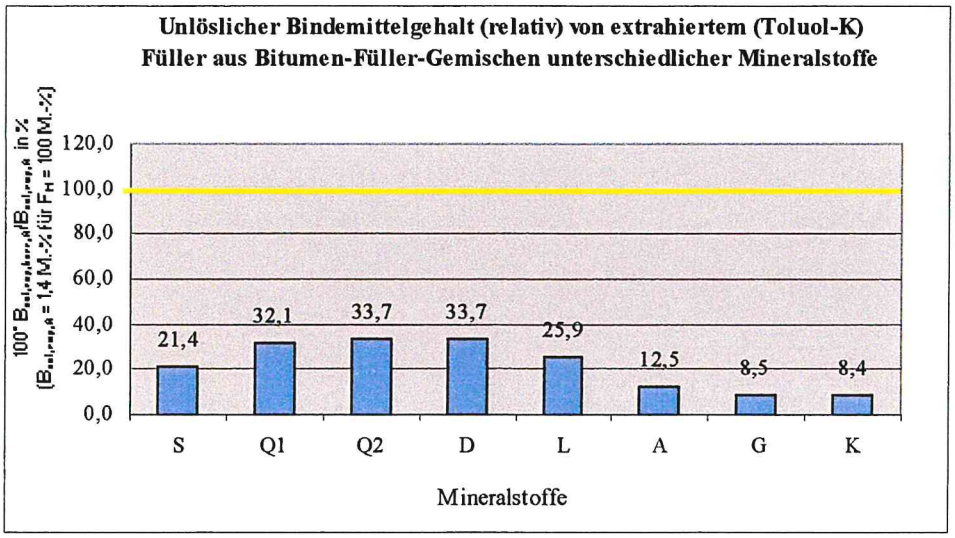


Abb. 25: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahiertem Füller unterschiedlicher Mineralstoffe

Aus den Abb. 19, 20 ist zu erkennen, daß die Heißextraktion mit Trichlorethylen (nur für S und Q, Kornklasse 2/5 durchgeführt) im Vergleich zur Kaltextraktion mit Toluol deutlich niedrigere unlösliche Bindemittelgehalte ergibt.

Bis auf die untersuchten Kornklassen (> 0,09 mm) des Quarzporphyrs und des Syenodiorit sowie die Kornklasse 0,09/ 0,25 des Amphibolits ergeben sich geringere Werte als 0,1 M.-% bzw. 100 %.

Für die extrahierten Füller liegen die Absolutwerte (vgl. Anlage 5.5.1.2.4) von $B_{unl,exp,korr,A}$ deutlich höher, aber bezüglich des theoretischen empirischen Wertes von 1,4 M.-% z.T. extrem niedrig. Kalksteinfüller K als Fremdfüller und Granodioritfüller G als Eigenfüller zeigen Übereinstimmung und ergeben mit Abstand die niedrigsten Werte.
Interessant ist auch die harmonische Mittelung der $B_{unl,exp,unkorr,M}$ –Werte der Bitumen-Mineralstoff-Gemische entsprechend der Zusammensetzung des Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (7 Kornklassen) und des Modell-Asphaltmastix AM 0/2 (4 Kornklassen), die in der Anlage 5.5.1.2.5 zu finden ist. Für das Mischgut von AB 0/11 sind die direkt ermittelten $B_{unl,exp,unkorr,M}$ -Werte meist größer oder etwa gleich groß im Vergleich zu den berechneten, beim AM 0/2 sind alle direkt aus dem Asphaltmischgut ermittelten Werte deutlich größer als die aus den beteiligten Kornklassen berechneten.

5.5.2 des löslichen Bindemittelgehaltes und des Gesamtbindemittelgehaltes

In allen betrachteten Fällen wird der lösliche Bindemittelgehalt zunächst nach dem Verfahren DIN 1996-06A-W1-KR bestimmt parallel dazu nach dem Differenzverfahren DIN 1996-06A-D1-K berechnet.
Des weiteren wird unter der Voraussetzung, die Ergebnisse der Füllergleichung seien richtig, bei bekannten Zugabebindemittelgehalt B_v ein Rückschluß auf den zu erwartenden löslichen Bindemittelgehalt, hier mit $B_{lös}$* bezeichnet, gezogen. Sie sind erwartungsgemäß (Anlagen 5.5.2.1 5.5.2.2) mit Ausnahme von Q geringer als die tatsächlich durch Wiedergewinnung erhaltenen Bindemittelwerte.
Der lösliche Bindemittelgehalt wurde sowohl auf die theoretische Einwaage EW an Asphalt $m_{A,theor.}$ als auch auf die unmittelbar vor der Extraktion im kalten Zustand bestimmte Auswaage AW an Asphaltmasse $m_{A,v}$ bezogen. Während sich diese unterschiedlichen Bezugswerte beim Wiedergewinnungsverfahren nur unbedeutend, als vernachlässigbar erweisen, treten beim Differenzverfahren deutliche Unterschiede auf (vgl. Anlagen 5.5.2.1 5.5.2.2). Es werden bei Bezug auf die Einwaage EW an Asphalt $m_{A,theor.}$ teilweise sogar ein höherer löslicher Bindemittelgehalt berechnet, als überhaupt zugegeben worden ist. Bei Verzicht auf das Nachwiegen des Asphaltes im erkalteten Zustand und Übernahme der Summe der Massen der Komponenten (Bitumen $m_{B,v}$ und Mineralstoffe $m_{M,v}$) hätten Fehlschlüsse gezogen werden können.
In folgenden Abb. 26 bis 28 sind die experimentell bestimmten löslichen Bindemittelgehalte $B_{lös,W}$ (Toluol-K) den durch Rückschluß mittels Füllergleichung ermittelten löslichen Bindemittel-gehalt $B_{lös}* = B_v - B_{unl,emp,A}$ (Gl. 27) gegenübergestellt.

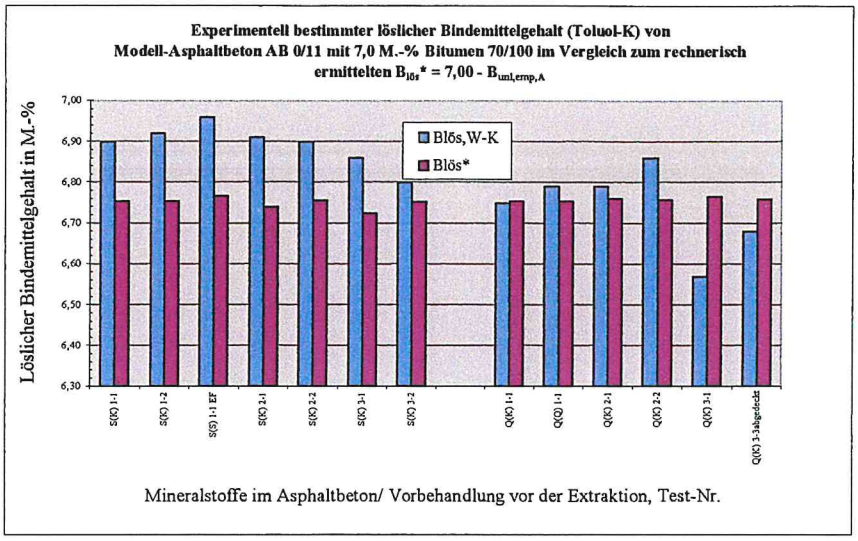


Abb.26: Löslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbeton (S , Q)

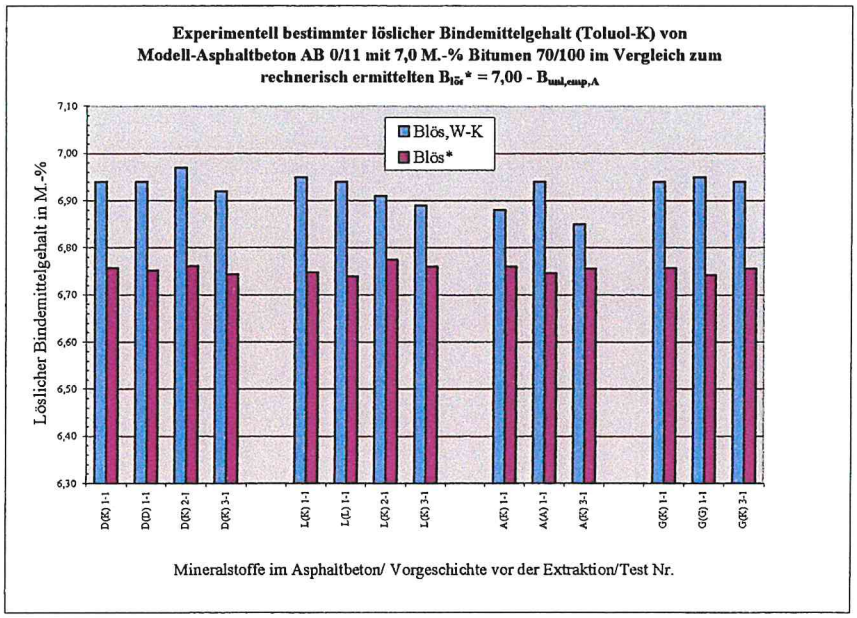


Abb. 27: Löslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbeton (D, L, A, G)

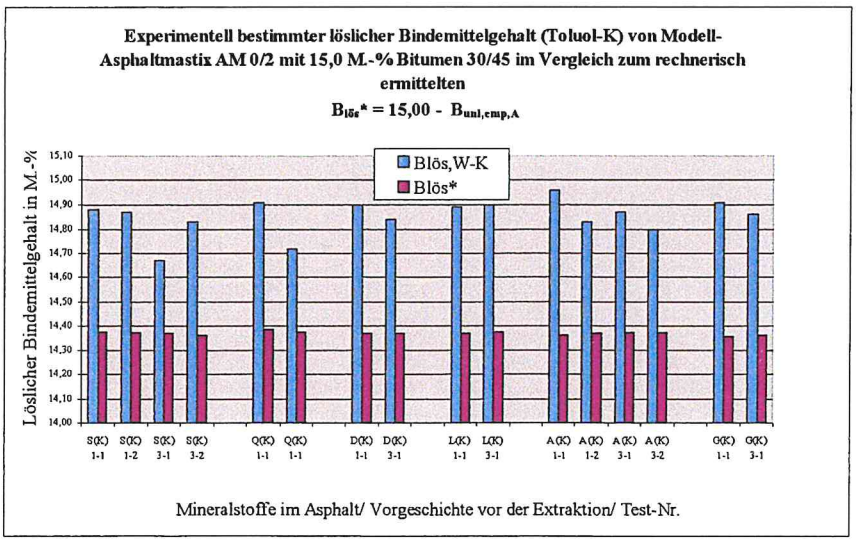


Abb. 28: Löslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltmastix (S, Q, D, L, A, G)

Die Summe von löslichem und unlöslichem Bindemittelgehalt wird nach DIN 1996 T.6 als Gesamtbindemittelgehalt deklariert. Unter dem löslichen Bindemittelgehalt kann sowohl der durch das Rückgewinnungsverfahren ermitttelte $B_{lös,W}$ als auch der durch das Differenzverfahren berechnete $B_{lös,D}$ wie aber auch aus nicht nachvollziehbaren Gründen das arithmetische Mittel aus beiden, welches einerseits nach Abschnitt 9.1 b angewendet werden muß. Andererseits kann, wenn das Differenzverfahren nicht zulässig ist, z.B. bei Schiedsanalysen der Wert $B_{lös,W}$ als verbindlicher Wert für den löslichen Bindemittelgehalt $B_{lös}$ eingesetzt werden und kann die Mittelung entfallen. Auf die Bildung des arithmetischen Mittels wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens verzichtet.

Der mit der Füllergleichung berechnete unlösliche Bindemittelgehalt B_{unl} hier stets mit $B_{unl,emp,A}$ bezeichnet, wird zunächst als verbindlich, vertragsrelevant betrachtet, da nur in Ausnahmefällen die experimentelle Bestimmung angewendet wird. In der Praxis ist diese Art der Bestimmung unüblich, d.h. sie wird nicht durchführt.

Die Gesamtbindemittelgehalte für die Modell-Asphaltbetone AB 0/11 und die Modell-Asphaltmastices AM 0/2 mit den sechs Referenzgesteinen und unterschiedlichen Vorgeschichten vor der Extraktion sind in folgenden Abb. 29 bis 31 dargestellt. Es ist ersichtlich, daß mit Ausnahme der Modellasphalte des Quarzporphyrs Q unter obiger Prämisse die Ergebnisbindemittelgehalte $B_{ges,n}$ höher sind als die Zugabebindemittelgehalte $B_{ges,v}$. Das macht beim Modell-Asphaltbeton maximal 0,21 M.-% (- 0,19 M.-% bei Q) aus. Im Mittel macht das (0,16 ± 0,04) M.-% für 21 Varianten, wobei Q unberücksichtigt bleibt. Beim Modell-Asphaltmastix übertrifft der ermittelte B_{ges} den Zugabebindemittelgehalt maximal um 0,6 M.-% und macht im Mittel der 16 Varianten (0,48 ± 0,08) M.-% aus.

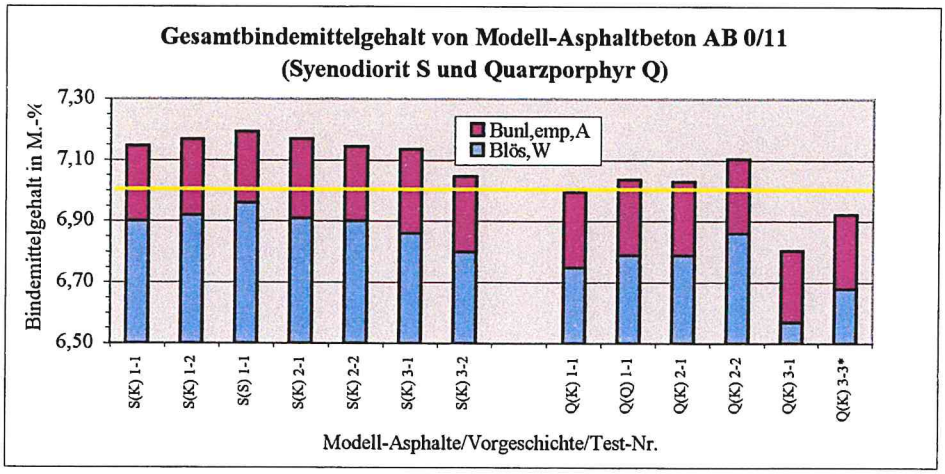


Abb. 29: Gesamtbindemittelgehalte B_{ges} von Modell Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,emp,A}$

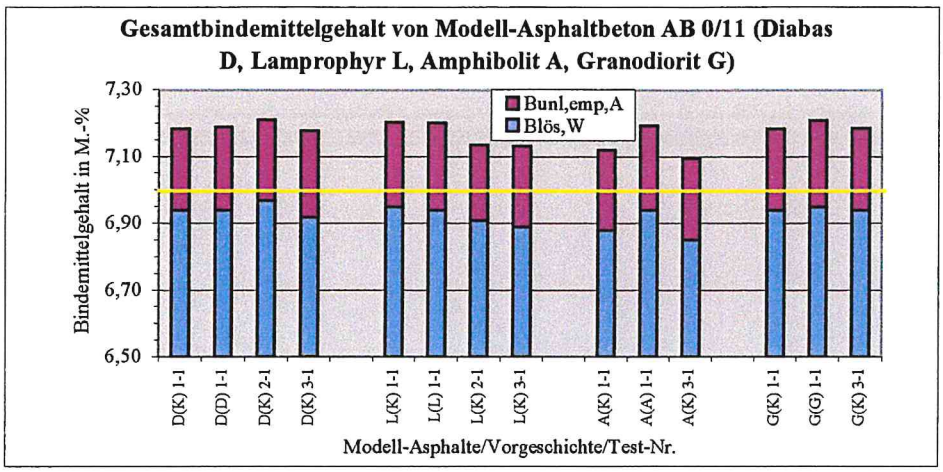


Abb. 30: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,emp,A}$

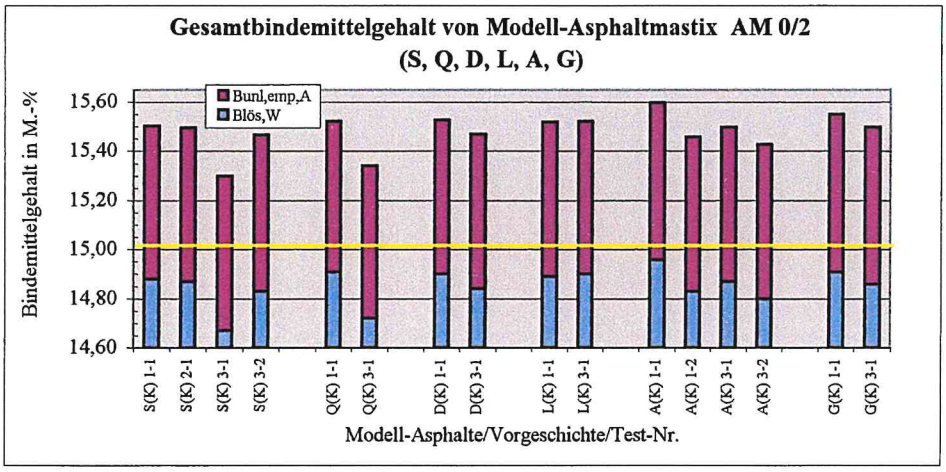


Abb. 31: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltmastix AM0/2 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,emp,A}$

Wird hingegen der experimentell ermittelte unlösliche Bindemittelgehalt bei der Berechnung des Gesamtbindemittelgehaltes berücksichtigt (Abb. 32 bis 34), ergibt sich mit vergleichbar geringen Abweichungen der Zugabebindemittelgehalt von 7,0 M.-% für die Modell-Asphaltbetone AB 0/11 (im Mittel von 27 Werten Abweichungen von 0,04 M.-% absolut) und 15,0 M.-% für die Modell-Asphaltmastizes AM 0/2 (im Mittel von 16 Werten Abweichungen von 0,09 M.-%).

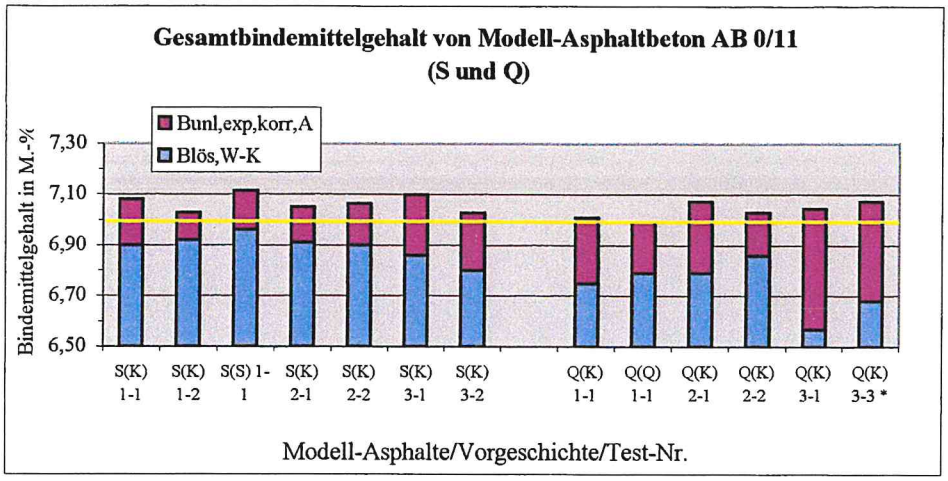


Abb. 32: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,exp,korr,A}$ (vgl. Tab. 8)

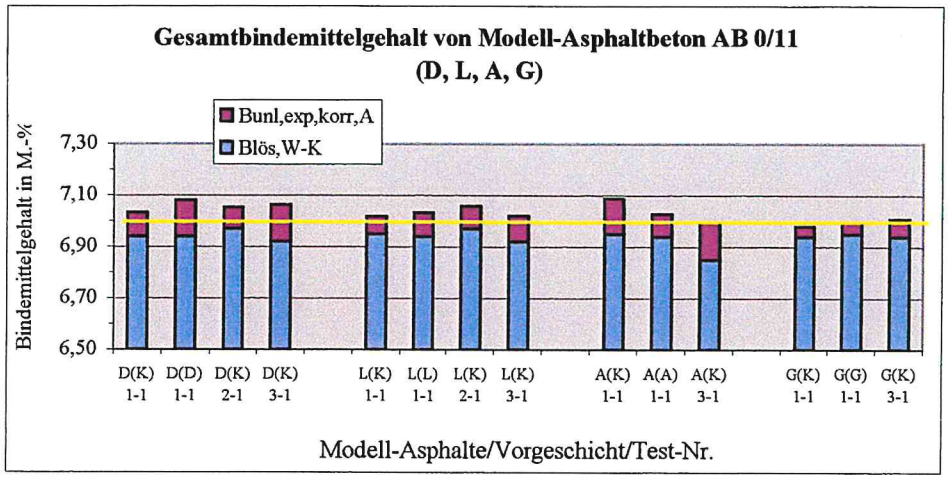


Abb. 33: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,exp,korr,A}$ (vgl. Tab. 8)

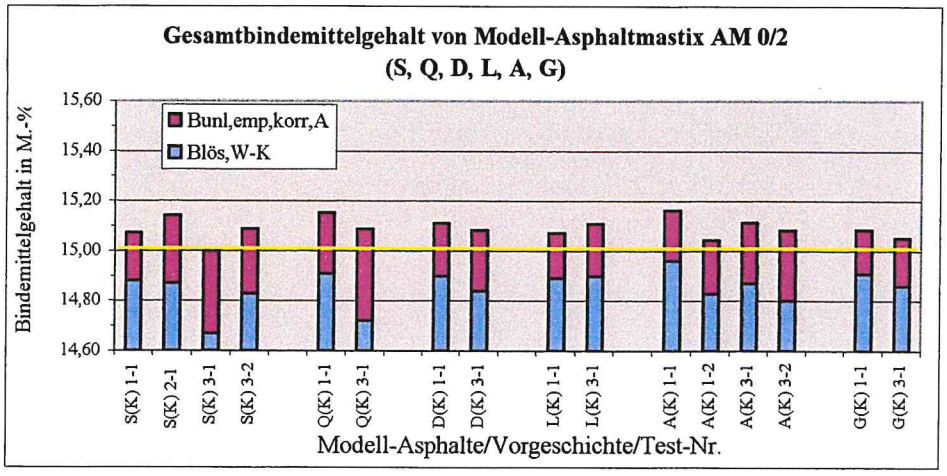


Abb. 34: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltmastix AM 0/2 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,exp,korr,A}$ (vgl. Tab. 9)

5.6 Korngrößenverteilung der extrahierten Mineralstoffe

Da für die Modell-Asphaltbetone und Modell-Asphaltmastices sorgfältig gewaschene und vom Über- und Unterkorn befreite Kornklassen verwendet wurden, ergeben sich bei der Siebung nach der Extraktion nur geringe Abweichungen, d.h. die Zugaberezeptur entspricht im wesentlichen der Ergebnisrezeptur der Mineralgemische. Die geringen aufgetretenen Abweichungen im Füllergehalt werden dennoch bei der Berechnung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach Abschnitt 8.2 $B_{unl,emp,A}$ berücksichtigt.

Die Ergebniszusammensetzung der extrahierten Mineralstoffe wurde für die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach Anhang C als Basis gewählt.

Sie sind in den Anlagen 5.5.1.1.1 und 5.5.1.1.2 dokumentiert.

Die Kornklasse 0/0,063 ist stets gesondert berücksichtigt, um zu hinterfragen, ob ein Einsetzen dieser Werte in die Füllergleichung eine Annäherung an die experimentell ermittelten Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt ergibt. Das kann auf Grund der Ergebnisse verneint werden.

5.7 Ausgewählte Kennwerte der aus Modell-Asphalten zurückgewonnenen Bitumen

5.7.1 aus Modell-Asphaltbeton AB 0/11

Als Ausgangsbitumen wurden für sämtliche Modell-Asphaltbetone einschließlich unterschiedlicher Vorgeschichte vor der Extraktion 7,0 M.-% eines Bitumens 70/100 (Nr. 1013) eingesetzt.

Die Kennwerte des originalen Bitumens sind unter 4.1 in Tab. 2 angeführt. Die zurückgewonnenen Massen an Bitumen $m_{B,n}$ von weniger im Vergleich zur eingesetzten Masse $m_{B,v}$ = 77,00 g, dezimiert durch den unlöslichen Anteil an Bitumen und durch im Kolben des Rotationsverdampfers verbleibende Reste reichte nicht für eine vollständige Untersuchung aus. Es wurden nur der Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK), die Nadelpenetration, woraus der Penetrationsindex $I_{P,EP}$ errechnet werden kann, und der Aschegehalt zum Nachweis einer sauberen Abtrennung der feinen Mineralstoffe aus der Bitumenlösung durch Zentrifugieren bestimmt.

In den Abb. 35, 36 sind die Ergebnisse dargestellt.

Es ist offensichtlich, daß durch die Vorgeschichte, thermische Beanspruchung (3) bedingt, eine Verhärtung des zurückgewonnenen Bitumens eintritt. Der Erweichungspunkt steigt in Abhängigkeit vom Mineralstoff mehr oder weniger an, die Nadelpenetration sinkt ebenfalls mineralstoffspezifisch ab. Die Penetrationsindices steigen an.

In der Abb. 35 sind auch die Ergebnisse des 5 h bei 163 °C beanspruchten Ausgangsbitumens zum Vergleich des Effektes bei thermischen Beanspruchung des Modell-Asphaltbetons vor der Extraktion (3) dargestellt. Die Beanspruchung des Ausgangsbindemittels (vgl. auch Anlage 4.1.7) erfolgte sowohl im 500-ml-Kolben (RFT_{500}) als auch im 1000-ml-Kolben (RFT_{1000}). Die aufgetretenen Konsistenzzunahmen sind keineswegs vergleichbar mit denen, welche unter gleichen Bedingungen der Zeit und Temperatur aber- nach Mischen des Bitumens mit Mineralstoff, Lagern des gemischten Asphaltes (5h, 163 °C, Umluft) und Extrahieren (Toluol –K als schonendes Verfahren) des Bitumens aus den Modell-Asphalten auftreten.

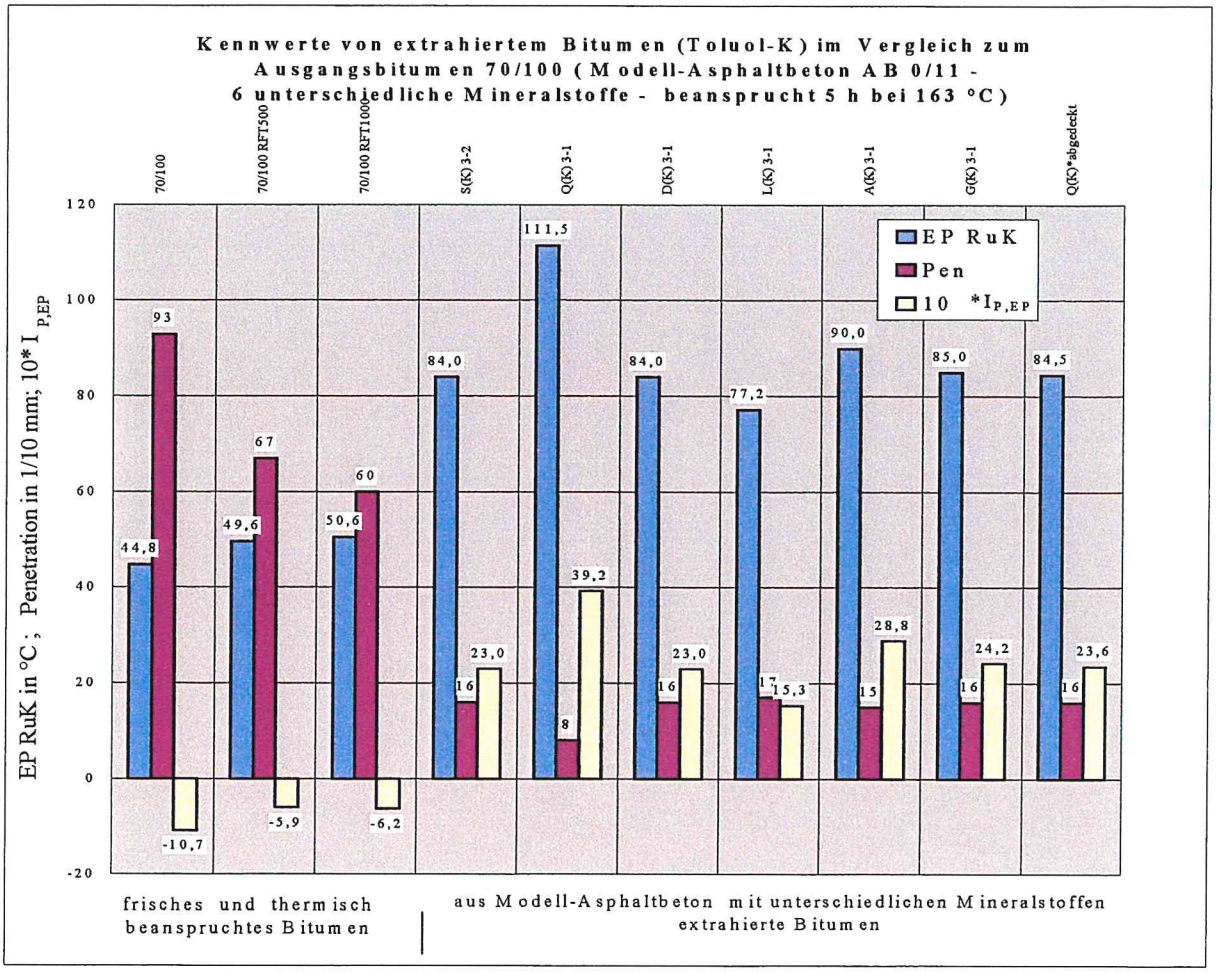


Abb. 35: Kennwerte vom Ausgangsbitumen 70/100 im Vergleich zu aus Modell-Asphalten extrahierten Bitumen (Toluol-K), Vorgeschichte 3

So nimmt der Erweichungspunkt RuK vom Ausgangsbitumen, im 1000-ml-Kolben beansprucht, um nur 5,8 K zu, die Nadelpenetration sinkt um 33 1/10 mm. Spitzenposition nimmt wiederum die Mischung Q(K) ein mit einer Erweichungspunktzunahme von 66,7 K (im abgedeckten Zustand nur um 39,7 K). Das läßt auf eine besondere Empfindlichkeit

gegenüber Luftsauerstoff bei Wärme schließen. Die geringste Veränderung ΔEP RuK erfährt das aus L(K) extrahierte Bitumen mit 32,4 K. Die übrigen vier aus den Modell-Asphalten D(K), S(K), G(K) und A(K) zurückgewonnenen Bitumen unterscheiden sich in ΔEP RuK relativ wenig und liegen zwischen 39,4 K und 45,2 K. Mittelt man die ΔEP RuK, ausgenommen Q(K) der zurückgewonnenen fünf Bitumen, ergibt sich 40,5 K ± 5,5 K und damit ein um 26,2 K niedrigerer Wert als der des aus Q(K) unter gleichen Bedingungen (Umluft) bestimmten Wertes. Die Penetration der fünf o.a. Bitumen nimmt im Vergleich zum Ausgangsbitumen 70/100 im Mittel um (77 ± 0,7) 1/10 mm ab, das aus Q(K) zurückgewonnene Bitumen um 85 1/10 mm, d.h. um 12 1/10 mm mehr.
Die thermische Beanspruchung des reinen Bitumens ist nicht vergleichbar mit der im Bitumen-Mineral-Gemisch bzw. im Modell-Asphalt.
In Abb. 36 sind die genannten Kennwerte für aus den Modell-Asphaltbetonen AB 0/11 der sechs (sieben) Referenzgesteine zurückgewonnene Bindemittel nach Sofortextraktion (1) und Extraktion nach 4-Wochen-Lagerung (2) dargestellt.
Das Spreizung der Veränderungen bezüglich EP RuK und Nadelpenetration ist für sämtliche aus den Modell-Asphaltbetonen mit Fremdfüller FF und mit Eigenfüller EF zurückgewonnenen Bitumen unbedeutend. Vergleichbar sind die Veränderungen mit denen, die sich bei der Beanspruchung des Augangsbitumens 70/100 im rotierenden 500-ml-Kolben (5 h, 163 °C) ergeben. In der Regel sind die Bitumen, welche aus mit EF hergestellten Modell-Asphaltbetonen AB 0/11 stammen, geringfügig härter. Die 4-Wochen-Lagerung (2) ergibt eine mit der Sofortextraktion (1) vergleichbare Zunahme der Konsistenz.
Die Penetrationsindizes liegen alle im negativen Bereich und unterscheiden sich auch nur geringfügig untereinander und von denen des Ausgangsbitumens.

5.7.2 aus Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Als Ausgangsbitumen wurden für sämtliche Modell-Asphaltmastizes der sechs (sieben) Referenzgesteine, einschließlich unterschiedlicher Vorgeschichte vor der Extraktion, stets 15,0 M.-% eines Bitumens 30/45 (Nr. 934) eingesetzt.
Die Kennwerte des originalen Bitumens sind unter 4.1 Tab. 2 angeführt. Die eingesetzte Masse $m_{B,v}$ von 75,00 g kann, wie bereits erwähnt, nur zum Teil für die Untersuchungen genutzt werden.
In der Abb. 37 sind wiederum die EP RuK-Werte, die Nadelpenetration und die Penetrationsindizes $I_{P;EP}$ der nach Sofortextraktion (1) und nach thermischer Beanspruchung vor der Extraktion (3) zurückgewonnenen Bitumen dargestellt.

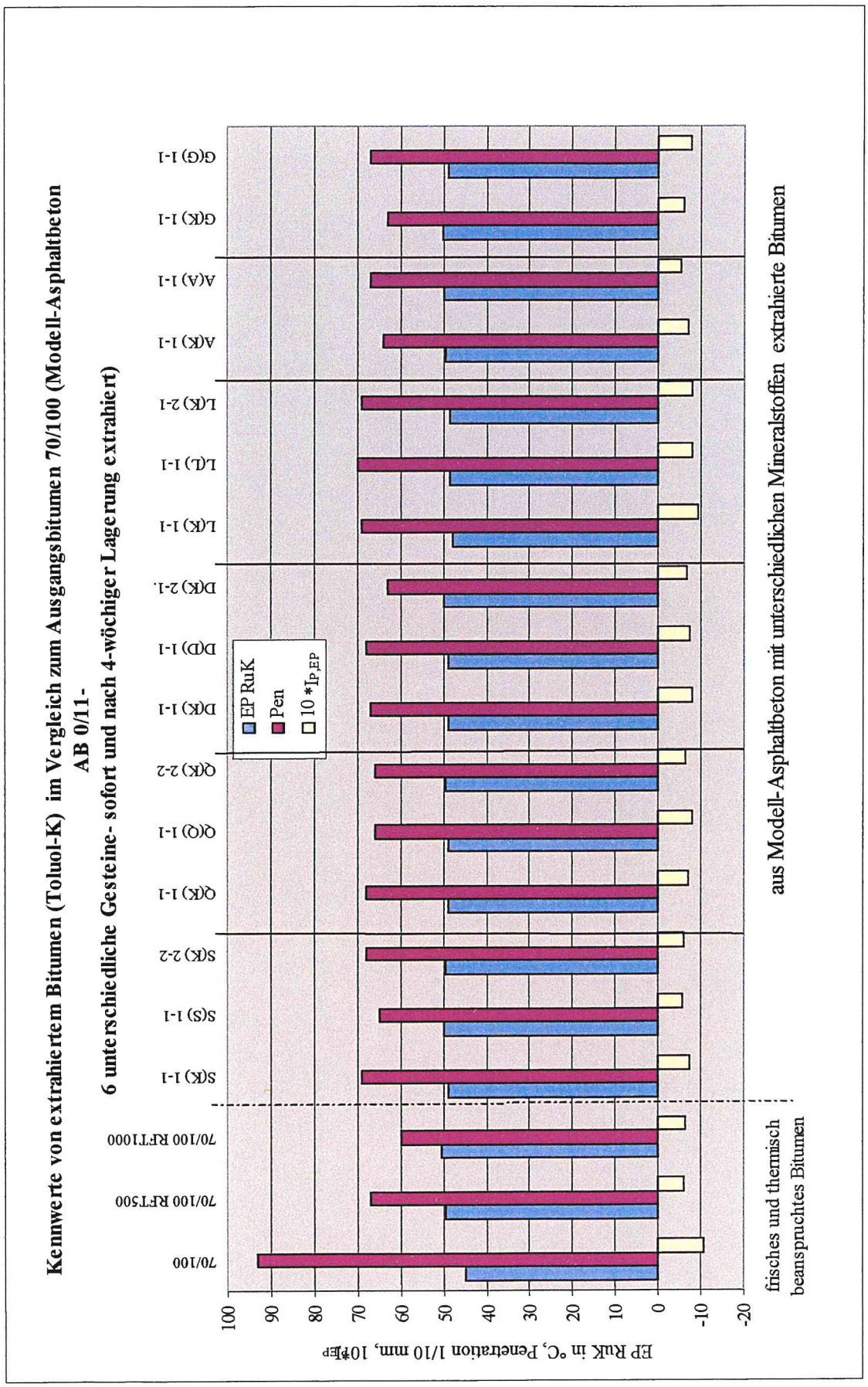


Abb. 36: Kennwerte von aus Modell-Asphaltbeton extrahierten Bitumen (Toluol-K) im Vergleich zum Ausgangsbitumen 70/100 nach Sofortextraktion (1) und nach 4-Wochen-Lagerung (2)

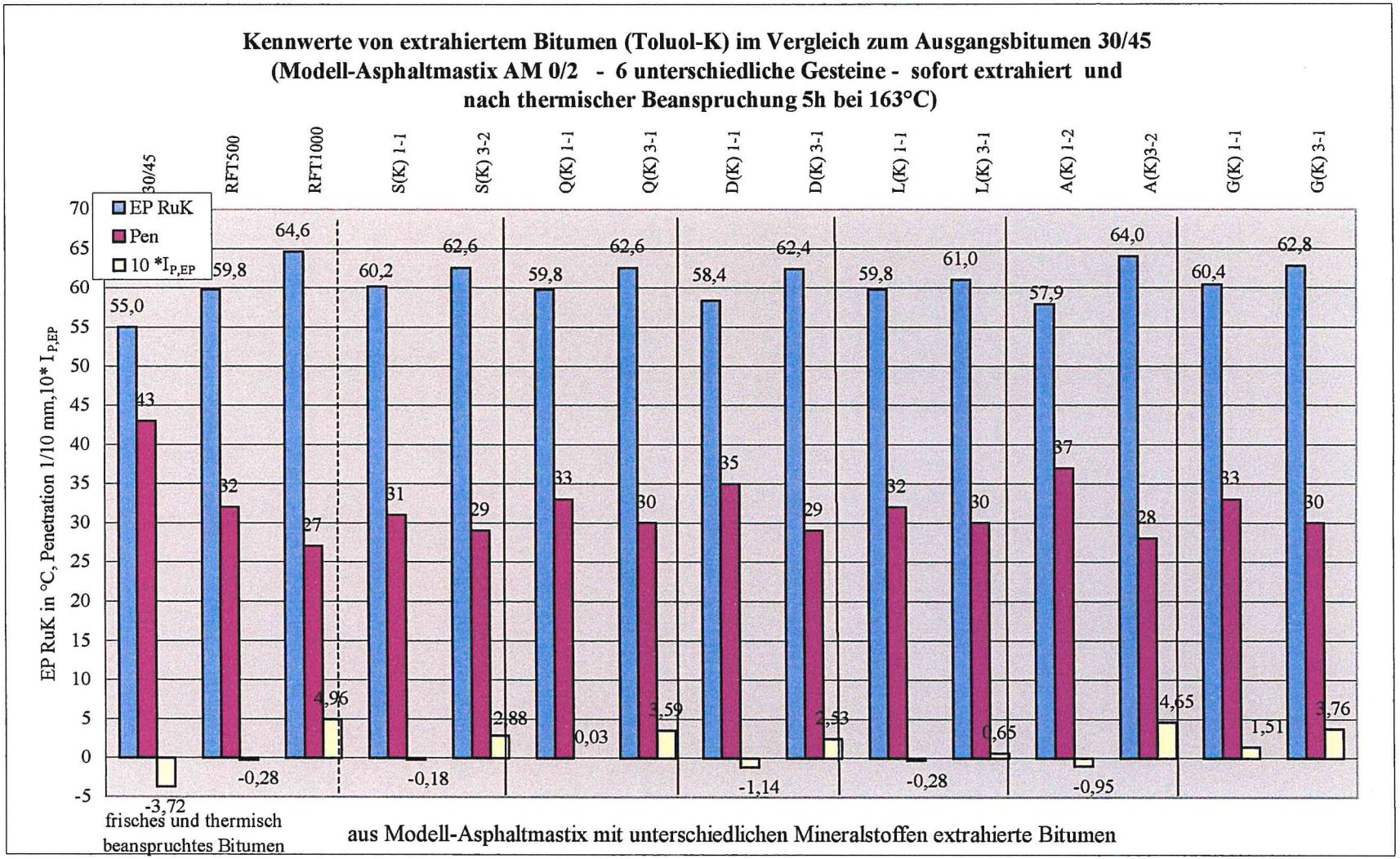


Abb. 37: Kennwerte von aus Modell-Asphaltmastix extrahierten Bitumen (Toluol-K) im Vergleich zum Ausgangsbitumen 30/45 nach Sofortextraktion (1) und Extraktion nach thermischer Beanspruchung (3)

Das Ausgangsbitumen 30/45 für Modell-Asphaltmastix hat einen Erweichungspunkt Ring und Kugel von 55,0 °C und eine Nadelpenetration von 43 1/10 mm. Bei der thermischen Beanspruchung im 500-ml-Kolben erhöht sich der EP RuK um 4,8 K, deutlich mehr im 1000-ml-Kolben und zwar um 9,6 K. Die Nadelpenetration nimmt im RFT_{500} um 11 1/10 mm ab, im RFT_{1000} um 16 1/10 mm.

Die aus dem bindemittelreichen Modell-Asphaltmastix sofort extrahierten Bitumen besitzen im Mittel über alle sechs Referenzgesteine eine EP RuK-Zunahme von (4,4 ± 1,0) K, die nach thermischer Beanspruchung extrahierten Bitumen eine Zunahme von (7,6 ± 1,0) K. Die Nadelpenetration nimmt (6 Referenzgesteine) im Falle der Sofortextraktion im Mittel um (9,5 ± 2,2) 1/10 mm, bei Extraktion nach th. B. um (13,7 ± 0,8) 1/10 mm ab.

Das bedeutet, daß die Verhärtung der zurückgewonnenen Bitumen im Mittel für die Sofort-extraktion (1) niedriger liegt als die im 500-mm-Kolben. Die nach thermischer Beanspruchung (3) aus dem Modell-Asphaltmastix extrahierten Bitumen zeigen eine geringere Verhärtung als die des Ausgangsbitumens nach der Beanspruchung im 1000-ml-Kolben.

Eine Erklärung für die geringen Auswirkungen der thermischen Beanspruchung beim Modell-Asphaltmastix AM 0/2 könnten die relativ dicken Bitumenschichten um die Mineralstoff-körner sein, welche die Diffusion von Luftsauerstoff verhindern und Reaktionen, eventuell katalytisch-oxidativer Art, an der Grenzfläche Bitumen/Mineralstoff, verzögern.

Die Aschegehalte (vgl. Tab. 10 und 11) für die aus den Modell-Asphalten zurückgewonnenen Bitumen liegen weit unter 0,5 M.-%. Die Anforderung, die an sich nur bei Schiedsanalysen nachzuweisen ist von einem Aschegehalt < 1,0 M.-%, wird mit Abstand eingehalten. Es sind ebenfalls die Differenzen der Aschegehalte der zurückgewonnenen Bitumen im Vergleich zum Aschegehalt des Ausgangsbitumens angeführt.

Die absolut höchste Abweichung der Aschegehalte im Vergleich zu dem Aschegehalt des Ausgangsbitumens 70/100 tritt bei den 26 untersuchten Varianten von zurückgewonnenen Bitumen aus Modell-Asphaltbeton AB 0/11 bei S(K) 3-1 mit 0,21 M.-% auf, dreimal 0,10 M.-% und die übrigen liegen darunter.

Bei den 16 untersuchten Varianten von zurückgewonnenen Bitumen aus Modell-Asphalt-mastix AM 0/2 beträgt die mit Abstand größte Abweichung der Aschegehalte der zurückgewonnnenen Bitumen im Vergleich zum Ausgangsbitumen 30/45 nur 0,18 M.-% (auch S(K) 3-1), einmal 0,10 M.-% und die übrigen liegen darunter.

Tab. 10: Kennwerte der aus Modell-Asphaltbeton AB 0/11 zurückgewonnenen Bitumen

Ausgangsbitumen 70/100, thermisch beanspruchtes Bitumen 70/100 und aus Modell-Asphaltbeton AB 0/11 extrahiertes (Toluol-K) Bitumen	Erweichungs-punkt Ring und Kugel EP RuK DIN EN 1427	Nadel-penetration (25 °C, 5 s, 1 N) DIN EN 1426	Penetration-Temperatur-Steigungsfaktor A_{EP}	Penetrations-index $I_{P,EP}$, berechnet nach DIN EN 12591 Anhang B, modifiziert	Asche-gehalt nach DIN 52005	Zunahme des Asche-gehaltes am zurückgewon-nenen Bitumen
	°C	1/10 mm	K^{-1}		M.-%	M.-%
70/100	44,8	93	0,0472	-1,072	0,13	
70/100 nach th.B. RFT_{500}	49,6	67	0,0438	-0,593		
70/100 nach th.B. RFT_{1000}	50,6	60	0,0439	-0,617		
S(K) 1-1	48,8	69	0,0447	-0,729	0,21	0,08
S(K) 1-2	49,8	66	0,0437	-0,579	0,14	0,01
S(S) 1-1 EF	50,0	65	0,0436	-0,567	0,18	0,05
S(K) 2-1	50,4	69	0,0419	-0,307	0,17	0,04
S(K) 2-2	49,4	68	0,0439	-0,607	0,14	0,01
S(K) 3-1	86,2	n.b.			0,34	0,21
S(K) 3-2	84,0	16	0,0288	2,296	0,22	0,09
Q(K) 1-1	49,0	68	0,0446	-0,712	0,21	0,08
Q(Q) 1-1 EF	49,0	66	0,0452	-0,790	0,15	0,02
Q(K) 2-1	50,2	61	0,0444	-0,677	0,23	0,10
Q(K) 2-2	49,6	66	0,0441	-0,632	0,14	0,01
Q(K) 3-1	111,5	8	0,0231	3,914	0,18	0,05
Q(K) 3-3 abgedeckt	84,5	16	0,0286	2,358	0,18	0,05
D(K) 1-1	48,8	67	0,0454	-0,805	0,15	0,02
D(D) 1-1 EF	49,0	68	0,0446	-0,713	0,13	0,00
D(K) 2-1	50,0	63	0,0442	-0,647	0,13	0,00
D(K) 3-1	84,0	16	0,0288	2,296	0,18	0,05
L(K) 1-1	48,0	69	0,0463	-0,946	n.b.	
L(L) 1-1 EF	48,4	70	0,0452	-0,799	0,15	0,02
L(K) 2-1	48,6	69	0,0451	-0,782	0,23	0,10
L(K) 3-1	77,2	17	0,0320	1,530	0,28	0,15
A(K) 1-1	49,6	64	0,0446	-0,711	0,17	0,04
A(A) 1-1 EF	49,8	67	0,0434	-0,541	0,13	0,00
A(K) 3-1	90,0	15	0,0266	2,884	0,23	0,10
G(K) 1-1	50,2	63	0,0438	-0,596	0,17	0,04
G(G) 1-1 EF	49,0	67	0,0449	-0,752	0,15	0,02
G(K) 3-1	85,0	16	0,0283	2,418	0,16	0,03

Tab. 11: Kennwerte des aus Modell-Asphaltmastix AM 0/2 zurückgewonnenen Bitumen

Ausgangsbitumen 30/45, thermisch beanspruchtes Bitumen 30/45 und aus Modell-Asphaltmastix AM 0/2 extrahiertes (Toluol-K) Bitumen	Erweichungs-punkt Ring und Kugel EP RuK DIN EN 1427	Nadel-penetration (25 °C, 5 s, 1 N) DIN EN 1426	Penetration-Temperatur-Steigungsfaktor A_{EP}	Penetrations-index $I_{P,EP}$, berechnet nach DIN EN 12591 Anhang B, modifiziert	Asche-gehalt nach DIN 52005	Zunahme des Asche-gehaltes am zurückgewon-nenen Bitumen
	°C	1/10 mm	K^{-1}		M.-%	M.-%
30/45	55,0	43	0,0423	-0,372	0,08	
30/45 nach th.B. RFT_{500}	59,8	32	0,0402	-0,028		
30/45 nach th.B. RFT_{1000}	64,6	27	0,0372	0,496		
S(K) 1-1	60,2	31	0,0401	-0,018	0,18	0,10
S(K) 2-1	61,8	27	0,0400	0,000	0,14	0,06
S(K) 3-1	62,6	29	0,0383	0,288	0,26	0,18
S(K) 3-2	62,6	29	0,0383	0,288	0,13	0,05
Q(K) 1-1	59,8	33	0,0400	-0,003	0,11	0,03
Q(K) 3-1	62,6	30	0,0379	0,359	0,17	0,09
D(K) 1-1	58,4	35	0,0407	-0,114	0,13	0,05
D(K) 3-1	62,4	29	0,0385	0,253	0,15	0,07
L(K) 1-1	59,8	32	0,0402	-0,028	0,12	0,04
L(K) 3-1	61,0	30	0,0396	0,065	0,13	0,05
A(K) 1-1*	62,2	28	0,0391	0,145	0,12	0,04
A(K) 1-2	57,9	37	0,0406	-0,095	0,11	0,03
A(K) 3-1*	60,6	34	0,0385	0,251	0,09	0,01
A(K) 3-2	64,0	29	0,0373	0,465	0,12	0,04
G(K) 1-1	60,4	33	0,0391	0,151	0,13	0,05
G(K) 3-1	62,8	30	0,0378	0,376	0,13	0,05

* Es wird eine Verwechselung der Proben angenommen, wird nicht gewertet und wurde deshalb nochmals bestimmt.

Abschließend taucht zum Thema zurückgewonnene Bitumen eine Frage auf, ob es auch (außer der Beziehung zum unlöslichen Bitumen) einen Zusammenhang zwischen der Absorption des Bitumens durch die unterschiedlichen Mineralstoffe, ihre spezifische Fähigkeit, ihr Vermögen, einen Teil des kontaktierten Bitumens zu verchlucken und nicht wieder herzugeben und der Verhärtung des Bitumens, welches zurückgewonnen wurde, gibt. Für Mineralstoff Q würde diese Hypothese zutreffen.

Eine weitere Einflußgröße könnte die (Gesamt)-Porosität bzw. der Dichtigkeitsgrad d nach DIN 52 102 der einzelnen beteiligten Kornklassen > 0,09 mm (36) sein. Die Dichte ρ_0 der

jeweils auf < 0,063 mm gemahlenen Kornklassen wird bestimmt und mit der Rohdichte ρ_R der einzelnen Kornklassen verglichen und die Porosität p nach folgender Gleichung ermittelt

$$\mathbf{p = (1 - \frac{\rho_R}{\rho_0}) \cdot 100 = (1 - d) \cdot 100} \quad \text{in Vol.-\%.} \qquad (40)$$

Von der Kornklasse 2/5 wurden von einigen Mineralstoffen, vier der Referenzgesteine, die Porositäten ermittelt.

Sie beträgt für den 2/5-Splitt Syenodiorit S p = 0,809 Vol.-% bzw. d = 0,992.

Sie beträgt für den 2/5-Splitt Quarzporphyr Q p = 1,783 Vol.-% bzw. d = 0,982.

Sie beträgt für den 2/5-Splitt Diabas D p = 0,346 Vol.-% bzw. d = 0,997.

Sie beträgt für den 2/5-Splitt Amphibolit A p = 0,775 Vol.-% bzw. d = 0,992.

Für Lamprophyr L und Granodiorit G wurde die Porosität noch nicht ermittelt.

Für Syenodiorit S wurden die Porositäten kornklassenabhängig ermittelt. So ergaben sich für den 5/8-Splitt p = 1,025 Vol.-%, für den 8/11 Splitt p = 1,207 Vol.-% (für 11/16-Splitt p = 1,311 Vol.-% und für den 16/22-Splitt p = 1,497 Vol.-%).

Die Zunahme der Porosität mit zunehmender Korngröße war zu erwarten.

Diesbezügliche weitere Untersuchungen würden den Rahmen des Forschungsvorhabens sprengen, wären interessant, müßten aber im Nachgang geklärt werden.

6. Untersuchungen an neun Praxisgemischen und drei Asphaltgranulaten

6.1 Allgemeines

Wie bereits unter 3.3 angeführt, wurden fünf Mischgüter aus drei unterschiedlichen Mischanlagen MA untersucht. Von einem dieser Mischgüter konnten Bohrkerne BK längerer Liegedauer untersucht werden.

Vier große Labormischungen, nachempfunden praktizierten Eignungsprüfungen von drei Mischanlagen, wurden hergestellt.

Drei Asphaltgranulate AG, welche als solche in die Untersuchung einfließen und auch als Ausgangsstoff in drei Asphaltrezepturen zum Einsatz gelangen, wurden berücksichtigt.

Ein Asphaltbeton, zwei Splittmastixasphalte, fünf Asphaltbinder und ein Gußasphalt standen als Mischgüter zu Verfügung, welche mit den entsprechenden Eignungsprüfungen verglichen werden können.

Die großen Labormischungen sind ein Splittmastixasphalt und drei Asphaltbinder, von denen zwei je eines der Asphaltgranulate, zum einen mit Straßenbaubitumen und zum anderen mit polymermodifiziertes Bitumen, enthalten.

Die drei Asphaltgranulate unterscheiden sich durch ihr Alter, durch ihre Zusammensetzung, Mineralstoffe und Bitumen, ursprünglich eingebaute Mischgutart bzw.-sorte mit und ohne dem Vorhandensein von Vorinformationen und die Bindemittelart.

Zwei Asphaltgranulate enthalten Straßenbaubitumen, eines PmB.

Drei Straßenbaubitumen und drei polymermodifizierte Bitumen kamen als Ausgangsbitumen zum Einsatz. Die drei Rezepturen, welche unter Zugabe von Asphaltgranulat realisiert wurden, ergeben jeweils ein zusammengesetztes hypothetisches Ausgangsbitumen. Diese hypothetischen Ausgangsbitumen sind in zwei Fällen aus zwei Straßenbaubitumen zusammengesetzt, in einem Fall aus Straßenbaubitumen und PmB.

Als Mineralstoffe kommen vier bzw. fünf der in den Modell-Asphalten als Referenzgesteine verwendeten zum Einsatz

Die angelieferten Mischgüter wurden zunächst einer schonenden Probeteilung auf einem beheizbaren Probeteilungsblech unterzogen (ca. 20 bis 30 Portionen), wobei die am Größtkorn orientierte Mindesteinwaage angestrebt wurde. Sie wurden in Assietten unter Abdeckung mit Folie aufbewahrt. Die im Labormischer GZM 30 hergestellten großen Labormischungen wurden sofort nach dem Mischen portioniert.

Konkrete Daten sind in Tab. 12 angeführt.

Tab. 12: Mischgutrezepturen gemäß Eignungsprüfungen

Mischgutart/-sorte	Abi 0/16 S	GA 0/11 S	SMA 0/11 S	Abi 0/16 + AG 2 25 M.-%	AB 0/11 S	Abi 0/16	Abi 0/16 + AG 1 20 M.-%	SMA 0/8 S	Abi 0/22 S + AG 3 25 M.-%	AG 1 GA 0/11 S	AG 2	AG 3 AB 0/11 S Abi 0/22
Lab.-Nr.	19	1205	1218	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1168	124	1199
Mischort	MA 1	MA 2	MA 2	MA 3	MA 2	Labor	Labor	Labor	Labor	MA	MA	MA
Bindemittel	PmB 25 A	30/45	PmB 45 A	50/70 + Bitumen aus AG 2	70/100	50/70	50/70 + Bitumen aus AG 1	PmB 65 A	30/45 + Bitumen aus AG 3	PmB 45 A	unbekannt	B 65 50/70
Zugabebinde-mittelgehalt nach EP in M.-%	4,5	7,3	6,7 incl. 0,3 M.-% Viatop	4,53	6,2	4,3	4,3	7,1 incl. 0,4 M.-% Viatop	4,2	7,3	unbekannt	5,9 4,1
Mineralstoffe	G, $K_{n.u.}$	D, S, K	S, K	A, K + unbekannt	S	A, K	A, K + D, S, K	D, K	G, K + O, $K_{n.u.}$	D, S, K	unbekannt	O, $K_{n.u.}$
Zugabe-Korngrößen-verteilung nach EP	Siebrückstände in M.-%											
22,4/31,5									1,4		unbekannt	
16/22,4	2,0			3,2		4,3	4,3		24,1			26,3
11,2/16	26,3	1,9	2,0	26,8	1,0	33,2	33,2		17,4	1,7		1,1 14,2
8,0/11,2	16,0	22,6	40,9	15,7	21,7	11,3	11,3	4,8	12,4	22,9		20,8 12,3
5,0/8,0	13,5	12,2	22,1	12,0	16,1	11,5	11,5	55,3	9,1	11,9		16,0 12,1
2,0/5,0	16,1	16,8	12,0	16,0	16,1	11,4	11,4	18,0	7,2	15,8		15,0 8,4
0,71/2,0	9,1	9,9	5,2	7,9	15,7	7,4	7,4	5,4	10,5	9,5		17,5 9,0
0,25/0,71	7,0	5,6	3,5	7,8	11,2	8,4	8,4	3,6	6,9	6,3		15,1 7,0
0,09/0,25	4,5	4,9	2,9	4,2	8,7	4,5	4,6	3,0	4,6	5,8		5,2 2,9
0/0,09	5,5	26,1	11,4	6,4	9,5	8,0	8,0	9,9	6,4	26,1		9,2 7,8
0,09/0,063						1,2	1,2	1,5	0,9			
0/0,063						6,8	6,8	8,4	5,5			

n.u. nicht untersucht

6.2 Bindemittelgehaltsbestimmung in Verbindung mit Korngrößenverteilung

Die Bindemittelgehaltsbestimmung wurde wie bereits ausführlich beschrieben, quasi wie eine Schiedsanalyse nach dem Verfahren DIN 1996-06-W1-KR-Z (und E) mit mindestens 10 Wiederholungen durchgeführt. Dies wurde notwendig, um die erforderliche Masse an zurückgewonnenen Bindemittel zu erhalten und um eine ausreichende Sicherheit der Ergebnisse insbesondere des experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes zu gewährleisten. Es wurde, wie bereits 1929 /1/ gefordert "mit der Vorsicht völlig quantitativer Arbeit" gearbeitet. So wurden die Massen, Ein- und Auswagen, an Asphalt, Bindemittel und Mineralstoffen mit einer Genauigkeit von 0,01 g bestimmt, obwohl nach DIN 1996 T.6 nur eine Genauigkeit von 0,1 g gefordert sind.

Im Laufe der Bearbeitung ergab sich die Notwendigkeit, dem Rückgewinnungsverfahren (Toluol-K) das Differenzverfahren (DIN 1996-06-D2-H-Z (und E) mit Trichlorethylen und Heißextraktion (TRI-H) gegenüberzustellen.

Ohne Siebung und Bestimmung der Korngrößenverteilung ist nicht einmal die Bestimmung des empirischen unlöslichen Bindemittelgehaltes möglich. Der Füllergehalt wird zumindest benötigt und für die Ermittlung der Präzision der Kornanteil A > 11.2 mm.

Für die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes muß die gesamte Korngrößenverteilung bekannt sein, müssen sämtliche im Asphalt vorhandenen Kornklassen quantitativ erfaßt sein und zur weiteren Verwendung vorliegen.

Der Füller wurde in Hinblick auf die Europäische Normung zusätzlich in die Kornklassen 0/0,063 und 0,063/0,09 getrennt.

6.2.1 Unlöslicher Bindemittelgehalt

Aus dem gemäß der ermittelten Ergebniszusammensetzung (vgl. 6.2.3) zusammengesetzten Mineralstoffpulver wird durch folgende chemische Reaktion der anorganische Kohlenstoff und HCl-lösliche Verbindungen entfernt. Es wurde jeweils eine repräsentative Probe (100 g) von kornverteilungskonformem Mahlgut hergestellt und Portionen von ca. 5 g auf 0,001 g eingewogen und mit Salzsäure unter Rückflußkochen umgesetzt. Es wurde mindestens eine Doppelbestimmung durchgeführt.

$$CaCO_3 + 2\,HCl \longrightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$$

Daraus errechnet sich der prozentuale Gehalt der extrahierten Mineralstoffen an HCl-unlöslicher carbonatfreier Substanz M_{cf} (Gl. 29 und Abbn. a).

Der in diesem Material befindliche organische Kohlenstoff, aus den unlöslichen Kohlenwasserstoffen des Bitumens und dem Eigenanteil der eingesetzten Mineralstoffe stammend,

wird durch Verbrennung bei ca. 1200 °C im Elemental Analyzer EA 3000 in Kohlendioxid und Wasser überführt und als prozentualer organischer Kohlenstoffgehalt $C_{org,unkorr,EA}$ (Gl. 28) gaschromatografisch nachgewiesen (Abbn. b).

Ein Ergebnis beruht auf mindestens zwei Einzelwerten.

Durch Multiplikation mit dem Faktor $M_{cf}/100$ ergibt sich der Gehalt an organischem Kohlenstoff in den gesamten Mineralstoffen $C_{M,unkorr.}$ (Gl.32), welche aus dem Asphaltmischgut extrahiert wurden. Dieser Zwischenwert wird im folgenden nicht grafisch dargestellt. Durch Multiplikation mit dem Faktor 1,18 ergibt sich der unkorrigierte Gehalt an unlöslichem Bindemittel $B_{unl,exp,unkorr.M}$ (Gl. 34) in den Mineralstoffen, ebenfalls nicht grafisch dargestellt. Der Blindwert $C_{M,bl}$ wird hierbei nicht berücksichtigt und dieser in den frischen Mineralstoffen befindliche organische Kohlenstoff der Einfachheit halber und wegen geringfügiger Auswirkung auf das Ergebnis als Bitumen angenommen.

Durch Subtraktion des mittleren Blindwertes $C_{M,bl}$ (Gl. 33), aus dem prozentualen Anteil der beteiligten Mineralstoffe berechnet (vgl. Anlagen 6.2.1) vom unkorrigierten Wert $C_{M,unkorr.}$, und Multiplikation mit 1,18 ergibt sich der korrigierte unlösliche Bindemittelgehalt $B_{unl,exp,korr.M}$ in den Mineralstoffen (Gl. 34 und Abbn. c).

Wird dieser Wert nun wiederum multipliziert mit dem Anteil der Mineralstoffe im Asphalt M/A bzw. (A – B)/A (Anlage 6.2.1), erhält man den korrigierten unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,exp,korr.A}$ im Asphalt (Gl. 35 und Abbn. d).

Wird dieser mit dem durch die Füllergleichung berechneten empirischen Wert für den unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,emp,A}$ ($B_{unl,A} = 0{,}013 * F_M + 0{,}1$) verglichen, werden Aussagen über dessen Wertigkeit und Aussagekraft dieser Gleichung möglich. Das prozentuale Verhältnis, der prozentuale Quotient (auch mit Q_{unl} bezeichnet) ist als unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) dargestellt in (Abbn. e).

$$\mathbf{Q_{unl} = 100 \cdot \frac{B_{unl,exp,korr,A}}{B_{unl,emp,A}}} \qquad (41)$$

6.2.1.1 Asphaltbinder 0/16 S mit PmB 25 A

Trotz sachgemäßer Probeteilung des Mischgutes aus MA 1 treten (ausgehend von je 100 g kornverteilungskonformem Mineralpulver) bei den 13 mit Toluol-K durchgeführten Extraktionen relativ große Schwankungen der in Tab. 13 angeführten Kennwerte auf. Die Spannweiten sind verhältnismäßig groß. Das wird auf die Grobkörnigkeit des gemäß Eignungsprüfung vorgesehenen Mineralgemisches mit einem Kornanteil > 2 mm von 73,9 M.-% zurückgeführt. Zwischen den Ergebnissen des mit Toluol-K und mit Trichlorethylen –

H extrahierten Mischgutes tritt ein relativ geringer Unterschied, mit etwas niedrigeren Werten für die mit TRI-H extrahierte Probe auf.

Es werden nur etwa die Hälfte an unlöslichen Bindemittel im Vergleich zu dem mit der Füllergleichung berechneten Wert ermittelt, was bei dem harten PmB 25 A nicht erwartet wurde (Abb. 38 /Anlage 6.2.1.1).

Als Mineralstoff wurden gemäß Eignungsprüfung 98 M.-% Granodiorit G eingesetzt. Dieser Mineralstoff ergab bei den Modell-Asphaltbetonen, den Modell-Asphaltmastizes, den Bitumen-Mineralstoff-Gemischen unterschiedlicher Kornklassen und den Bitumen-Füller-Gemischen übereinstimmend niedrige Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,exp,korr,A}$.

Tab. 13: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder 0/16 S von MA 1 (Nr. 19)

Abi 0/16 S mit PmB 25 A Toluol-K		M_{cf} M.-%	$C_{org,unkorr,EA}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,M}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,A}$ M.-%	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ %
Mittelwert n = 13		79,67	0,148	0,1068	0,1019	49,93
Standard-abweichung		0,99	0,021	0,0194	0,0185	9,05
Variations-koeffizient	%	1,24	13,88	18,13	18,13	18,13
Spannweite		2,90	0,066	0,0610	0,0582	28,53
TRI-H n = 1		80,13	0,132	0,0917	0,0874	46,09

Für die unterschiedlichen Varianten von Modell-Asphaltbetonen mit Granodiorit G ergeben sich Relativwerte (Q_{unl}) von 16,5 bis 27,5 %, für Modell-Asphaltmastices von 27 bis 30 %, für die Bitumen-Mineralstoff-Gemische unterschiedlicher Kornklassen 34 bis 61 % und für die Bitumen-Füller-Mischung 8,5 %, wobei der Bezugswert stets der mit der Füllergleichung (Abb. 5) berechnete Wert $B_{unl,emp,A}$ ist.

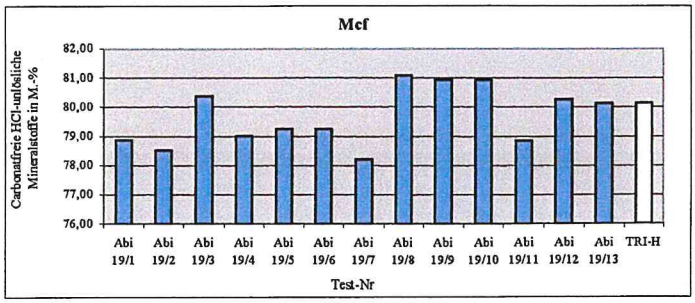


Abb. a

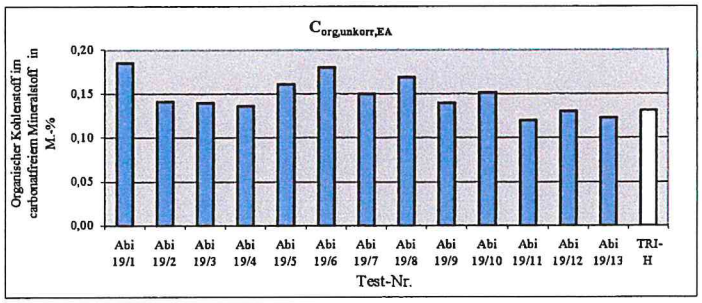


Abb. b

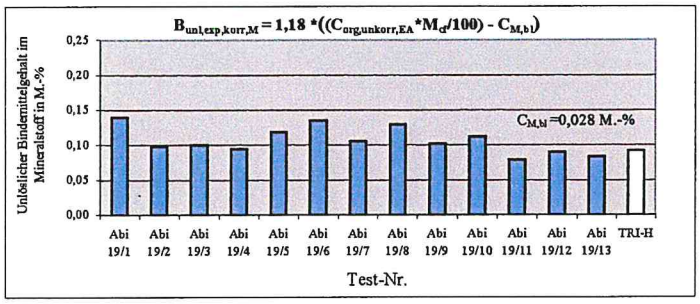


Abb. c

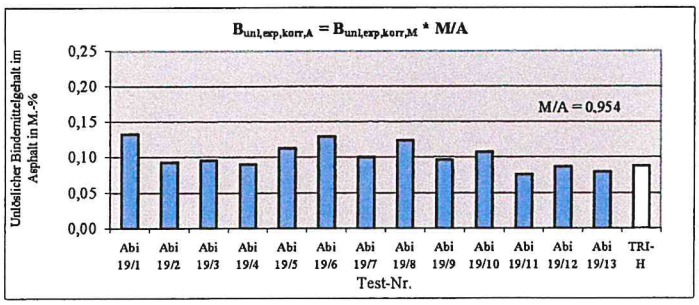


Abb. d

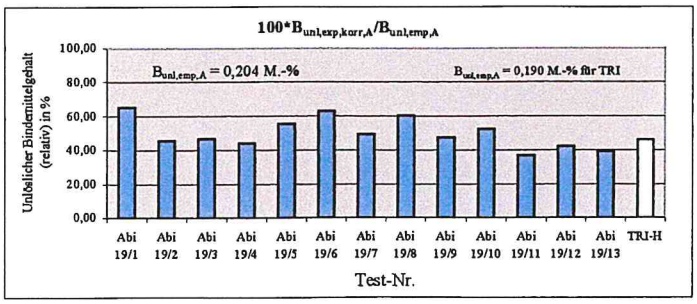


Abb. e

Abb. 38: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/16 S mit PmB 25 A (MA 1, Nr. 19)

6.2.1.2 Gußasphalt 0/11 S mit Bitumen 30/45

Bei dem feinkörnigeren Gußasphalt aus der Mischanlage MA 2 ergibt sich, wie aus Tab.14 ersichtlich, wesentlich bessere Übereinstimmung der angeführten Kennwerte (vgl. Abb. 39 und Anlage 6.2.1.2).

Tab. 14: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Gußasphalt 0/11 S von MA 2 (Nr. 1205)

GA 0/11 S mit Bitumen 30/45 Toluol-K		M_{cf} M.-%	$C_{org,unkorr,EA}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,M}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,A}$ M.-%	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ %
Mittelwert n = 12		54,66	0,517	0,3004	0,2783	62,96
Standard-abweichung		0,578	0,034	0,0226	0,0209	4,73
Variations-koeffizient	%	1,06	6,56	7,51	7,51	7,51
Spannweite		1,91	0,104	0,0707	0,0656	14,82
TRI-H n = 1		53,33	0,417	0,2291	0,2122	50,52

Wiederum wird das Ergebnis der Berechnung mit der Füllergleichung deutlich unterschritten. Es treten auch signifikante Unterschiede auf für den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalten zwischen durch Kaltextraktion mit Toluol und durch Heißextraktion mit Trichlorethylen, wobei letzterer deutlich niedriger liegt. Das wird noch verstärkt untermauert, da der Bezugswert $B_{unl,emp,A}$ auf Grund des in der Ergebniszusammensetzung (TRI-H) ermittelten geringeren Füllergehaltes auch entprechend niedriger ist.
Die hierbei an der Mischanlage durchgeführte Kaltextraktion mit Trichlorethylen von im Labor probegeteiltem Material liegt zwischen den zuvor angeführten Ergebnissen.
Die drei beteiligten Mineralstoffe (laut Eignungsprüfung 53 M.-% D, 22 M.-% S, 25 M.-% K) lassen keinen unmittelbaren Vergleich zu den Modell-Asphalten und –Gemischen zu.

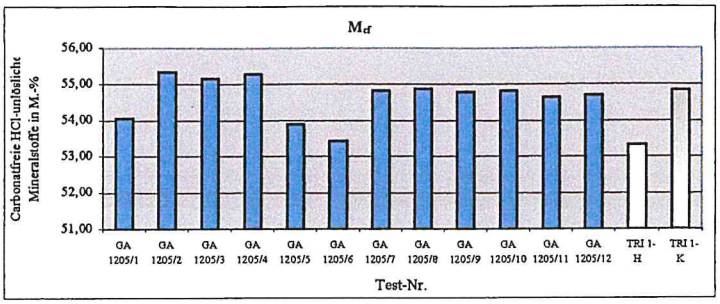


Abb. a

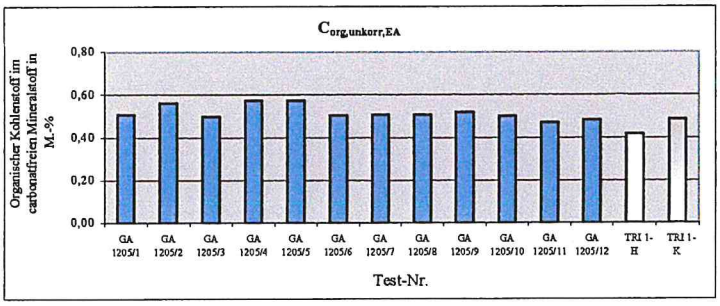


Abb. b

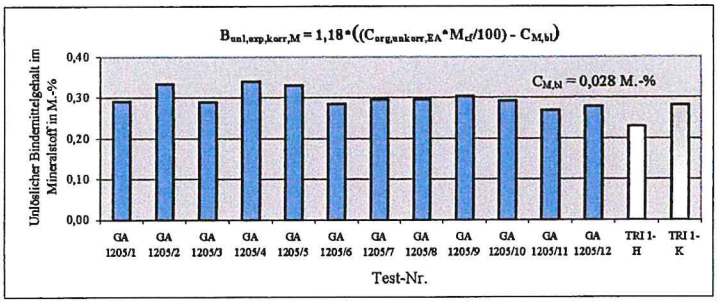


Abb. c

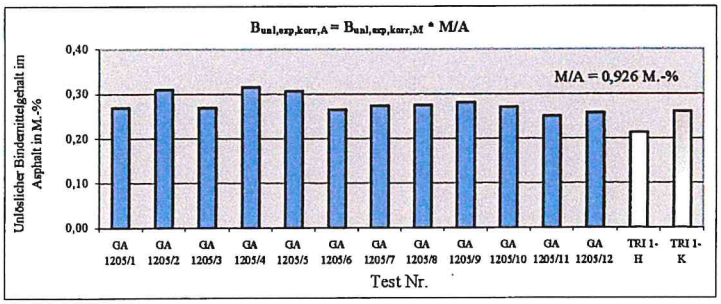


Abb. d

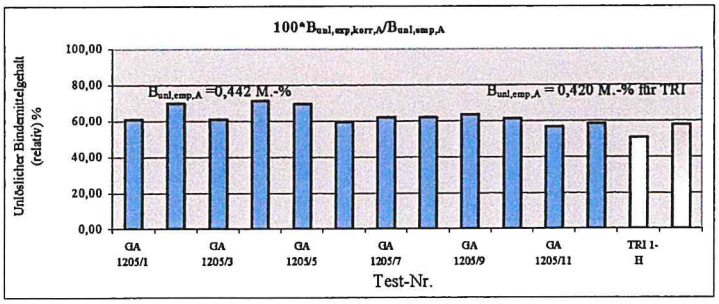


Abb. e

Abb. 39: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Gußasphalt 0/11 S mit Bitumen 30/45 (MA 2, Nr. 1205)

6.1.2.3 Splittmastixasphalt 0/11 S mit PmB 45 A

Der splittreiche Splittmastixasphalt aus MA 2 mit 77 M.-% > 2 mm ergibt trotz mit dem GA 0/11 S übereinstimmenden Größtkorn etwas schlechtere Übereinstimmung der untersuchten Kennwerte, wie aus Tab. 15, Abb. 40 und Anlage 6.2.1.3 ersichtlich wird.

Wiederum liegt der experimentell bestimmte unlösliche Bindemittelgehalt unter dem empirisch berechneten.

Bei Splittmastixasphalt besteht die Gefahr, daß die feinen Zellulosefasern, welche aus dem stabilisierenden Zusatz Viatop stammen, das Ergebnis beeinflussen könnten. Bei geringsten Verunreinigungen des kornverteilungskonformen Mineralpulvers durch diese Zellulosefasern kann der Wert für $C_{org,unkorr,EA}$ zu hoch bestimmt werden. Dies wurde durch Windsichtung der feinen Kornklassen und Auslesen aus den gröberen bis 5 mm weitgehend ausgeschlossen. Die Fasern waren nur in den Kornklassen 0/0,063; 0,063/0,09; 0,09/0,25; 0,25/0,71; 0,71/2 und 2/5 vertreten und wurden auch massemäßig erfaßt.

Die Heißextraktion mit Trichlorethylen zeigt wiederum größere Wirkung im Vergleich zur Kaltextraktion mit Toluol, obwohl dafür bei TRI-H nur ein Einzelwert spricht. Der höchste Wert für den unlöslichen Bindemtittelgehalt (absolut und relativ) mit Toluol-K extrahiert beträgt fast das Doppelte des Wertes, welcher mit TRI-H ermittelt wurde. Die an der Mischanlage extrahierte Probe (TRI-K) nimmt wiederum eine Mittelstellung ein.

Tab. 15: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Splittmastixasphalt 0/11 S von MA 2 (Nr. 1218)

SMA 0/11 S mit PmB 45 A Toluol-K		M_{cf}	$C_{org,unkorr,EA}$	$B_{unl,exp,korr,M}$	$B_{unl,exp,korr,A}$	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	%
Mittelwert n = 12		81,81	0,228	0,1951	0,1829	70,89
Standard-abweichung		0,36	0,022	0,0211	0,0198	7,66
Variations-koeffizient	%	0,44	9,72	10,81	10,81	10,81
Spannweite		1,44	0,074	0,0704	0,0660	25,57
TRI-H n = 1		82,02	0,142	0,1119	0,1049	43,18

Da das Mineralgemisch laut Eignungsprüfung zu 90 M.-% aus Syenodiorit S und 10 M.-% Kalkstein K besteht, drängt sich geradezu ein Vergleich mit dem gleichartig zusammengesetzten Modell-Asphaltbeton 0/11 auf. Ausgenommen die thermisch beanspruchten Varianten ergibt sich im Mittel aus den fünf Untersuchungen für den Relativwert ca. 61 %, etwas niedriger als beim Mischgut von MA 2. Jedoch enthielt der Modell-Asphalt keine Zellulosefasern.

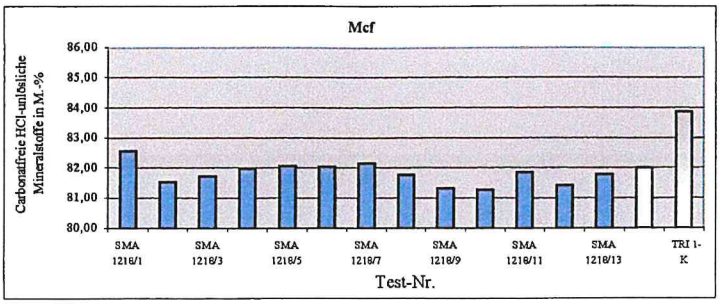


Abb. a

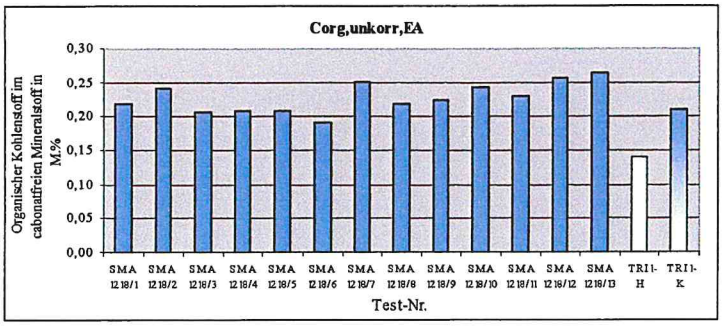


Abb. b

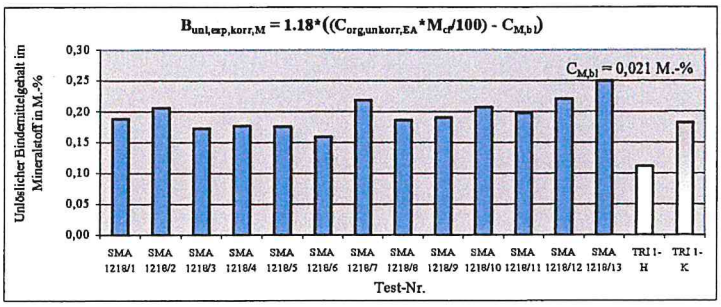


Abb. c

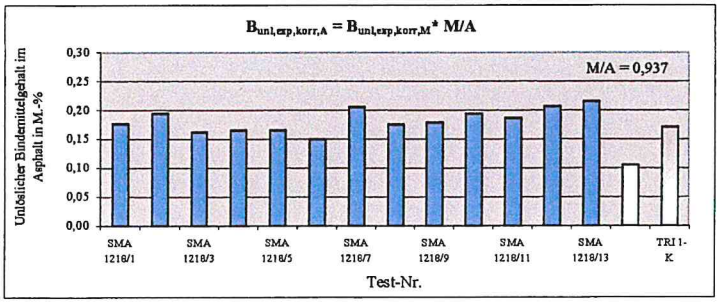


Abb. d

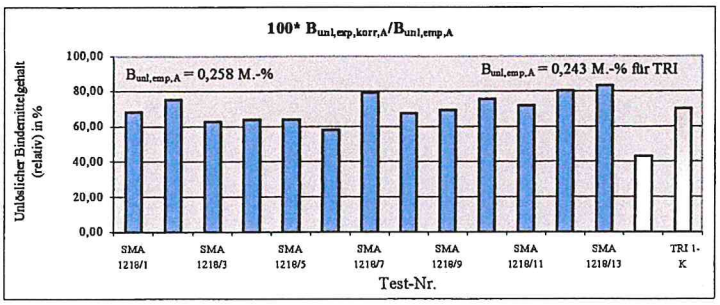


Abb. e

Abb. 40: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Splittmastixasphalt 0/11 S mit PmB 45 A (MA 2, Nr. 1218)

6.2.1.4 Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulatzusatz (AG 2)

Es war zu erwarten, daß der Asphaltgranulatzusatz von 25 M.-% die Homogenität des Mischgutes aus MA 3 beeinflußt, was sich in den statistischen Kennwerten (vgl. Tab. 16) niederschlägt. Außerdem ist das Mineralgemisch relativ grobkörnig und enthält laut Eignungsprüfung 73,7 M.-% Splitt.

Das macht sich bereits bemerkbar bei der Bestimmung von M_{cf}. Hierbei tritt mit Abstand eine höhere Spannweite auf im Vergleich zu den bisher betrachteten Mischgütern. In den Folgewerten setzt sich diese Tendenz fort (Abb. 41/ Anlage 6.2.1.4).

Wiederum ist der durch Extraktion mit TRI-H bestimmte Wert für den unlöslichen Bindemittelgehalt niedriger als der mit Toluol-K erhaltene, obwohl $B_{unl,emp,A}$ für TRI-H auf Grund des ermittelten geringeren Füllergehaltes deutlich niedriger ausfällt.

Der mit der Füllergleichung berechnete Wert für den unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,emp,A}$ liegt wiederum wesentlich höher.

Tab. 16: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder 0/16 von MA 3 (Nr. 1220)

Abi 0/16 mit 50/70 + AG-2 Bitumen Toluol-K		M_{cf} M.-%	$C_{org,unkorr,EA}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,M}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,A}$ M.-%	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ %
Mittelwert n = 11		65,84	0,196	0,1314	0,1257	61,91
Standard-abweichung		2,00	0,029	0,0218	0,0209	10,28
Variations-koeffizient	%	3,04	14,84	16,60	16,60	16,60
Spannweite		6,96	0,099	0,0749	0,0717	35,30
TRI-H n = 1		63,26	0,145	0,0872	0,0835	49,62

Das Mineralgemisch besteht laut Eignungsprüfung zu ca. 25 M.-% aus den unbekannten Mineralstoffen des Asphaltgranulates AG 2 und zu 71,6 M.-% aus Amphibolit A und zu 3,4 M.-% Kalkstein K. Aus Anlage 6.2.1.11 geht hervor, daß der unlösliche Bindemittelgehalt für AG 2 relativ hoch liegt, zwar immer noch niedriger als der mit der Fülergleichung berchnete. Vergleicht man mit den Modell-Asphaltbetonen, den Modell-Asphaltmastices, den Bitumen-Mineralstoff-Gemischen und den Bitumen-Füller-Gemischen mit Amphibolit A, so fallen die experimentell ermittelten Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt etwas niedriger aus. Das ist erklärlich, da der AG 2-Zusatz zu einer Zunahme von $B_{unl,exp,korr,A}$ und dem entsprechenden Relativwert führt.

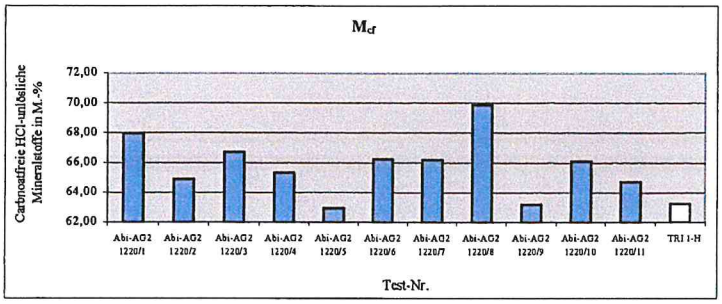


Abb. a

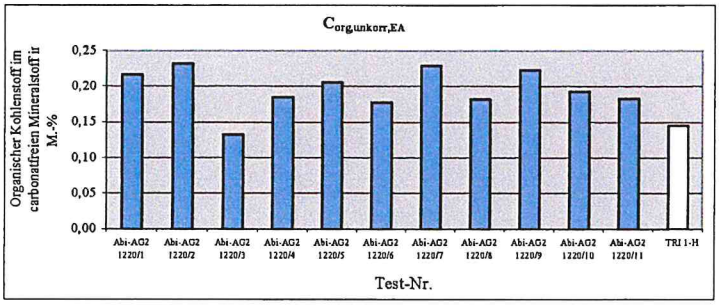


Abb. b

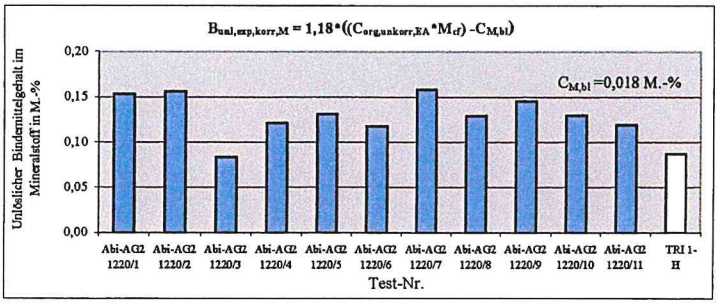


Abb. c

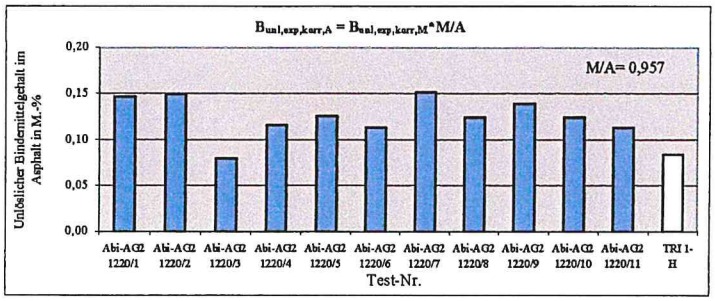


Abb. d

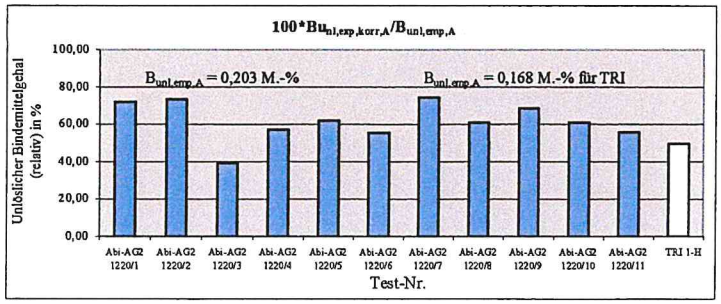


Abb. e

Abb. 41: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulat AG 2 (MA 3, Nr. 1220)

6.2.1.5 Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen 70/100

Das feinkörnigere Mischgut ergibt wesentlich günstigere, besser übereinstimmende Ergebnisse für den unlöslichen Bindemittelgehalt und den für dessen Bestimmung notwendigen Zwischenwerten. Das zeigt sich bei den in Tab. 17 angeführten statistischen Kennwerten. Ein Indiz für zu erwartende gut übereinstimmende Werte, für die Homogenität des Mischgutes ist der M_{cf}-Wert, der im hier betrachteten Falle für die n Extraktionen ausgezeichnet übereinstimmt (Abb. 42 und Anlage 6.2.1.5).

Wiederum wird der empirisch berechnete Wert für den unlöslichen Bindemittelgehalt, wenn auch nicht so gravierend, durch die experimentelle Bestimmung von $B_{unl,exp,korr,A}$ des mit Toluol –K extrahierten Asphaltes nicht erreicht.

Der mit TRI-H bestimmte Wert beträgt aber nur die Hälfte des $B_{unl,emp,A}$-Wertes und ist deutlich niedriger im Vergleich zur Kaltextraktion mit Toluol.

Tab. 17: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbeton 0/11 S von MA 2 (Nr. 1221)

AB 0/11 S mit 70/100 Toluol-K		M_{cf}	$C_{org,unkorr,EA}$	$B_{unl,exp,korr,M}$	$B_{unl,exp,korr,A}$	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	%
Mittelwert n = 10		90,17	0,218	0,2105	0,1985	76,93
Standard-abweichung		0,35	0,012	0,0125	0,0118	4,58
Variations-koeffizient	%	0,39	5,26	5,96	5,96	5,96
Spannweite		1,36	0,035	0,0384	0,0362	14,03
TRI-H n = 1		89,71	0,129	0,1150	0,1084	49,04

Das Mineralgemisch des Asphaltbeton besteht komplett aus Syenodiorit S, so daß sich ein Vergleich zum Modell-Asphaltbeton S(S) direkt anbietet, zumal auch noch dies gleiche Bindemittelsorte 70/100 eingesetzt wurde. Der Relativwert für die Einzelprobe S(S) 1-1 beträgt 66,64 % und entspricht etwa dem Minimalwert (Anlage 6.2.1.5) der 10 Tests.

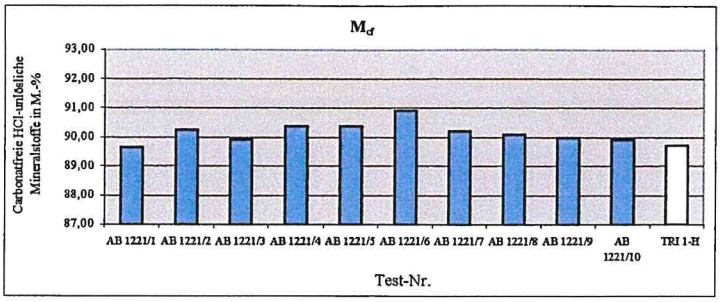


Abb. a

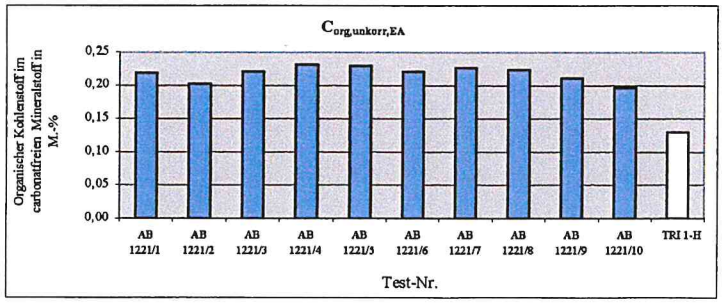


Abb. b

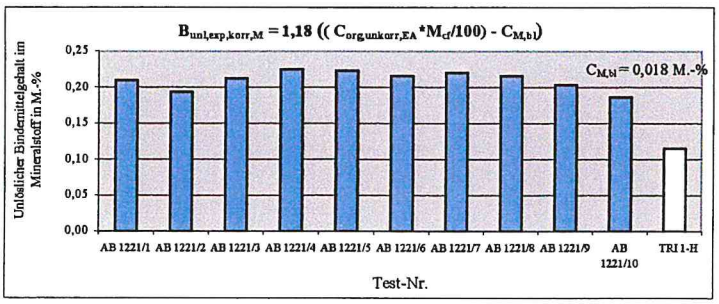


Abb. c

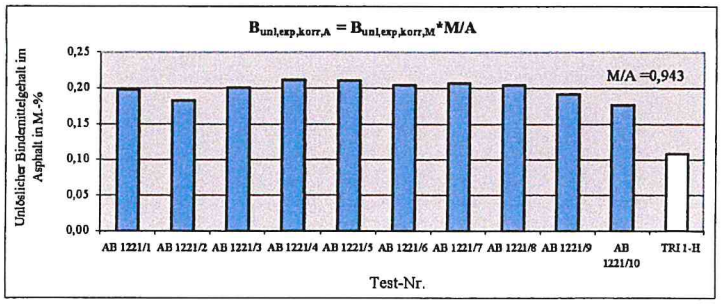


Abb. d

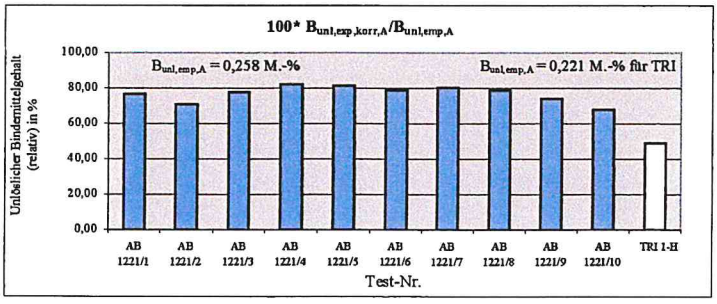


Abb. e

Abb. 42: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen 70/100 (MA 2, Nr. 1221)

6.2.1.6 Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70

Bei grobkörnigeren Gemischen, ob an der Mischanlage produziert oder wie hier im Labor gemischt, treten immer größere Schwankungen der zu interpretierenden Kennwerte auf. Das wird aus Tab. 18 wie auch Abb.43 und Anlage 6.2.1.6 deutlich.

Es werden bei dieser Mischung extrem niedrige unlösliche Bindemittelgehalte mit dem experimentellen Verfahren ermittelt. Die Ergebnisse, welche mit Toluol kalt extrahierten und die mit Trichlorethylen heiß extrahierten Proben erhalten wurden, unterscheiden sich wiederum deutlich und zwar für TRI-H mit deutlich niedrigeren Werten.

Eine partielle nicht ausschließliche Begründung des niedrigen Wertes ist mit der Ergebniszusammensetzung zu erklären. Beim Mischen im Labor unter Voraussetzung einer exakten Zugabekornzusammensetzung (gewaschene, vom Unter- und Überkorn befreite Kornklassen) findet eine Kornverfeinerung statt (vgl. 6.2.3), d.h. es kommt zu einer Füllerneubildung. Das bedeutet, daß der Bezugswert $B_{unl,emp,A}$-Wert zunimmt und sich folglich die Relationen zwischen experimentell zu empirisch verringern.

Tab. 18: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder 0/16, große Labormischung (Nr. 1222)

Abi 0/16 mit 50/70 Toluol-K		M_{cf}	$C_{org,unkorr,EA}$	$B_{unl,exp,korr,M}$	$B_{unl,exp,korr,A}$	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	%
Mittelwert n = 10		59,77	0,140	0,0769	0,0735	29,12
Standard-abweichung		2,13	0,019	0,0114	0,0109	4,32
Variations-koeffizient	%	3,57	13,33	14,84	14,84	14,84
Spannweite		5,60	0,057	0,0322	0,0309	12,21
TRI-H n = 1		60,40	0,089	0,0416	0,0398	18,76

Für die große Labormischung wurde die Ergebniskorngrößenverteilung des Abi 0/16 (Anlage 6.2.2.5) mit AG 2 zugrundegelegt. Es wurde nur Amphibolit A (92,0 M.-%) und Kalkstein K (8,0 M.-%) in beschriebener Qualität eingesetzt.

Werden die Modell-Asphalte zum Vergleich herangezogen, werden höhere Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt erwartet.

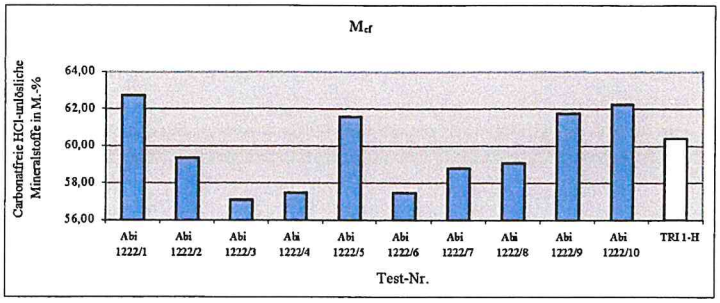


Abb. a

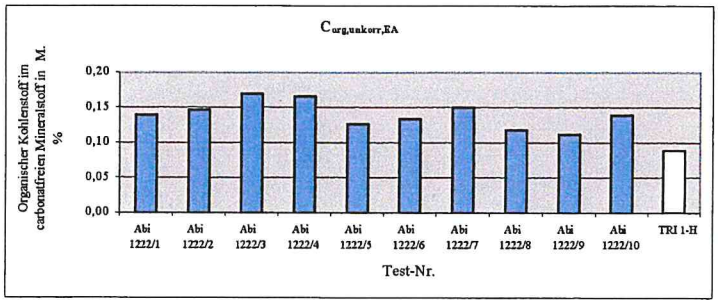


Abb. b

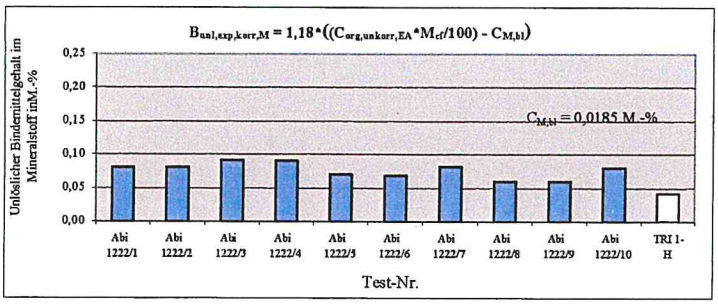


Abb. c

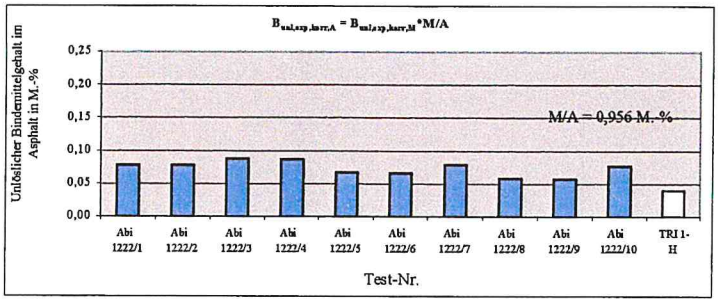


Abb. d

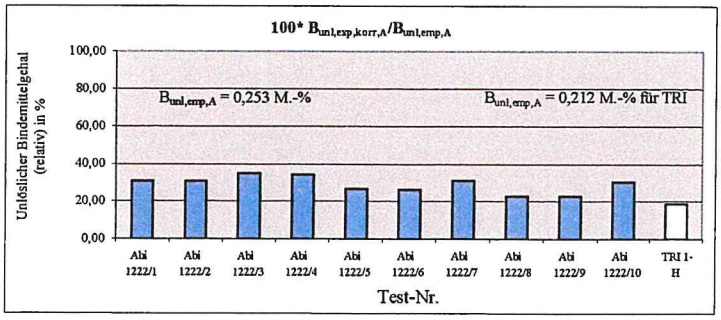


Abb. e

Abb. 43: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 (große Labormischung Nr. 1222)

6.2.1.7 Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulat AG 1

Durch die Grobkörnigkeit des Mischgutes und den Zusatz von 20 M.-% Asphaltgranulat ergeben sich große Spreizungen der Resultate, welche sich in hohen Standardabweichungen und Variationskoeffizienten (vgl. Tab. 19) widerspiegeln.

Eindeutig kristallisiert sich jedoch das Verhältnis zwischen der experimentellen und der empirischen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes heraus, welches hier wiederum im Mittel nur die Hälfte beträgt. Die mit TRI-H extrahierten Mineralstoffe ergeben wiederum einen niedrigeren unlöslichen Bindemittelgehalt. Im Vergleich zu dem mit Toluol-H extrahierten (vgl. Abb. 44 und Anlage 6.2.1.7)

Tab. 19: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder 0/16, große Labormischung (Nr. 1223)

Abi 0/16 mit 50/70 + AG 1-Bitumen Toluol-K		M_{cf}	$C_{org,unkorr,EA}$	$B_{unl,exp,korr,M}$	$B_{unl,exp,korr,A}$	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	%
Mittelwert n = 13		62,06	0,207	0,1280	0,1223	51,93
Standard-abweichung		1,19	0,034	0,0254	0,0243	10,32
Variations-koeffizient	%	1,92	16,64	19,86	19,86	19,86
Spannweite		4,01	0,112	0,0820	0,0784	33,28
TRI-H n = 1		62,12	0,162	0,0951	0,0909	43,19

Die Kornzusammensetzung basierte wiederum auf der Ergebniszusammensetzung des Abi 0/16 aus MA 3, d.h. 8 M.-% Füller < 0,09 (K) und 92 M.-% Mineralstoffe > 0,09 mm. Die Mineralstoffe bestehen zu 20 M.-% aus denen des Asphaltgranulates AG 1 (D, S K Ergebniszusammensetzung in Anlage 6.2.2.11) und wurden durch ca. 72 M.-% der Kornklassen des Amphibolits A ergänzend zur Sollzusammensetzung zusammengestellt. Obwohl sämtliche Mineralstoffe zu den Referenzgesteinen gehören, läßt sich kein unmittelbarer Bezug zu den „mineralstoffreinen" Modell-Asphalten finden.

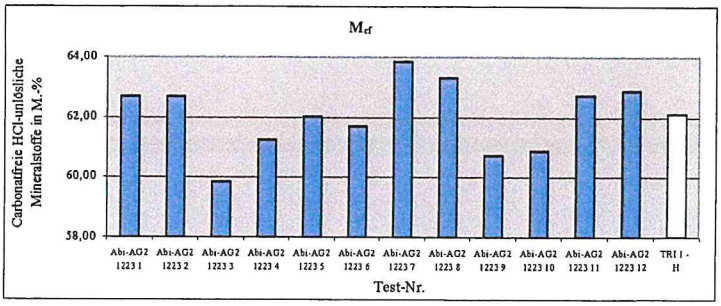


Abb. a

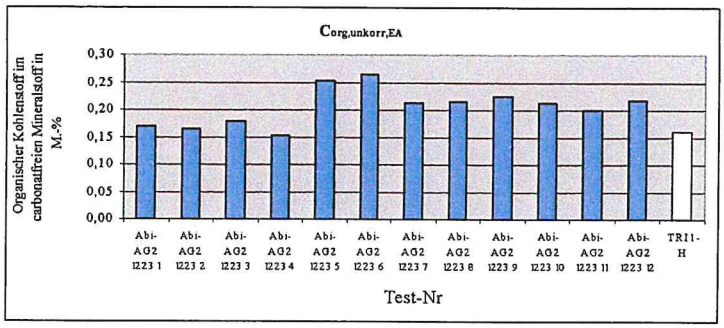


Abb. b

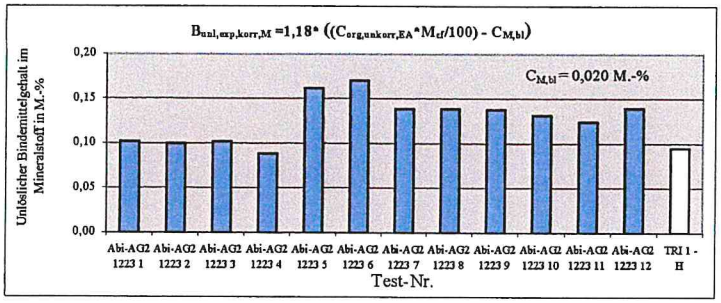


Abb. c

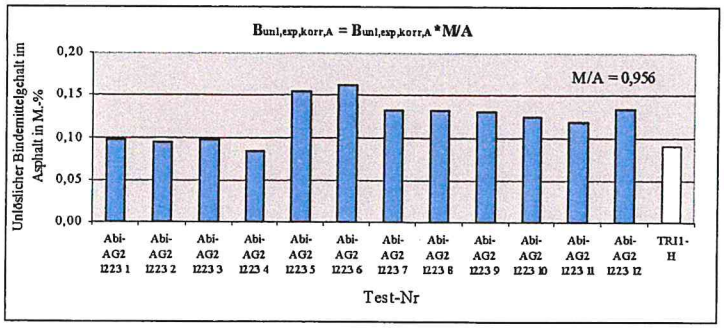


Abb. d

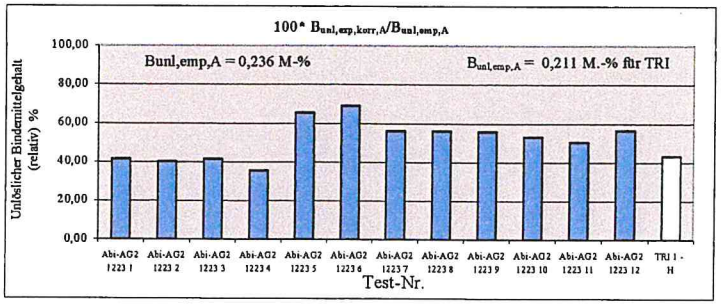


Abb. e

Abb. 44: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulat AG 1 (Labormischung Nr. 1223)

6.2.1.8 Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 65 A

Bei dem feinkörnigen aber auch splittreichen (77,5 M.-% > 2 mm) Splittmastixasphalt wurde an sich eine geringere Spreizung der Ergebnisse für den unlöslichen Bindemittelgehalts erwartet, wie sie in Tab. 20 angezeigt wird.

Möglicherweise spielen die aus Viatop stammenden Zellulosefasern, wie bereits unter Kap. 6.2.1.3 diskutiert, eine Rolle. In der Abb. 45 und der Anlage 6.2.1.8 sind die Einzelwerte dargestellt.

Tab. 20: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Splittmastixasphalt 0/8 S, große Labormischung (Nr. 1224)

Abi 0/16 S mit PmB 25 A Toluol-K		M_{cf} M.-%	$C_{org,unkorr,EA}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,M}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,A}$ M.-%	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ %
Mittelwert n = 10		56,63	0,190	0,1019	0,0947	39,29
Standard-abweichung		0,76	0,015	0,0096	0,0089	3,69
Variations-koeffizient	%	1,34	7,80	9,40	9,40	9,40
Spannweite		2,48	0,051	0,0327	0,0304	12,62
TRI-H n = 2 gemittelt		56,41	0,133	0,0638	0,0595	27,08

Wiederum wird der unlösliche Bindemittelgehalt bei der experimentellen Bestimmung nach Anhang C der DIN 1996 T.6 wesentlich niedriger festgestellt als der nach Abschnitt 8.2 dieser DIN berechnete. Ebenfalls liegt der mit TRI-H ermittelte Wert weit unter dem mit Toluol-K bestimmten, der ja nur knapp ein Drittel des $B_{unl,emp,A}$ ausmacht.

Das Mineralgemisch besteht aus 91 M.-% Diabas und 9,0 M.-% Kalksteinfüller K. Hier bietet sich wiederum ein Vergleich zu den Modell-Asphaltbetonen 0/11 D (K) an. Sie stimmen hervorragend mit den hier ermittelten Ergebnissen überein.

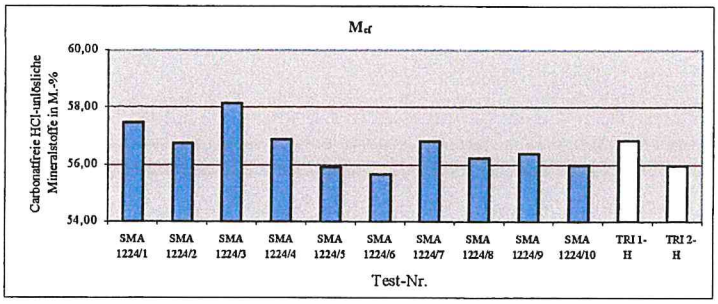


Abb. a

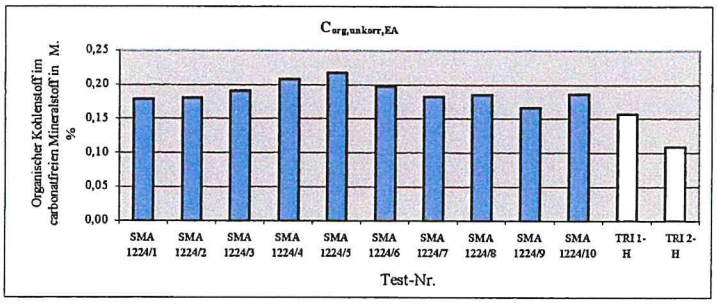


Abb. b

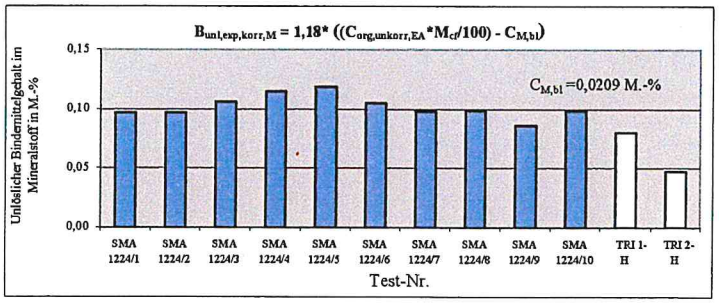


Abb. c

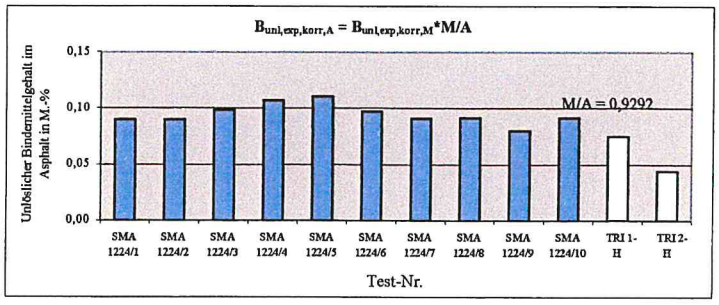


Abb. d

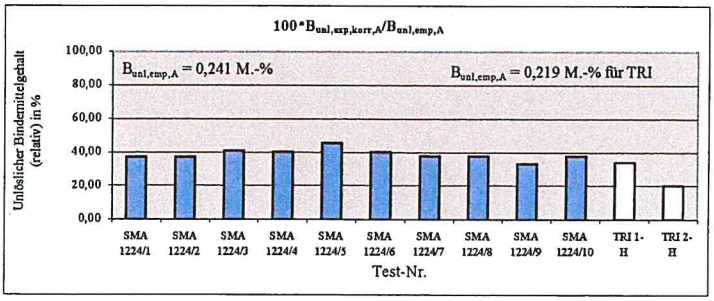


Abb. e

Abb. 45: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 65 A (Labormischung Nr. 1224)

6.2.1.9 Asphaltbinder 0/22 S mit Bitumen 30/45 und Asphaltgranulat AG 3

Das absolut grobkörnigste im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchte Mischgut, welchen auch noch 25 M.-% Asphaltgranulat zugesetzt wurde, ist der Asphaltbinder 0/22 S. Die Grobkörnigkeit und der Asphaltgranulatzusatz führten trotz präziser Probeteilung zu den größten aufgetretenen Spreizungen der Meßergebnisse wie sie in Tab. 21 angeführt sind. Auch die Abb. 46 und die Anlage 6.2.1.9 spiegeln das wider.

Wegen der großen Abweichung wurde eine komplette Wiederholung der Messungen durchgeführt, die in Anlage 6.2.1.9w angeführt sind. Die Ergebnisse werden durch die Wiederholung bestätigt.

Tab. 21: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder 0/22 S, große Labormischung (Nr. 1225)

Abi 0/22 S mit 30/45 + AG 3-Bitumen Toluol-K		M_{cf}	$C_{org,unkorr,EA}$	$B_{unl,exp,korr,M}$	$B_{unl,exp,korr,A}$	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	%
Mittelwert n = 10		72,61	0,160	0,1043	0,0999	48,46
Standard-abweichung		1,16	0,035	0,0289	0,0276	13,40
Variations-koeffizient	%	1,59	21,64	27,66	27,66	27,66
Spannweite		4,11	0,104	0,0871	0,0834	40,45
TRI-H n = 1		71,11	0,093	0,0457	0,0438	23,03

Der unlösliche Bindemittelgehalt mit der Füllergleichung berechnet beträgt etwa das Doppelte dessen, was sich bei der experimentellen Bestimmung ergibt. Die mit TRI-H extrahierte Probe enthält nur etwa die Hälfte an experimentell ermittelten unlöslichen Bitumen im Vergleich zu den Proben, welche mit Toluol-K extrahiert wurden.

Das Mineralgemisch enthält nach Eignungsprüfung 6,4 M.-% Füller, der sich anteilmäßig aus dem des AG 3 (Ergebniszusammensetzung vgl. Anlage 6.2.2.13) und dem untersuchten Kalksteinfüller K zusammensetzt. An den 93,6 M.-% Korn > 0,09 mm ist wiederum anteilmäßig (25 M.-%) das Mineralstoffgemisch aus AG 3 vertreten, ergänzt durch Granodiorit G.

Das Asphaltgranunlat AG 3 zeichnet sich durch relativ hohe Gehalte an unlöslichem Bindemittel aus (vgl. Anlage 6.2.1.12). Der Granodiorit G, wie bereits unter Kap. 6.2.1.1 diskutiert, zeichnet sich durch niedrige experimentell bestimmte Bindemittelgehalte aus, sowohl beim Asphaltbinder 0/16 S aus MA 1 als auch und insbesondere bei den im Labor hergestellten Modell-Gemischen.

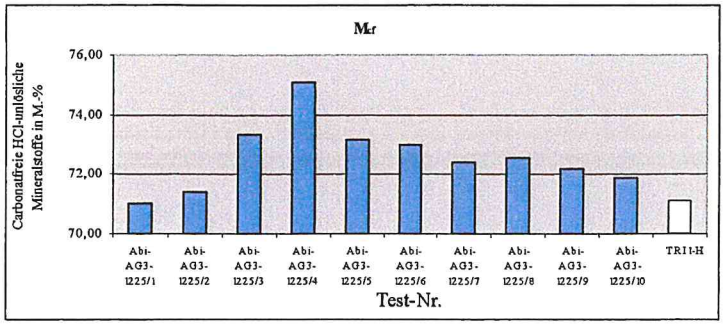


Abb. a

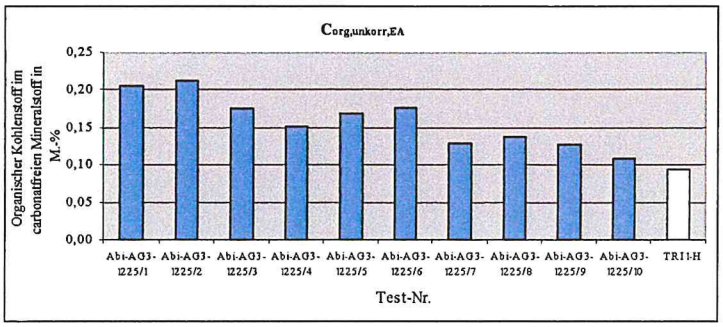


Abb. b

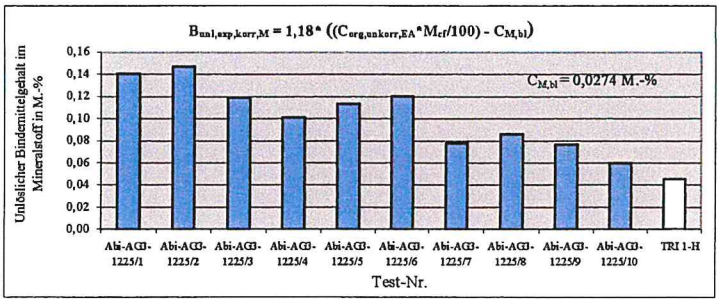


Abb. c

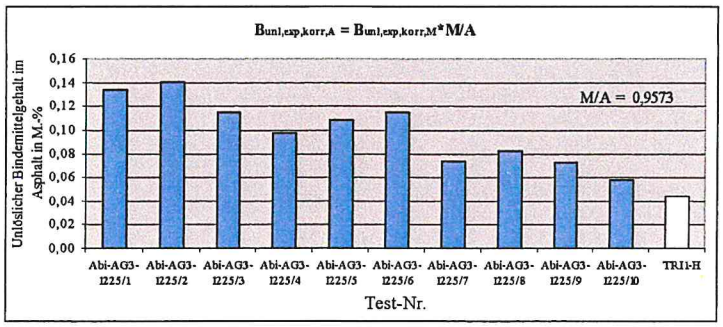


Abb. d

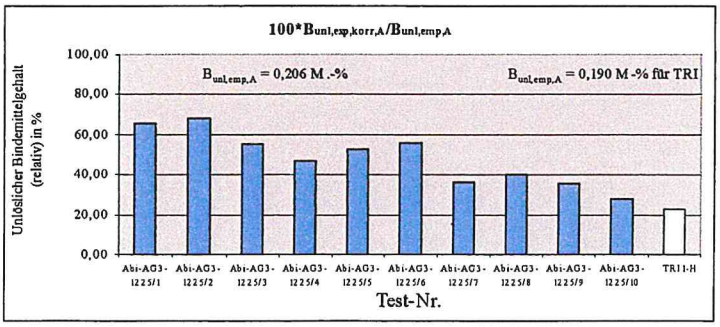


Abb. e

Abb. 46 : Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/22 S mit Bitumen 30/45 und Asphaltgranulat AG 3 (Labormischung Nr. 1225)

6.2.1.10 Asphaltgranulat AG 1 mit PmB 45 A (aus GA 0/11 S)

Die Ergebnisse der 10 Untersuchungen des unlöslichen Bindemittelgehaltes am Asphaltgranulat AG 1 sind zufriedenstellend. Die Abweichungen (Tab. 22) sind vergleichbar mit denen des Gußasphaltes GA 0/11 S in Kap. 6.2.1.2.

Einzelwerte sind in der Abb. 47 und der Anlage 6.2.1.10 enthalten.

Tab. 22: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltgranulat AG 1 (Nr. 1168)

AG 1 aus GA 0/11 S PmB 45 A Toluol-K		M_{cf}	$C_{org,unkorr,EA}$	$B_{unl,exp,korr,M}$	$B_{unl,exp,korr,A}$	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	%
Mittelwert n = 10	M.-% /%	55,06	0,682	0,4094	0,3796	71,68
Standard-abweichung	M.-% /%	0,79	0,057	0,0308	0,0285	5,39
Variations-koeffizient	%	1,44	6,56	7,52	7,52	7,52
Spannweite	M.-% %	2,44	0,182	0,1025	0,0950	17,95
TRI-H n = 1		54,68	0,491	0,2834	0,2628	51,03

Die Zugabezusammensetzung der Mineralstoffe kann mit Diabas (51 M.%), Syenodiorit (24 M.-%) und Kalksteinfüller (25 M.-%) laut Eignungsprüfung angeführt werden. Es sind drei der bei den Modell-Asphalten untersuchten Mineralstoffe bzw. Referenzgesteine enthalten. Der empirische Wert für den unlöslichen Bindemittelgehalt wird wiederum nicht erreicht. Durch die Füllerneubildung im Asphaltgranulat durch ursprüngliches Mischen/Kochen, Einbringen ehemals als Mischgut und späteres Abfräsen erhöht sich der empirisch bestimmte unlösliche Bindemittelgehalt (vgl. Abb. 2 in Kap. 4.3), wie aus der Ergebniszusammensetzung hervorgeht.

Die Heißextraktion mit Trichlorethylen ist signifikant wirksamer.

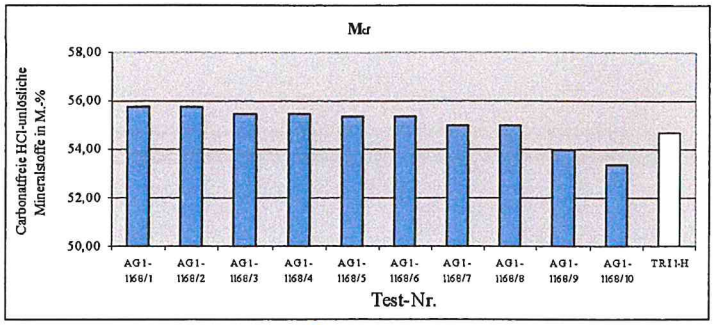


Abb. a

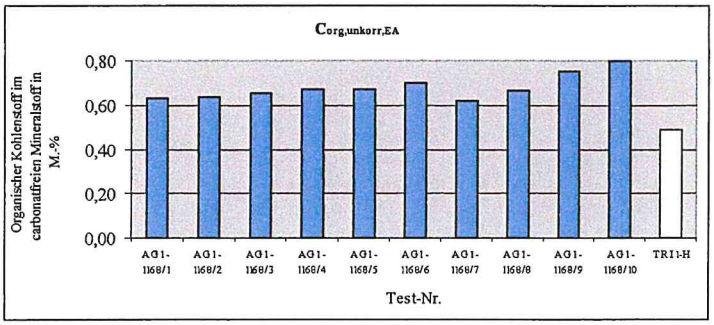


Abb. b

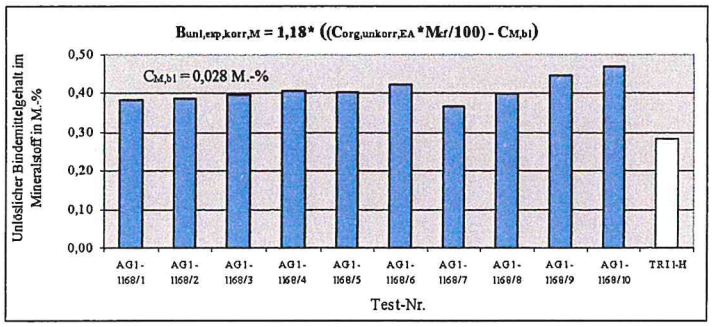


Abb. c

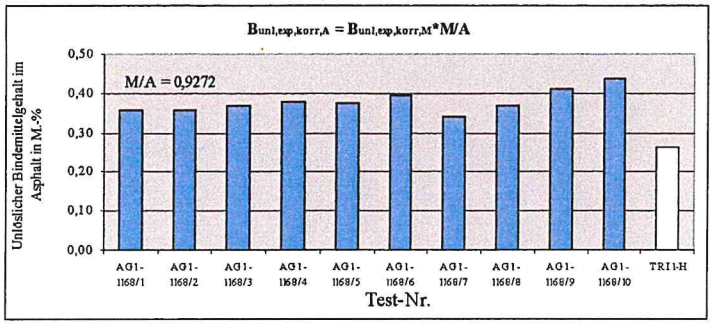


Abb. d

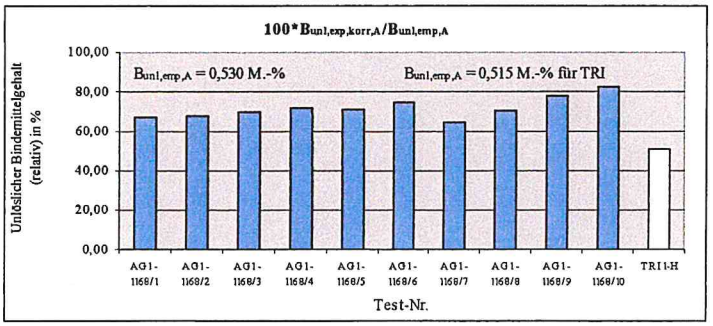


Abb. e

Abb. 47: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltgranulat AG 1 mit PmB 45 A (Nr. 1168)

6.2.1.11 Asphaltgranulat AG 2 (unbekannter Herkunft)

Die Ergebnisse der Untersuchungen weichen nicht überdurchschnittlich voneinander ab, wie aus Tab. 23 hervorgeht. Die Einzelwerte sind in der Abb. 48 und der Anlage 6.2.1.11 dargestellt.

Man hätte annahmen können, daß die experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalte, bedingt durch das Alter des Asphaltgranulates AG 2 (Einbau vor 1989) höher liegen. Doch auch hierbei wirdn der empirisch berechnete unlösliche Bindemittelgehalt, wenn auch vergleichsweise geringfügig aber signifikant unterschritten, wiederum deutlicher bei der Heißextraktion mit Trichlorethylen.

Tab. 23: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltgranulat AG 2 (Nr. 124)

AG 2 Toluol-K		M_{cf} M.-%	$C_{org,unkorr,EA}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,M}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,A}$ M.-%	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ %
Mittelwert n = 11		83,50	0,256	0,2354	0,2228	86,08
Standard- abweichung		1,03	0,023	0,0219	0,0207	7,99
Variations- koeffizient	%	1,24	8,90	9,29	9,29	9,29
Spannweite		3,85	0,061	0,0639	0,0606	23,38
TRI-H n = 1		81,84	0,188	0,1646	0,1558	64,63

Da die Mineralstoffe des AG 2 nicht bekannt sind, kann auch keinerlei Aussage über deren Absorptionsvermögen getroffen werden. Möglicherweise ist der relativ hohe Wert auch dadurch bedingt. Als Blindwert $C_{M,bl}$ wurde ein geringerer Wert im Vergleich zum niedrigsten der acht untersuchten Mineralstoffe (S, Q, D, L, A, G, O, K) von 0,014 M.-% angenommen. Er könnte auch wesentlich höher liegen, wie von Nüssel /18/ (0,11 M.-% als Blindwert für ein Quarzmehl) experimentell ermittelt wurde.

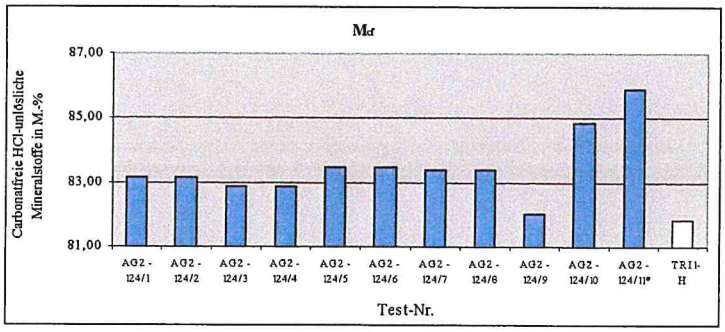


Abb. a

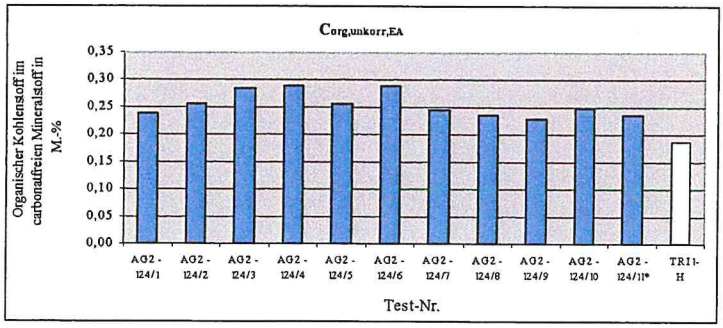


Abb. b

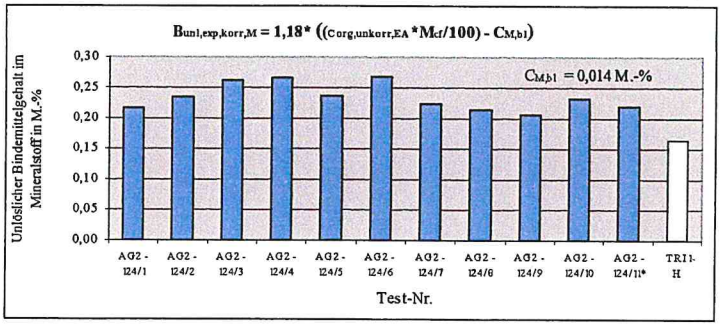


Abb. c

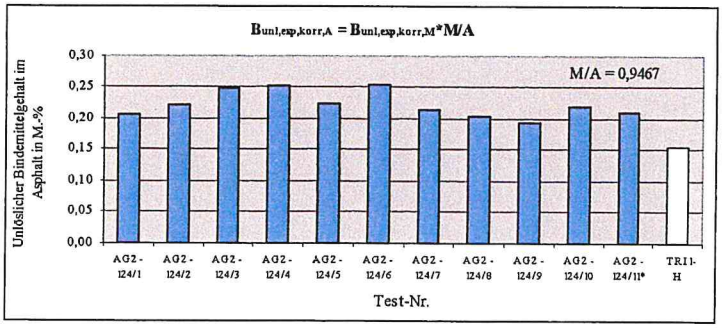


Abb. d

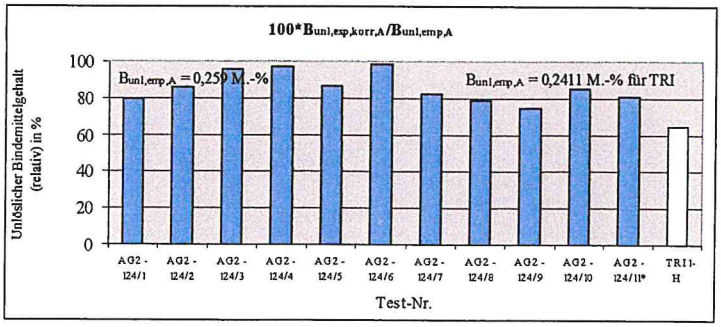


Abb. e

Abb. 48: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltgranulat AG 2 (Nr. 124)

6.2.1.12 Asphaltgranulat AG 3

Aus Tab. 24 geht hervor, daß bei Asphaltgranulat AG 3 (AB 0/11 S + Abi 0/22) gut übereinstimmende Werte für den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt erhalten werden.

Trotz des Alters (1991/1994) ergibt sich ein niedrigerer Wert als der sich nach der Füllergleichung errechnet und mit der Heißextraktion durch Trichlorethylen wie in allen untersuchten Fällen ein noch deutlich geringerer Wert.

Die Ergebnisse für die durchgeführten Untersuchungen sind in Abb. 49 und Anlage 6.2.1.12 angeführt.

Tab. 24: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltgranulat AG 3 (Nr. 1199)

AG 3 mit 50/70 (B 65) Toluol-K		M_{cf}	$C_{org,unkorr,EA}$	$B_{unl,exp,korr,M}$	$B_{unl,exp,korr,A}$	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	%
Mittelwert n = 11		66,56	0,343	0,2430	0,2311	83,14
Standard-abweichung		0,66	0,019	0,0168	0,0160	5,76
Variations-koeffizient	%	0,99	5,58	6,92	6,92	6,92
Spannweite		2,25	0,066	0,0575	0,0547	19,67
TRI-H n = 1		67,07	0,272	0,1892	0,1800	69,77

Das Asphaltgranulat stammt von einer Deckschicht AB 0/11 S und einer Asphaltbinderschicht Abi 0/22 (S) eines Autobahnabschnittes. Aus den Eignungsprüfungen gehen die eingesetzten Mineralstoffe hervor. Es handelt sich im wesentlichen um Orthophyr O.

Der Mineralstoff wurde bezüglich seines Absorptionsvermögens, seines „Bitumenschluckwertes" (Vortrag Berchtesgaden 2002) an der Kornklasse 2/5 untersucht. Es wurde ebenfalls der Blindwert (Anlage 5.1.3) bestimmt.

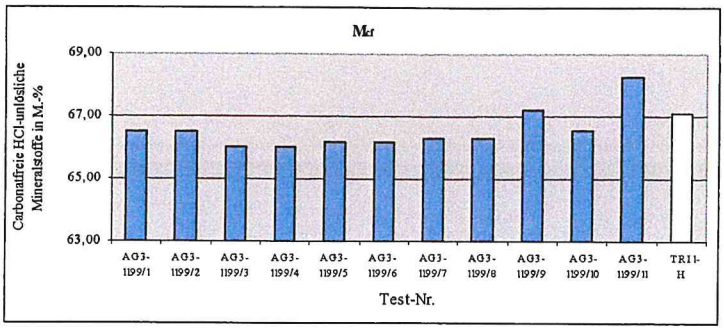


Abb. a

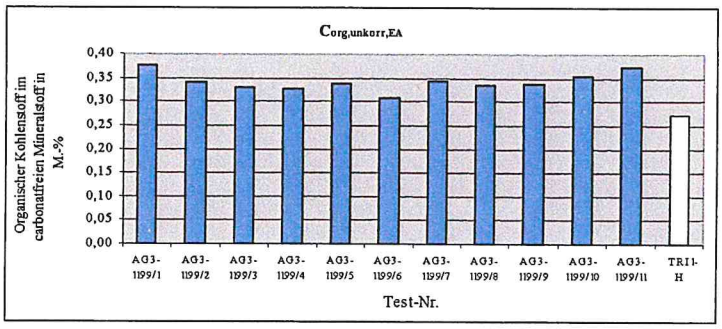


Abb. b

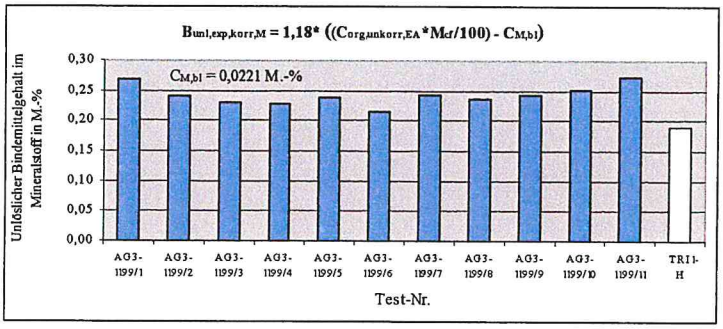


Abb. c

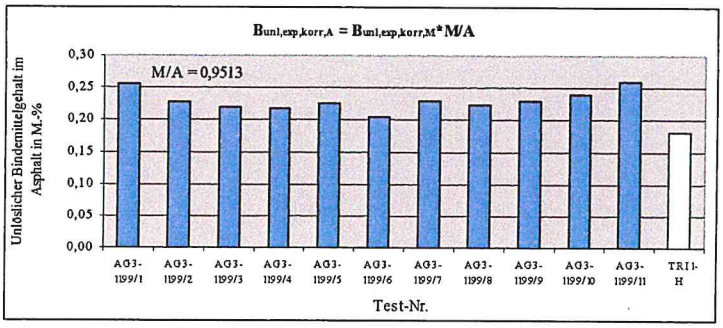


Abb. d

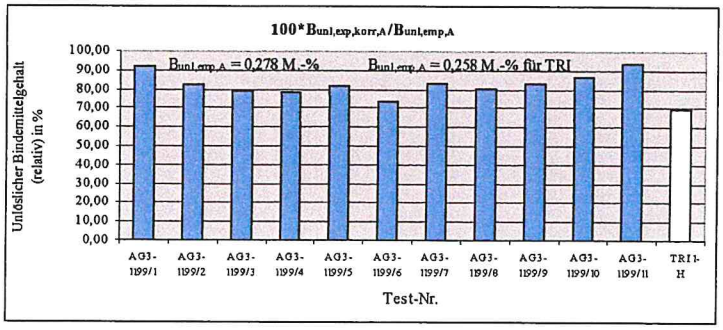


Abb. e

Abb. 49: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltgranulat AG 3 (Nr. 1199)

6.2.1.13 Bohrkerne längerer Liegedauer aus Asphaltbinder 0/16 S

Die zwar nur drei Untersuchungen an Bohrkernen längerer Liegedauer zeigen eine hervorragende Übereinstimmung der Meßwerte zum unlöslichen Bindemittelgehalt, wie aus Tab. 25 hervorgeht.

Die Einzelergebnisse sind in Abb. 50 und der Anlage 6.2.1.13 enthalten.

Was sehr verwundert, ist der niedrige Relativwert (Q_{unl}) $100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ des unlöslichen Bindemittelgehaltes.

Aus diesem Grunde wurde eine komplette Wiederholung der Untersuchungen der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes durchgeführt.

Die Tendenz der höheren Wirksamkeit der Heißextraktion mit Trichlorethylen ist wieder eindeutig zu erkennen.

Tab. 25: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Bohrkernen eines Asphaltbinders 0/16 S von MA 1 (Nr. 19)

Abi 0/16 S mit PmB 25 A Toluol-K		M_{cf} M.-%	$C_{org,unkorr,EA}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,M}$ M.-%	$B_{unl,exp,korr,A}$ M.-%	$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$ %
Mittelwert n = 3		79,99	0,088	0,0501	0,0476	22,21
Standard-abweichung		0,59	0,002	0,0019	0,0018	0,84
Variations-koeffizient	%	0,74	2,00	3,77	3,77	3,77
Spannweite		1,09	0,004	0,0034	0,0033	1,53
Mittelwert w n = 3		79,99	0,099	0,0611	0,0581	27,10
Standard-abweichung w		0,59	0,001	0,0008	0,0008	0,37
Variations-koeffizient w	%	0,74	1,27	1,37	1,37	1,37
Spannweite w		1,09	0,003	0,0016	0,0015	0,70
TRI-H n = 1		80,93	0,065	0,0294	0,0280	14,84

Da das Mineralgemisch zu 98 M.-% aus Granodiorit G besteht, gelten die gleichen Aussagen wie unter Kap. 6.2.1.1. Die Ergebnisse stimmen gut mit denen der „mineralstoffkonformen" Modell-Aspalte mit dem Referenzgestein Granodiorit überein.

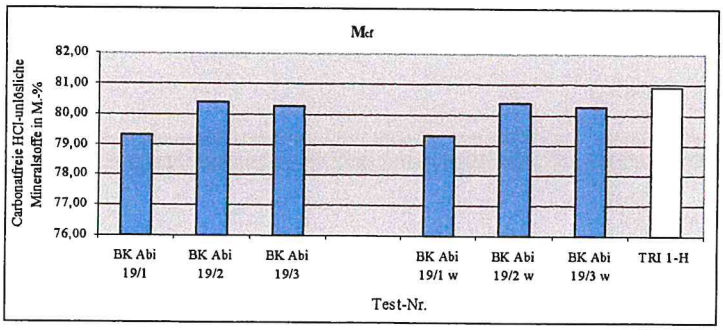


Abb. a

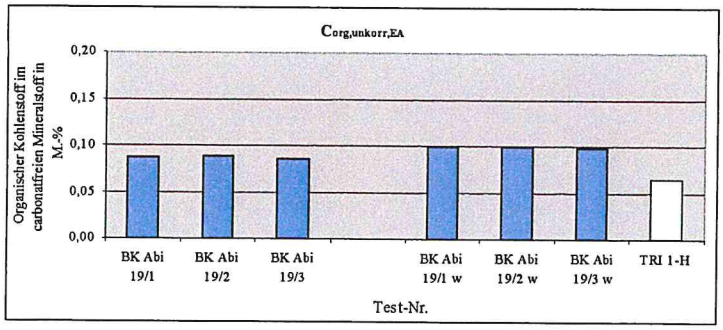


Abb. b

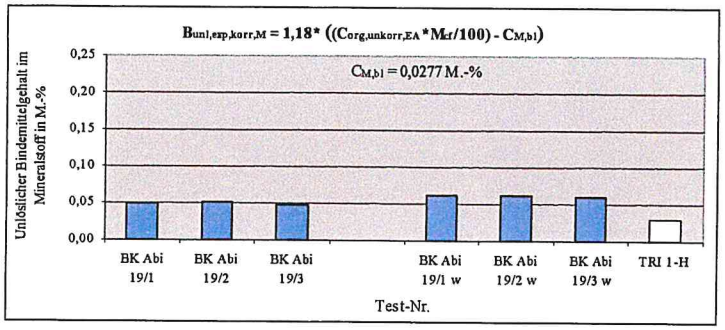


Abb. c

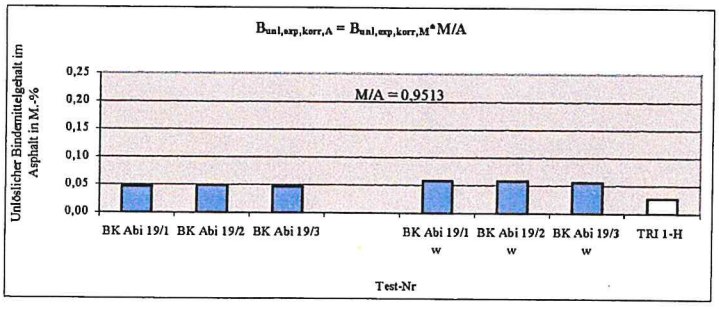


Abb. d

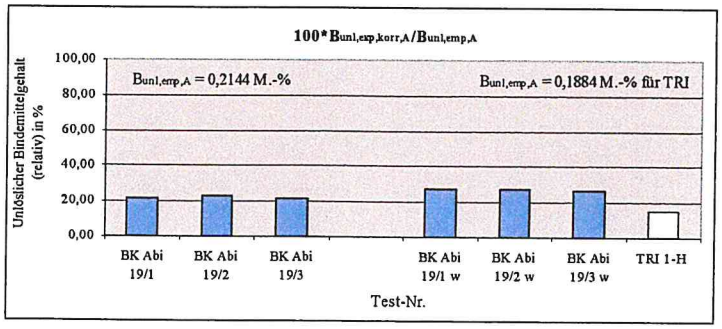


Abb. e

Abb. 50: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Bohrkernen längerer Liegedauer eines Asphaltbinders 0/16 S (BK Nr. 19)

6.2.2 Löslicher Bindemittelgehalt und Gesamtbindemittelgehalt

Der lösliche Bindemittelgehalt $B_{lös}$ ($B_{lös,W}$) wurde mittels des Rückgewinnungsverfahrens /30/ (Toluol-K) nach DIN 1996-6A-W1-KR (Abschn. 7.5 und 7.7) ermittelt, mit dem Ziel diesen wiederholt quantitativ zu bestimmen und ausreichend zurückgewonnenes Bindemittel zur Verfügung zu haben, um dessen Kennwerte festzustellen. Dieses Verfahren erlaubt gleichzeitig, die notwendige vollständige Abtrennung der Mineralstoffe vorausgesetzt, den löslichen Bindemittelgehalt $B_{lös,D}$ durch das Differenzverfahren DIN 1996-6A-D1-K (Abschn, 7.6) zu berechnen. Auf eine Mittelung dieser beiden Bindemittelgehalte zu $B_{lös} = (B_{lös,W} + B_{lös,D})/2$ wurde verzichtet (Abschn. 9.1b), da sie auch bei einer Wertung der Untersuchungen als Schiedsanalyse nicht erlaubt wäre, dann aber gilt $B_{lös,W} = B_{lös}$.

Des weiteren wird vergleichsweise, obwohl nicht im geplanten Untersuchungsprogramm verankert, die Heißextraktion mit Trichlorethylen, Verfahren DIN 1996-A6-D2-H (Abschn. 7.6) durchgeführt. Hierbei wird nur das Differenzverfahren angewendet und kein Bindemittel zurückgewonnen. Es wäre auch nicht zulässig, dieses so zurückzugewinnende Bitumen im Status einer Schiedsanalyse für die Bestimmung seiner Eigenschaften zu verwenden.

Nach Abschn. 9.1.a der DIN 1996 T.6 gilt hier, daß der nach dem Differenzverfahren ermittelte lösliche Bindemittelgehalt $B_{lös,D} = B_{lös}$ ist.

In der folgenden Tab. 26 sind die Mittelwerte sowohl für $B_{lös,W}$ als auch für $B_{lös,D}$ (mit Toluol-K extrahiert) aus n Einzelwerten (quasi n Ergebnissen, wenn man die Bedingungen, das Durchführen einer Doppelbestimmung, welche nur an eine Schiedsanalyse gestellt wird, nicht berücksichtigt) dargestellt. Des weiteren sind die Standardabweichung, der Variationskoeffizient und die Spannweite tabelliert. Nach Abschnitt 11 der DIN 1996 T.6 bezieht sich zwar die Verfahrenspräzision auf den gesamten Bindemittelgehalt B bzw. B_{ges}. Sie wird in diesem Rahmen jedoch für $B_{lös}$ angewendet. Das ist m.E. vertretbar, da die Füllergehalte der n Extraktionen und die daraus berechneten unlöslichen Bindemittelgehalte $B_{unl,emp,A}$ unwesentlich voneinander abweichen und somit das Ergebnis beeinflussen könnten.

Die Wiederholstandardabweichung $\sigma_r = (0{,}10 + 0{,}002*A)$ wurde für jede der zwölf Mischgüter und den Bohrkernen längerer Liegedauer in Abhängigkeit von dem prozentualen Siebrückstand auf dem 11,2-mm-Sieb berechnet. Daraus wurde die sogenannte kritische oder auch zulässige Spannweite unter Wiederholbedingungen bei n Ergebnissen mit einer statistischen Sicherheit von P = 95 % $d_r = W_P(n)* \sigma_r$ (a_{zul}) /29/ berechnet.

Mit Ausnahme von zwei der drei untersuchten Asphaltgranulate AG 1 und AG 2 liegen die ermittelten Spannweiten ($n_{max} - n_{min}$) unterhalb der kritischen Spannweite. Asphaltgranulate sind im Abschnitt 1 - Anwendungsbereich und Zweck - der DIN 1996 T. 6 auch nicht

berücksichtigt. Es ist anzunehmen, daß diese Streuungen nicht aus der Probeteilung und Durchführung der Extraktion bzw. Prüfung unter Wiederholbedingungen resultieren, sondern daß eine größere Inhomogenität des Asphaltgranulates im Vergleich zu frischen Mischgütern Ursache dafür ist.

Des weiteren ist aus der Tab. 26 zu erkennen, daß die durch das Differenzverfahren (Toluol-K) berechneten Mittelwerte für $B_{lös}$ in der Regel geringfügig höher ausfallen als die mit dem Rückgewinnungsverfahren bestimmten.

Der Gesamtbindemittelgehalt wird aus der Summe $B_{lös}$+ B_{unl} gebildet, wobei hier für den unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,emp,A}$ als vertragsrelevante Größe (Anlagen 6.2.2.1 bis 6.2.2.13) verwendet wird, obwohl, wie unter 6.2.1 nachgewiesen wurde der reale unlösliche experimentell nach Anhang C ermittelte unlösliche Bindemittelgehalt in allen untersuchten Fällen (n =$145_{Toluol-K}$ + $16_{TRI-H/K}$) $B_{unl,exp,korr,A}$ z.T. deutlich geringer ist. In Abb. 51 werden für die zwölf Mischgüter einschließlich Asphaltgranulate und Bohrkerne die Gesamtbindemittelgehalte unter Verwendung einmal des empirischen und zum anderen des experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes gegenübergestellt. Für $B_{lös}$ wird der $B_{lös,W}$ durch Kaltextraktion mit Toluol und Rückgewinnung des Bindemittels erhaltene Wert eingesetzt. Für $B_{lös}$ werden ansonsten noch mehrere Varianten betrachtet (Anlagen 6.2.2.1 bis 6.2.2.13), $B_{lös,W}$ (Toluol-K) $B_{lös,D}$ (Toluol-K) und $B_{lös,D}$ (TRI-H/K).

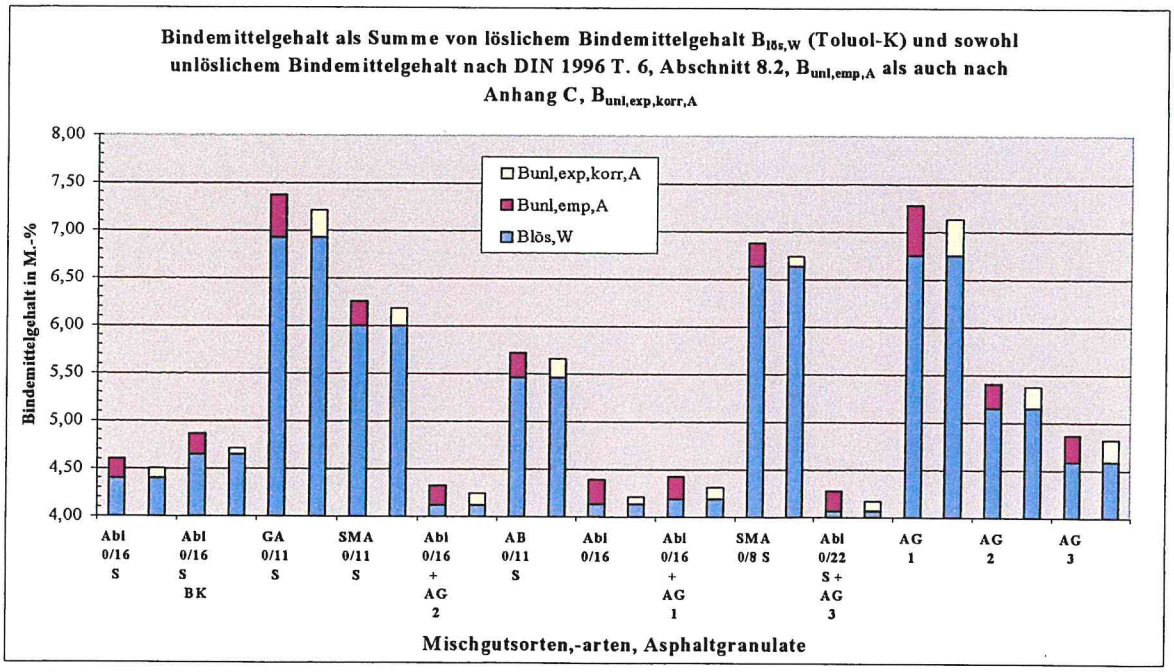


Abb. 51: Gesamtbindemittelgehalt unter Berücksichtigung des empirisch und des experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes

Tab. 26: Statistische Kennwerte zum löslichen Bindemittelgehalt

Labor-Nr.	Mischgut-art/sorte	Binde-mittel	Anzahl der Extrak-tionen n	Mittelwert $B_{lös,W}$ Toluol-K	Standard-abwei-chung s	Varia-tions-koeffi-zient	Spann-weite n_{max}-n_{min}	Siebrück-stand > 11 mm A	Kritische Spann-weite (P = 95 %) $W_P(n)$* σ_r	Standard-abwei-chung zulässig $\sigma_r = (0{,}10 + 0{,}002*A)$
				M.-%	M.-%	%	M.-%	M.-%		
19	Abi 0/16 S	PmB 25 A	13	4,40	0,17	3,92	0,66	24,6	> 0,67	0,15
19 BK	Abi 0/16 S	PmB 25 A	3	4,65	0,08	1,76	0,16	24,0	0,50	0,15
1205	GA 0/11 S	30/45	12	6,93	0,11	1,54	0,34	1,3	> 0,45	0,10
1218	SMA 0/11 S	PmB 45 A	13	6,00	0,05	0,80	0,16	7,0	> 0,49	0,11
1220	Abi 0/16	50/70 + AG 2	11	4,12	0,15	3,64	0,49	37,6	> 0,80	0,18
1221	AB 0/11 S	70/100	10	5,46	0,09	1,69	0,33	2,5	0,49	0,11
1222	Abi 0/16	50/70	10	4,16	0,12	2,85	0,42	37,1	0,80	0,17
1223	Abi 0/16	50/70 + AG 1	13	4,19	0,11	2,52	0,37	34,2	> 0,76	0,17
1224	SMA 0/8 S	PmB 65 A	10	6,84	0,07	1,04	0,22	0,0	0,45	0,10
1225	Abi 0/22 S	30/45 + AG 3	10	4,07	0,14	3,36	0,36	42,9	0,85	0,19
1168	GA 0/11 S AG 1	PmB 45 A	10 9	6,75 6,70	0,22 0,16	3,22 2,39	0,66 0,40	0,2	0,45 0,44	0,10
124	unbekannt AG 2	unbekannt	10 9	5,15 5,09	0,26 0,18	5,09 3,44	0,92 0,50	15,5	0,58 0,57	0,13
1199	AB 0/11 S + Abi 0/22 AG 3	50/70 (B 65)	17	4,59	0,12	2,71	0,45	8,7	> 0,54	0,12
				Mittel-wert $B_{lös,D}$ Toluol-K						
19	Abi 0/16 S	PmB 25 A	13	4,45	0,16	3,63	0,60	24,6	> 0,67	0,15
19 BK	Abi 0/16 S	PmB 25 A	3	4,71	0,09	1,81	0,17	24,0	0,50	0,15
1205	GA 0/11 S	30/45	12	6,94	0,15	2,17	0,54	1,3	> 0,45	0,10
1218	SMA 0/11 S	PmB 45 A	13	6,04	0,07	1,13	0,20	7,0	> 0,49	0,11
1220	Abi 0/16	50/70 + AG 2	11	4,12	0,09	2,25	0,37	37,6	> 0,80	0,18
1221	AB 0/11 S	70/100	10	5,51	0,13	2,35	0,38	2,5	0,49	0,11
1222	Abi 0/16	50/70	10	4,14	0,12	2,94	0,46	37,1	0,76	0,17
1223	Abi 0/16	50/70 + AG 1	13	4,24	0,11	2,60	0,41	34,2	> 0,76	0,17
1224	SMA 0/8 S	PmB 65 A	10	6,86	0,10	1,51	0,33	0,0	0,45	0,10
1225	Abi 0/22 S	30/45 + AG 3	10	4,07	0,17	4,20	0,46	42,9	0,85	0,19
1168	GA 0/11 S AG 1	PmB 45 A	10 9 7	6,93 6,86 6.86	0,32 0,27 0,11	4,68 3,88 1,54	1,15 0,59 0,29	0,2	0,45 0,44 0,42	0,10
124	unbekannt AG 2	unbekannt	9 5	5,31 5,26	0,32 0,08	6,08 1,52	0,90 0,19	15,5	0,57	0,13
1199	AB 0/11 S + Abi 0/22 AG 3	50/70 (B 65)	17	4,78	0,11	2,33	0,37	8,7	> 0,54	0,12

Tab.27: Gesamtbindemittelgehalt (Differenzverfahren), löslicher und unlöslicher Bindemittelgehalt (Füllergehalt)

Mischgutart/-sorte ,Asphaltgranulate	Anzahl der Extraktionen	$B_{lös,D}$ Toluol-K Mittel	$F_{M,n}$ Mittel	$B_{unl,emp,A}$ Mittel	B_{ges} Toluol-K Mittel	Anzahl der Extraktionen	$B_{lös,D}$ TRI-H	$F_{M,n}$	$B_{unl,emp,A}$	B_{ges} TRI-H
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Abi 0/16S Nr. 19	13	4,45	8,01	0,20	4,65	2	4,64	6,90	0,19	4,83
BK Abi 0/16 S Nr. 19	3	4,71	8,80	0,21	4,92	1	4,67	6,80	0,19	4,86
GA 0/11 S Nr. 1205	12	6,94	26,34	0,44	7,38	2	7,06	24,60	0,42	7,48
SMA 0/11 S Nr. 1218	13	6,04	12,18	0,26	6,30	2	6,31	10,00	0,24	6,55
Abi 0/16+AG 2 Nr. 1220	11	4,12	7,93	0,20	4,32	2	4,28	5,25	0,17	4,45
AB 0/11 S Nr. 1221	10	5,51	12,15	0,26	5,76	2	5,54	9,20	0,22	5,76
Abi 0/16 Nr. 1222	10	4,14	11,73	0,25	4,39	1	4,41	9,00	0,22	4,63
Abi 0/16+AG 1 Nr. 1223	13	4,24	10,55	0,24	4,48	2	4,28	8,50	0,21	4,49
SMA 0/8 S Nr. 1224	10	6,86	10,85	0,24	7,10	1	6,94	9,80	0,23	7,17
Abi 0/22 S+AG3 Nr. 1225	13	4,07	8,16	0,21	4,28	2	4,39	6,95	0,19	4,58
AG 1 Nr. 1168	10	6,93	33,04	0,53	7,46	2	7,17	31,90	0,51	7,68
AG 2 Nr. 124	9	5,31	12,22	0,26	5,57	2	5,53	10,85	0,24	5,77
AG 3 Nr. 1199	16	4,78	13,50	0,28	5,06	2	4,89	12,05	0,26	5,16

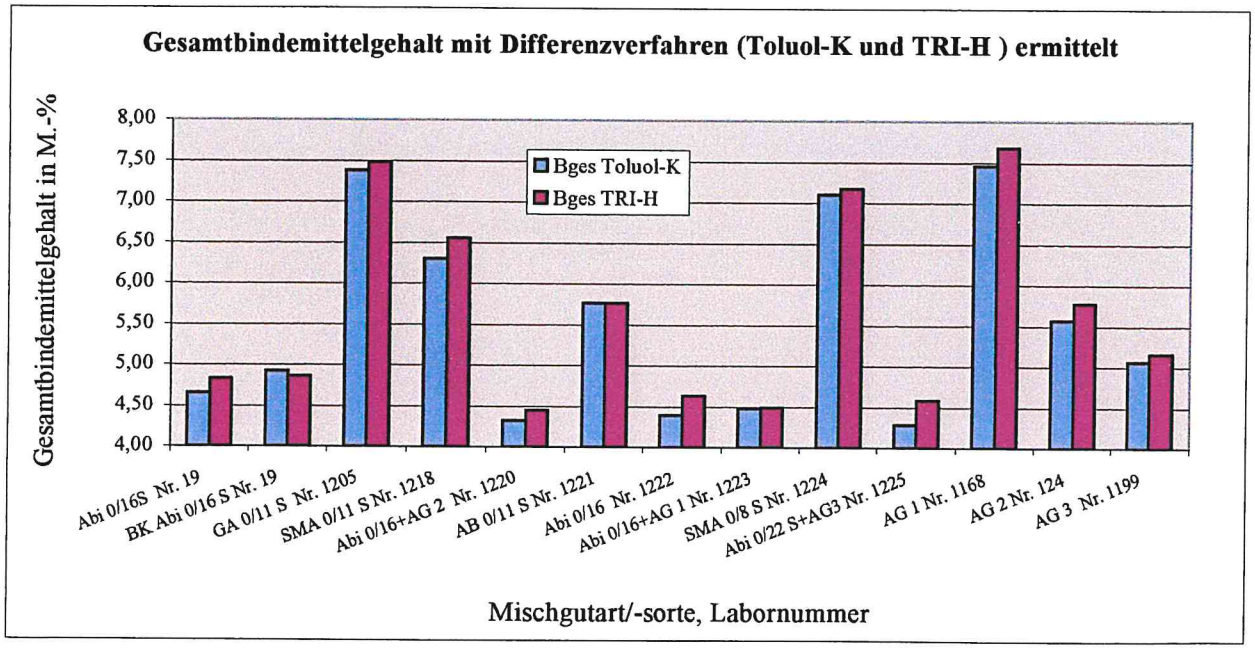


Abb. 52: Gesamtbindemittelgehalt mit Differenzverfahren ermittelt-Vergleich der Lösemittel und Extraktionstemperatur

Aus Tab. 27 und Abb. 52 ist ersichtlich, daß die Gesamtbindemittelgehalte, die Summe des löslichen Bindemittelgehaltes $B_{lös,D}$ und des empirisch ermittelten unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,emp,A}$, der mit Trichlorethylen durch Heißextraktion ermittelten Werte höher sind als diejenigen, welche durch Kaltextraktion mit Toluol ermittelt wurden.
Da $B_{unl,emp,A}$ immer auf Grund des geringeren ermittelten Füllergehaltes niedriger ausfällt, ist diese Differenz wohl als signifikant zu betrachten.
Als Ursache für diese Differenzen im Füllergehalt werden die Dichteunterschiede der Lösemittel bei gleicher Temperatur angenommen. Toluol mit einer wesentlich geringeren Dichte von 0,866 g/cm³ und demzufolge einer größeren Differenz zur mittleren Dichte der Mineralstoffe von ca. 2,700 g/cm³ wird bei ansonsten gleicher Vorgehensweise beim Zentrifugieren einen besseren Trenneffekt ergeben als Trichlorethylen mit einer Dichte von 1,466 g/cm³. Einen Nachweis dafür hätte die Bestimmung des Aschegehaltes im zurückgewonnenen Bitumen ergeben können. Da die Extraktion mit Trichlorethylen zusätzlich in das Untersuchungsprogramm aufgenommen wurde, mußte auf diese sicher interessanten weitergehenden Prüfungen verzichtet werden.
Würde also eine Reihung der mittels unterschiedlicher Verfahren bestimmten Gesamtbindemittelgehalte als Summe von $B_{lös}$ und B_{unl} getroffen, ist

- der mit Toluol-K ermittelte lösliche Bindemittelgehalt $B_{lös,W}$ in Verbindung mit dem experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,exp,korr,A}$ der niedrigste
- die Kombination von mit dem Rückgewinnungsverfahren (Toluol-K) bestimmten löslichen Bindemittelgehalt und dem mit der Füllergleichung berechneten unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{lös,W} + B_{unl,emp,A}$ schließt sich an,
- gefolgt von der Summe des mit dem Differenzverfahren (Toluol-K) ermittelten löslichen Bindemittelgehalt und den mit der Füllergleichung berechneten unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{lös,D} + B_{unl,emp,A}$
- während die Kombination mit dem höchsten Gesamtbindemittelgehalt die Summe des mit dem Differenzverfahren (TRI-H) bestimmten löslichen Bindemittelgehaltes und des auf Erfahrungen beruhenden unlöslichen Bindemittelgehalt (gemäß Füllergleichung) $B_{lös,D} + B_{unl,emp,A}$ ergibt.

Letztere Variante ist aber auch diejenige, welche der in der Praxis angewandten Methode zur Bestimmung des Gesamtbindemittelgehaltes am nächsten kommt, was es zu überdenken gilt.

6.2.3 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der vom Bindemittel befreiten extrahierten Mineralstoffe der zwölf Praxisgemische (Mischgüter aus Mischanlagen, große Labormischungen und Asphaltgranulate) wurde nach DIN 1996 T.14 ermittelt.

Die Korngrößenverteilung dieser zwölf Asphalte wurde mindestens zehnfach (bis zu 17 Untersuchungen) durch Kaltextraktion mit Toluol und zweimal durch Heißextraktion mit Trichlorethylen bestimmt. Die mittleren Sieblinien sind in Abb. 53 und Tab. 28 dargestellt. Die Einzelwerte sind in den Anlagen 6.2.2.1 bis 6.2.2.13 enthalten.

Es wurde ein zusätzliches Sieb von 0,063 mm in Hinblick auf die Europäische Normung eingeschaltet.

Im wesentlichen stimmen die Korngrößenverteilungen mit den Zugabezusammensetzungen laut Eignungsprüfungen überein. Bei den Labormischungen ist jedoch eine gewisse Füllerzunahme in der Ergebniszusammensetzung im Vergleich zu der Ausgangszusammensetzung mit exakt eingewogenenen von Über- und Unterkorn befreiten und gewaschenen Kornklassen nach dem Mischprozeß zu beobachten.

Zur Abtrennung der mineralischen mehlfeinen Bestandteile aus den durch Extraktion gewonnenen Bitumenlösungen wurde eine Kühlzentrifuge mit 1-l-Zentrifugenbechern aus Edelstahl, die mit einem verschraubbaren Deckel versehen waren, verwendet. Die maximale Drehzahl beträgt 4500 und die kinetische Energie beträgt 310 000 Nm.

Die zulässige Drehzahl ist dichteabhängig. So wurde die maximale Drehzahl nicht ausgeschöpft und sowohl für toluolige Lösungen als auch für Bitumenlösungen in Trichlorethylen auf 4000 Umdrehungen vermindert.

Wie bereits unter 6.2.2 angeführt, wird der Anteil der Kornklasse 0/0,09, der Anteil an Füller im Mineralgemisch F_M bei der Heißextraktion mit Trichlorethylen immer, wenn auch nur durch zwei Untersuchungen nachgewiesen, niedriger ermittelt. In Tab. 27 sind diese Werte angefügt. Die Differenzen bei der Füllerbestimmung bei Kaltextraktion mit Toluol und der Heißextraktion mit Trichlorethylen liegen im Bereich von 1,10 M.-% (Abi 0/16 S von MA 1 mit Granodiorit) als kleinster Wert bis zu 3,13 M.-% (Abi 0/16 große Labormischung mit Amphibolit) als größte Differenz.

Möglicherweise spielt die wesentlich höhere Dichte von Trichlorethylen im Vergleich zu Toluol eine Rolle bei der Sedimentation der feinen Mineralstoffe, die Feinkörnigkeit des Füllers (vgl. 4.2. Tab.3) und/oder auch ggf. eine Füllerneubildung beim wiederholten Rühren des Asphaltes im kalten Toluol im Vergleich zur statischen Heißextraktion. In einigen Fällen konnte auch beim Dekantieren der zentrifugierten Bitumenlösungen in Trichlorethylen ein

„Schweif" von feinem Mehl am Becher beobachtet werden, so daß möglicherweise Verluste aufgetreten sein könnten.

Doch letzteres Phänomen wäre bei Rückgewinnung des Bindemittels aus dem Trichlorethylenextrakt über die Bestimmung des Aschegehaltes nachweisbar.

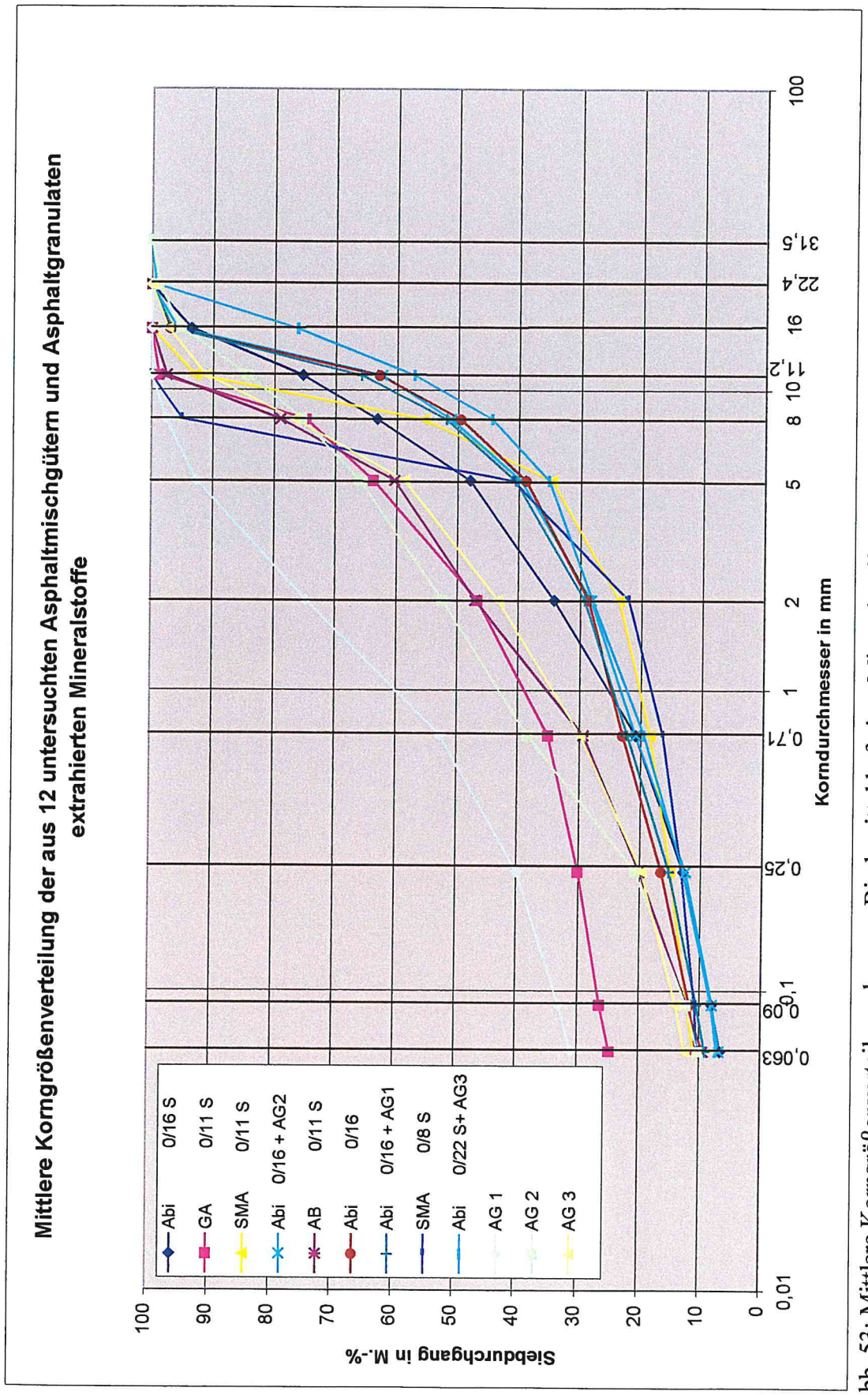


Abb. 53: Mittlere Korngrößenverteilung der vom Bindemittel befreiten Mineralstoffe von 5 Mischgütern (MA 1, MA 2, MA 3), 4 großen Labormischungen und 3 Asphaltgranulaten

Tab. 28: Mittlere Korngrößenverteilungen der vom Bindemittel befreiten Mineralstoffe der zwölf untersuchten Asphalte/Aphaltgranulate

	Sieb-öffnung in mm	Siebdurchgang in M.-%											
Labor-Nr.		19	1205	1218	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1168	124	1199
Mischgutart-sorte /		Abi 0/16 S	GA 0/11 S	SMA 0/11 S	Abi 0/16 + AG2	AB 0/11 S	Abi 0/16	Abi 0/16 + AG1	SMA 0/8 S	Abi 0/22 S+ AG3	AG 1	AG 2	AG 3
Asphalt-granulat											GA 0/11S	unbekannt	AB 0/11 S + Abi 0/22
Zugabe-Bindemittel		PmB 25 A	30/45	PmB 45 A	50/70 + AG 2-Bitumen	70/100	50/70	50/70 + AG 1-Bitumen	PmB 65 A	50/70 + AG 3-Bitumen	PmB 45 A	unbekannt	50/70
Herstellung des Mischgutes		MA 1	MA 2	MA 2	MA 3	MA 2	Labor	Labor	Labor	Labor	MA	MA	MA
Anzahl der Tests n Toluol-H		13	12	13	11	10	10	13	10	10	10	9	16
Einbau des Mischgutes											2000	vor 1989	1991/ 1994
	31,5									100,00		100,00	
	22,4	100,00		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		99,23	100,00	98,78	100,00
	16	93,48	100,00	99,93	95,70	99,94	96,91	96,66		76,22	99,94	95,21	97,29
	11,2	75,43	98,71	92,95	62,45	97,47	62,88	65,79	100,00	57,10	99,83	84,51	91,26
	8	63,25	74,92	55,63	51,11	79,02	49,66	51,93	94,98	44,39	97,73	75,59	76,78
	5	48,03	63,82	34,63	39,60	60,36	38,90	40,61	40,97	35,10	92,71	66,12	58,81
	2	34,20	46,72	23,71	28,23	47,12	28,68	29,23	22,14	27,99	74,86	52,58	43,43
	0,71	20,90	35,09	18,49	20,87	29,42	23,03	22,22	16,47	19,47	52,83	38,52	29,87
	0,25	12,88	30,10	15,05	12,48	20,11	16,50	15,20	13,15	12,90	40,04	20,84	19,76
	0,09	8,02	26,34	12,17	7,93	12,15	11,73	10,55	10,85	8,16	33,04	12,22	13,97
	0,063	6,58	24,76	10,98	6,73	9,48	10,55	9,11	10,45	7,19	31,04	10,29	12,50
Anzahl der Tests		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TRI-H (n =2)	< 0,09	6,90	24,60	11,00	5,25	9,20	8,60	8,50	9,15	6,95	32,90	10,85	12,15

6.3 Untersuchung der zurückgewonnenen Komponenten

6.3.1 der Bindemittel

Die Portionen der zurückgewonnenen Bindemittel von in der Regel etwa 50 bis 60 g wurden in luftdicht verpackten Schachteln aus einem mit wasserlöslicher Substanz beschichteten Papier, wird auch als Formtrennmittel verwendet, aufbewahrt. Für die Untersuchungen wird je eine Teilprobe aus den bis zu 17 Schachteln einer Serie nach Mengenbedarf entnommen, aufgeschmolzen, homogenisiert und untersucht.

Die Art und Anzahl der ermittelten Kennwerte, Merkmale und Eigenschaften wurden bereits unter Kap. 4.1 erläutert und für die Ausgangsbitumen sind diese in Tab. 2 bzw. in den Anlagen 4.1.1 bis 4.1.7 detailliert angeführt, für die zurückgewonnenen Bindemittel sind die Einzelwerte in den Anlagen 6.3.1.1 bis 6.3.1.12 enthalten.

Zusätzlich werden die zurückgewonnenen Bitumen der thermischen Beanspruchung im rotierenden Kolben RFT_{1000} unterworfen und eine Reihe von Kennwerten ermittelt.

In folgenden Abb. 54 bis 70 und Tab. 29 bis 32 sind die Eigenschaften der zurückgewonnenen Bitumen den Ausgangsbitumen gegenübergestellt. Für die aus Asphalten mit Asphaltgranulatzusatz versehenen Varianten (Nr. 1220 Abi 0/16, Nr. 1223 Abi 0/16 und Nr. 1225 Abi 0/22 S) werden je nach Anteil der Granulate und dessen festgestellten mittleren löslichen und wirksamen /26/27/28/ Bindemittelgehalt $B_{lös,W}$

AG 1 mit 20 M.-% und $B_{lös,W} = 6{,}75$ M.-%

AG 2 mit 25 M.-% und $B_{lös,W} = 5{,}14$ M.-% und

AG 3 mit je 25 M.-% und $B_{lös,W} = 4{,}59$ M.-%

fiktive bzw. hypothetische „Ausgangsbitumen", welche sowohl in den Abbildungen als auch Tabellen besonders gekennzeichnet sind, angenommen. Es wird generell linear harmonisch gemittelt.

Die Nadelpenetration wird bei 25 °C und zusätzlich bei 40 ° C für die Ausgangsbitumen und die zurückgewonnenen Bitumen bestimmt.

Aus den Abb. 54 bis 55 ist erkennbar eine Konsistenzzunahme, das Absinken der Penetration bei den aus Mischgut zurückgewonnenen Bindemitteln im Vergleich zum Ausgangsbitumen. Gleichartig verhalten sich die Ergebnisse bei zusätzlicher thermischer Beanspruchung der zurückgewonnenen Bitumen nach DIN EN 12607-3.

Aus den bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelten Penetrationen (Abb. 56 bei 40 °C) ergibt sich die Möglichkeit, auch den Penetrationsindex $I_{P,Pen}$ außer $I_{P,EP}$ (vgl. Kap, 4.1, Gl. 19 und 20) zu bestimmen, der in Abb. 57 für alle Mischgüter und Asphaltgranulate dargestellt ist, wiederum im Vergleich zum Ausgangsbitumen. In der Regel liegen die an

zurückgewonnenen Bitumen ermittelten $I_{P,Pen}$ höher als die des entsprechenden Ausgangsbitumens.

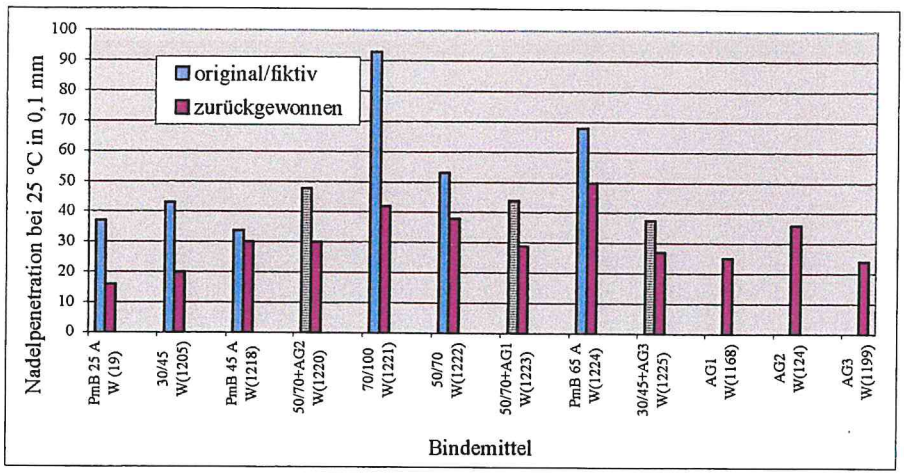


Abb. 54: Nadelpenetration bei 25 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bitumen im Vergleich zum Ausgangsbitumen

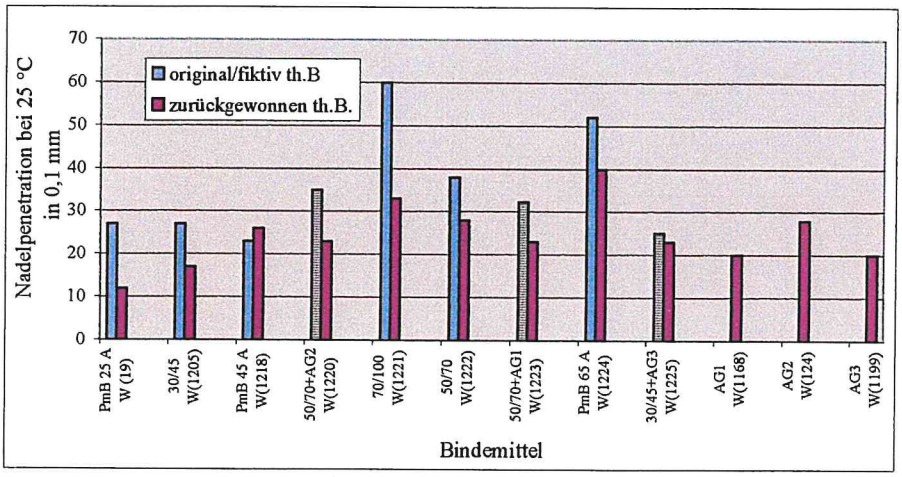


Abb. 55: Nadelpenetration bei 25 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bitumen im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

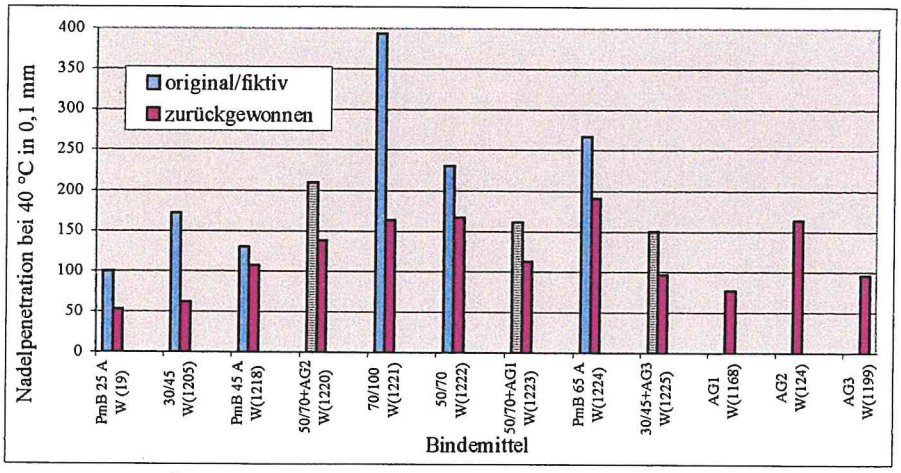


Abb. 56: Nadelpenetration bei 40 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bitumen im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Die zurückgewonnenen polymermodifizierten Bindemittel und die zugehörigen Ausgangsbitumen zeichnen sich durch positivere Penetrationsindizes aus im Vergleich zu den untersuchten Straßenbaubitumen.

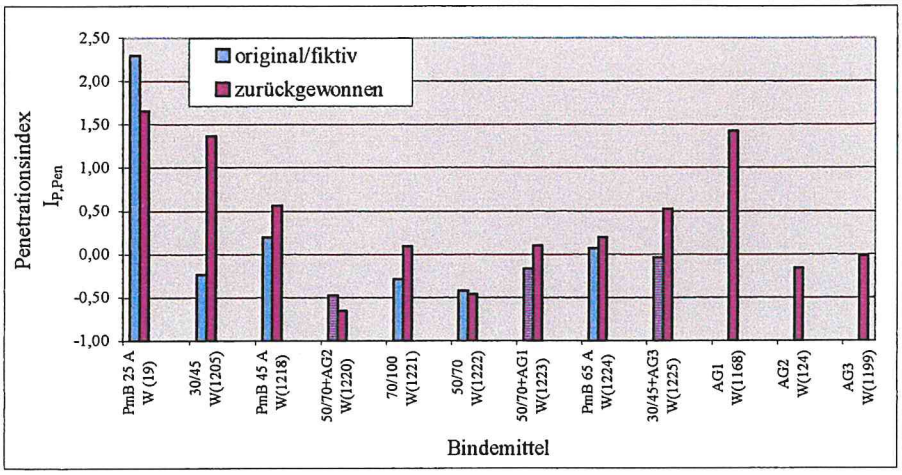


Abb. 57: Penetrationsindex $I_{P,Pen}$ der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

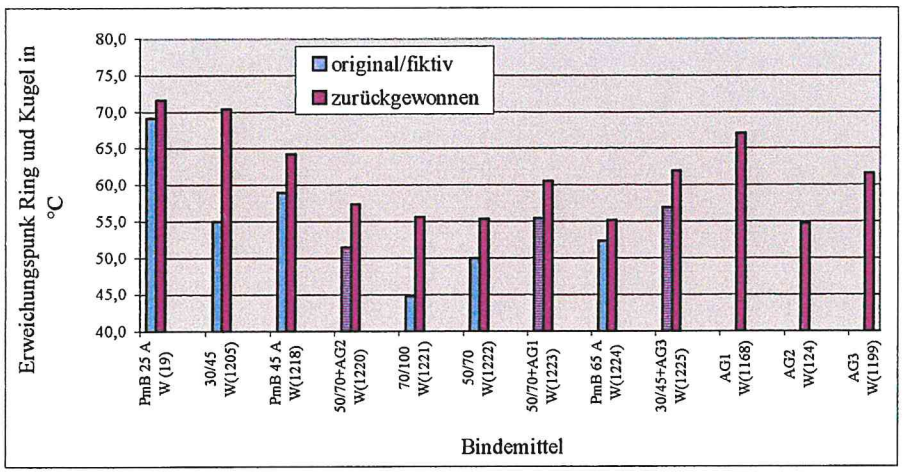


Abb.58: Erweichungspunkt Ring und Kugel der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

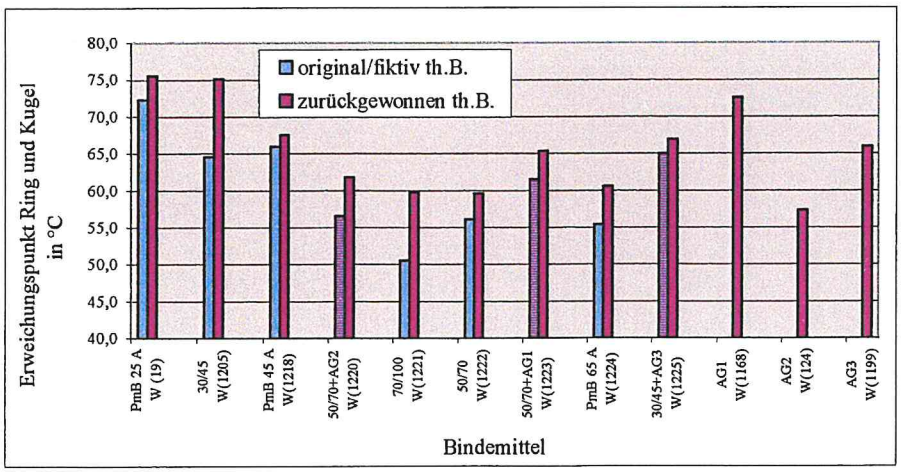


Abb.59: Erweichungspunkt Ring und Kugel der aus Mischgütern (Asphaltgranulat) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bitumen im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

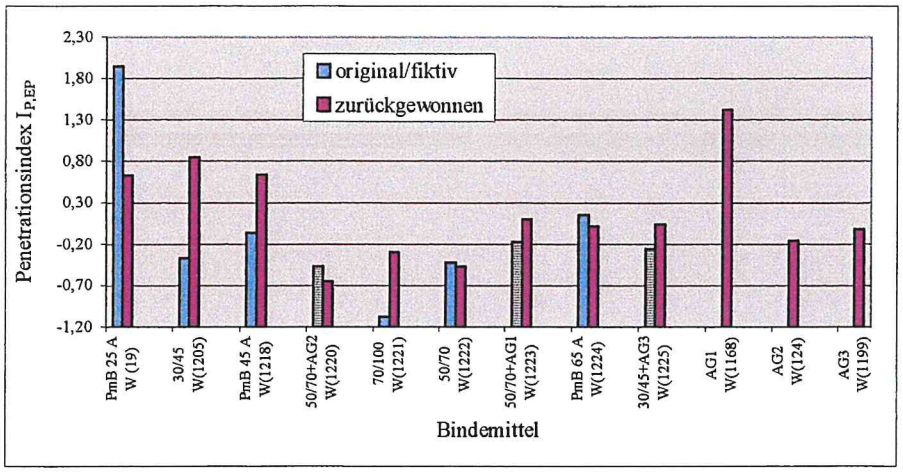


Abb. 60: Penetrationsindex $I_{P,EP}$ der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

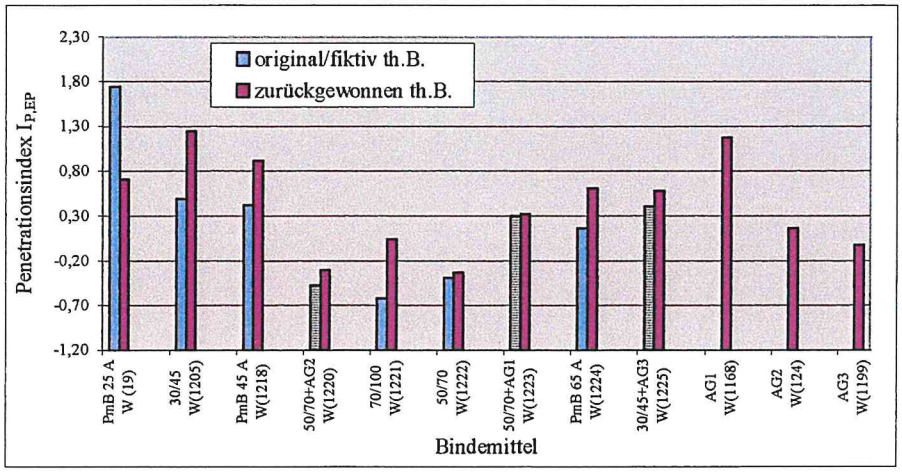


Abb. 61: Penetrationsindex $I_{P,EP}$ der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Die Erweichungspunkte Ring und Kugel liegen bei den zurückgewonnenen Bitumen stets mehr oder weniger höher, wobei der im Mischgut enthaltene Mineralstoff die Höhe der Zunahme beeinflussen könnte. Die EP RuK der zusätzlich thermisch beanspruchten Bitumen (original sowie fiktiv und zurückgewonnen) liegen insgesamt auf einem höheren Niveau (vgl. Abb. 58, 59).

In den Abb. 60, 61 sind die mit Hilfe der Näherung von Pfeiffer Doormaal berechneten Penetrationsindizes dargestellt (vgl. Kap 4.1 Gl. 20), beruhend auf der Hypothese, daß die Nadelpenetration am Erweichungspunkt Ring und Kugel 800 0,1 mm beträgt.

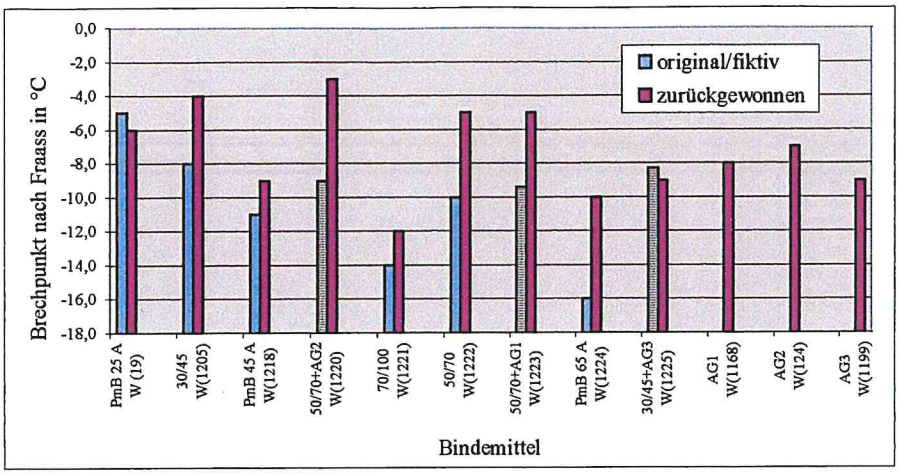


Abb. 62: Brechpunkt nach Fraass der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Die Brechpunkte der zurückgewonnenen Bitumen liegen in der Regel bei höheren positiveren Werten im Vergleich zum Ausgangsbitumen, was für eine Verhärtung beim Mischprozeß und ggf. den nicht völlig auszuschließenden Beanspruchungen beim Rückgewinnungsverfahren spricht.

Inhomogenitäten, welche durch unzureichende Abtrennung der mehlfeinen Mineralstoffe zustande gekommen sein könnten, sind auszuschließen, wie aus Abb. 63 hervorgeht.

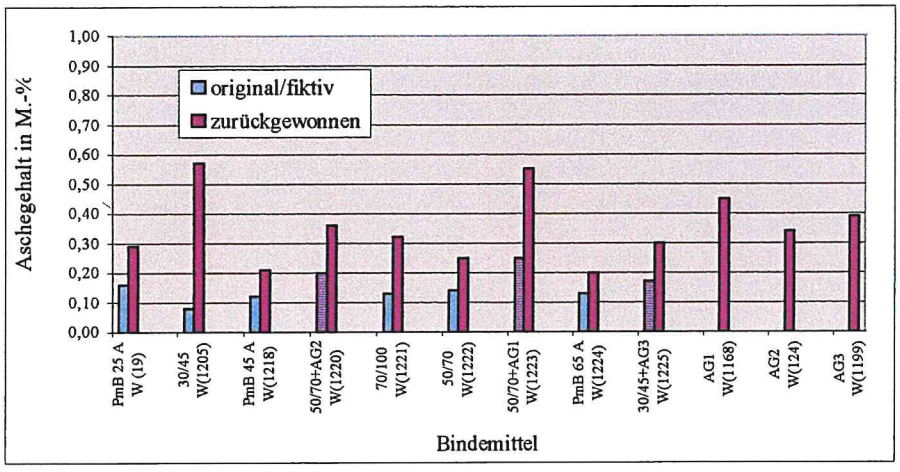


Abb. 63: Aschegehalte der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Die Aschegehalte der zurückgewonnenen Bindemittel liegen im Vergleich zu den Anforderungen nach DIN 1996 T.6 Abschnitt 7.8 von < 1,0 M.-% deutlich niedriger. Nur zweimal treten Aschegehalte über 0,5 M.-% auf und zwar bei aus Gußasphalt 0/11 S und aus gußasphalthaltigem (AG 1) Asphaltbinder 0/16 zurückgewonnenen Bitumen.

Die komplexen Schubmoduli der zurückgewonnenen Bitumen, Straßenbaubitumen und PmB nehmen nach der Rückgewinnung vergleichsweise zu.

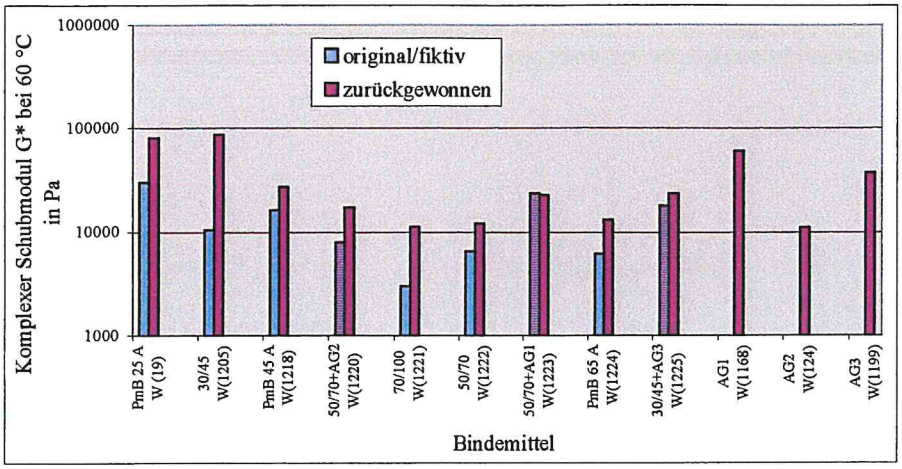


Abb. 64: Komplexer Schubmodul G* bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

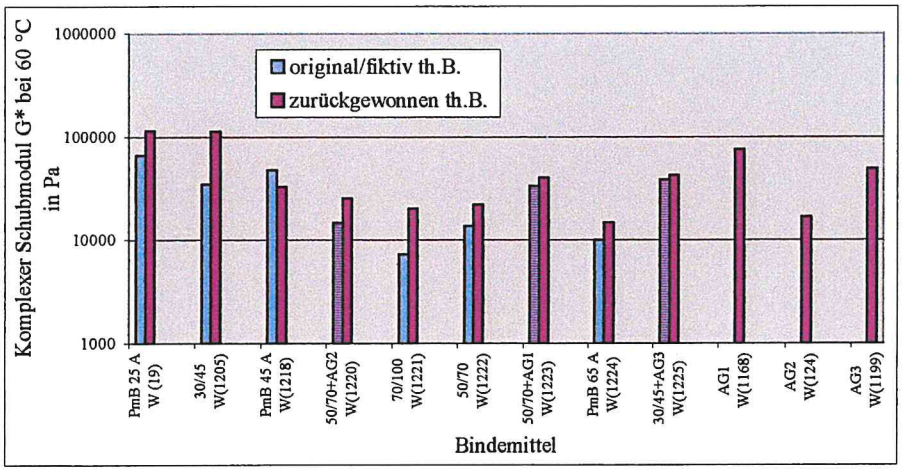


Abb. 65: Komplexer Schubmodul G* bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Die komplexen Schubmoduli der Straßenbaubitumen liegen in der Regel (Ausnahme Bitumen 30/45) deutlich niedriger als die der polymermodifizierten. Die Niveauunterschiede aus Abb. 64 und 65 sind ersichtlich. Die thermische Beanspruchung erhöht den komplexen Schubmodul.

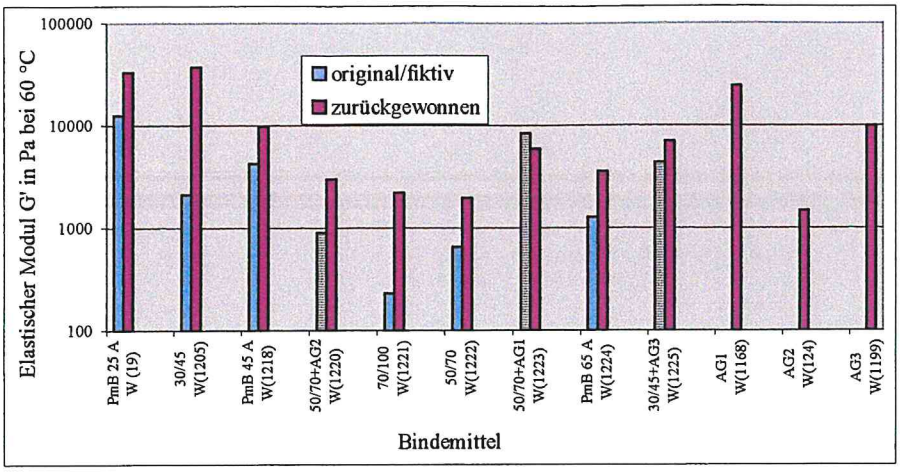
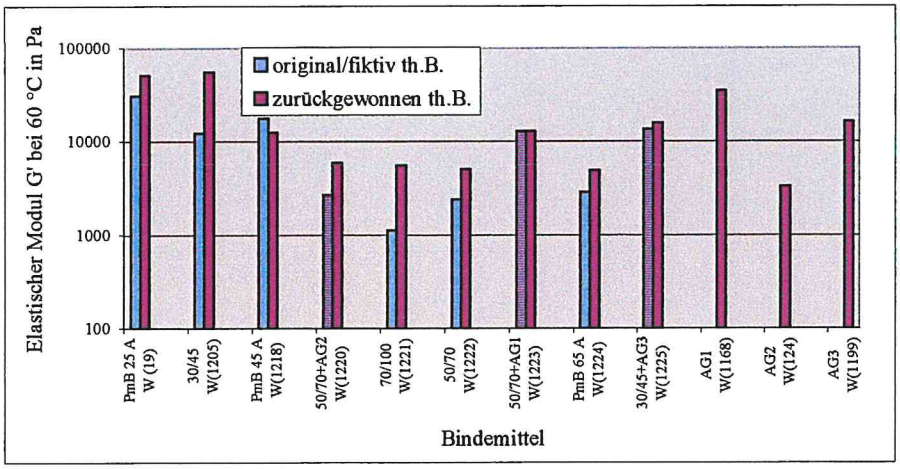


Abb. 66: Elastischer Modul (Speichermodul) G‘ bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 67: Elastischer Modul (Speichermodul) G‘ bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphalt-



granulaten) zurückgewonnenen thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

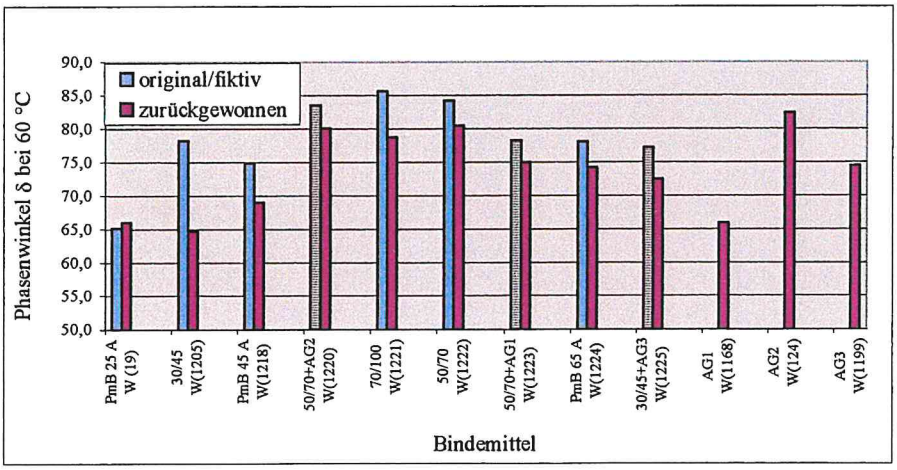


Abb. 68: Phasenwinkel δ bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

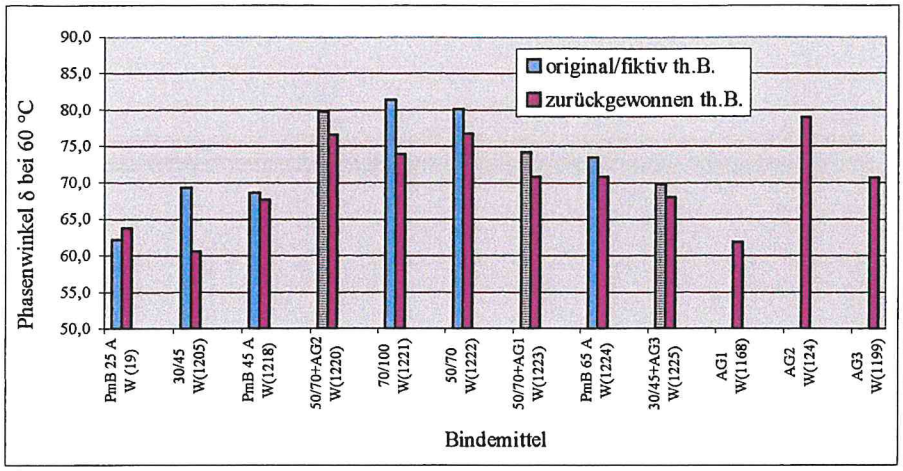


Abb.69: Phasenwinkel δ bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

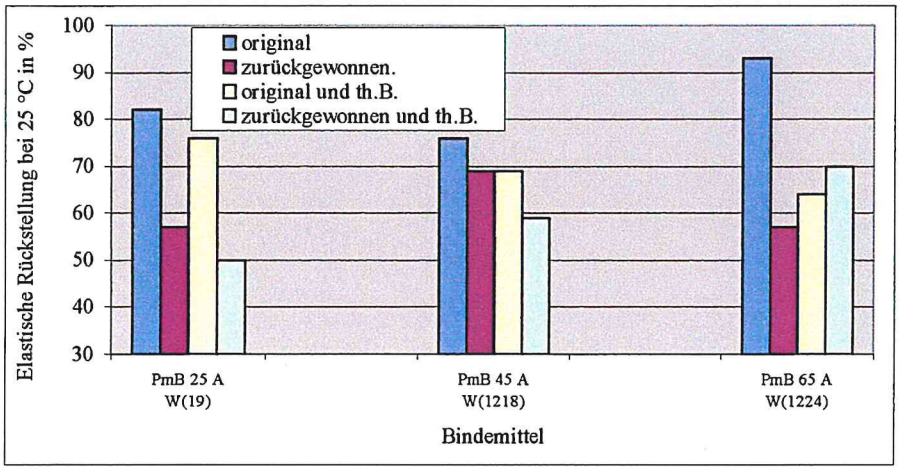


Abb. 70: Elastische Rückstellung von polymermodifizierten Bitumen – Vergleich zwischen Ausgangsbitumen und aus Mischgut zurückgewonnenen Bitumen sowie den thermisch beanspruchten Bindemitteln

Bei den untersuchten Bindemitteln PmB 25 A, PmB 45 A und PmB 65 A tritt bei Rückgewinnung aus Asphaltbinder 0/16 S aus MA 1 (Nr. 19) bzw. SMA 0/11 S aus MA 2 (Nr. 1218) und SMA 0/8 S einer großen Labormischung (Nr. 1224) kein wesentlicher Verlust der elastischen Rückstellung ein, wie aus Abb. 70 hervorgeht.

Tab. 29: Bindemittelkennwerte von drei aus Asphalten zurückgewonnenen Bitumen: GA 0/11 S, Abi 0/22 S mit AG 3 und AB 0/11 S

Kennwert/Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus GA 0/11 S (Nr. 1205)		Bitumen aus Abi 0/22 S mit 25 M.-% AG 3 (Nr. 1225)			Bitumen aus AB 0/11 S (Nr. 1221)	
			original 30/45 (Nr. 934)	zurück-gewonnen	**Hypothetisches Ausgangs-bitumen: 30/45+ AG 3-Bitumen** 71,7 M.-%+28,3 M.-%	aus AG 3 zurückge-wonnenes Bitumen	zurück-gewonnen aus Nr. 1225	original 70/100 (Nr. 1013)	zurück-gewonnen aus Nr. 1221
Nadelpenetration 25 °C 40 °C	DIN EN 1426	0,1 mm	43 172	20 62	37,6 150,5	24 96	27 97	93 394	42 164
Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK	DIN EN 1427	°C	55,0	70,4	56,9	61,6	62,0	44,8	55,6
Penetrationsindex $I_{P,EP}$	DIN EN 12591 Anhang B mod.		- 0,37	+ 0,85	- 0,26	- 0,26	+ 0,04	-1,07	- 0,30
Penetrationsindex $I_{P,Pen}$			- 0,23	+ 1,37	- 0,03	- 0,02	+ 0,52	-0,29	+ 0,09
Brechpunkt nach Fraaß	DIN EN 12593	°C	- 8	- 4	- 8,3	- 9	- 9	- 14	- 12
Plastizitätsspanne		K	63,0	74,4	65,2	70,6	61,8	58,8	67,6
Duktilität	DIN 52013	cm	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) >100	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) 10	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) > 87,3	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) 55	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) 48	(bei 7°C) >100 (bei 25 °C)	(bei 7°C) 0 Sprödbruch (bei 25 °C) >100
Dichte 25 °C 40 °C 60 °C	DIN EN ISO 3838	g/cm³	1,031 1,019 -	1,032 1,023 1,017	1,033 1,022 -	1,040 1,031 0,016	1,036 1,026 1,013	1,017 1,006 -	1,019 1,010 0,995
Volumenausdehnungs-koeffizient		K^{-1}	7,85 e-04	5,87 e-04	7,28 e-04 (7,18 e-4)	5,82 e-04	6,50 e-04	7,29 e-04	5,94 e-04
elastische Rückstellung 25 °C	DIN V 52021 T.1	%	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
Stabilität gegen Entmischung nach Heißlagerung Differenz der EP RuK	TL PmB 2001 Anhang A DIN EN 1427	°C oben °C unten K	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
Aschegehalt	DIN 52 005	M.-%	0,08	0,57	0,17	0,39	0,30	0,13	0,32
Untersuchung im DSR 60 °C G* komplexer Schubmodul δ Phasenwinkel G' elastischer Modul G'' viskoser Modul η* komplexe Viskosität γ Deformation	TL PmB 2001 Anhang C AASHTO TP 5	 Pa ° Pa Pa Pa·s	 10 395 78,2 2 125 10 163 1 036 11,56 e-03	 87 289 64,7 37 512 77 515 8 590 1,38 e-03	 18 104 77,2 4 375 17 132 1 799 9,19 e-03	 37 674 74,5 10 024 36 101 3 736 3,19 e-03	 23 698 72,5 7 118 22 643 2 368 5,07 e-03	 3 016 85,7 230 3 029 303 39,87 e-03	 11 311 78,8 2 227 11 122 1 131 10,62 e-03

Fortsetzung von Tab. 29

Kennwert/Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus GA 0/11 S (Nr. 1205)		Bitumen aus Abi 0/22 S mit 25 M.-% AG 3 (Nr. 1225)			Bitumen aus AB 0/11 S (Nr. 1221)	
			original 30/45 (Nr. 934)	zurück-gewonnen	**Hypothetisches Ausgangs-bitumen: 30/45+ AG 3 Bitumen** 71,7 M.-%+28,3 M.-%	aus AG 3 zurückge-wonnenes Bitumen	zurück-gewonnen aus Nr. 1225	original 70/100 (Nr. 1013)	zurück-gewonnen aus Nr. 1221
Kraftduktilität Formänderungsarbeit bis Mindestduktilität Maximale Kraft Maximaler Weg	TL PmB 2001 Anhang B unter Berücksichtigung von pr EN 13589	 J N cm	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
Massenänderung unter Einfluß von Wärme und Luft bei (th. B.) 163 °C	DIN EN 12607-3	M.-%	+ 0,01	- 0,08	- 0,03	- 0,14	- 0,06	+ 0,05	- 0,09
Nadelpenetration nach th. B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN EN 1426	0,1 mm	27	17	25	20	23	60	33
Änderung der Nadelpenetration auf		%	62,8	85,0	66,5	83,3	85,2	64,5	78,6
EP RuK nach th.B.	DIN EN 12607-3 DIN EN 1427	°C	64,6	75,2	65,0	66,0	67,0	50,6	59,8
Änderung des EP RuK um		K	9,6	4,8	8,1	4,4	5,0	5,8	4,2
Penetrationsindex $I_{P,EP}$ nach th. B.	DIN EN 12591 Anhang B		+ 0,50	+ 1,25	+ 0,41	+ 0,16	+ 0,58	- 0,62	+ 0,04
Duktilität nach th. B.	DIN EN 12607-3 DIN 52013	cm	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) 72	(bei 13°C) - (bei 25 °C) 7,3	bei 13°C) - (bei 25 °C) 55	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) 12	(bei 13 °C) - (bei 25 °C) 11	(bei 7°C) 19 (bei 25 °C) -	(bei 7°C) 0 Sprödbruch (bei 25 °C) >100
Elastische Rückstellung nach th.B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN V 52021 T.1	%	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
Untersuchung im DSR nach th.B. 60 °C G* komplexer Schubmodul δ Phasenwinkel G′ elastischer Modul G″ viskoser Modul η* komplexe Viskosität γ Deformation	DIN EN 12607-3 TL PmB 2001 Anhang C AASHTO TP 5	 Pa ° Pa Pa Pa·s	 34 811 69,4 12 290 32 671 3 482 3,45 e-03	 113 110 60,6 55 817 98 198 11 268 1,06 e-03	 38 985 69,8 13 450 36 696 3 899 3,16 e-03	 49 581 70,7 16 393 46 912 4 957 2,42 e-3	 42 883 68,1 15 949 39 693 4 267 2,80 e-03	 7 356 81,4 1 113 7 305 738 16,33 e-3	 20 490 74,0 5 581 19 594 2 032 5,86 e-03

Tab. 30: Bindemittelkennwerte von aus drei Asphalten zurückgewonnenen polymermodifizierten Bitumen: SMA 0/8 S, SMA 0/11 S und Abi 0/16 S

Kennwert/ Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus SMA 0/8 S (Nr. 1224)		Bitumen aus SMA 0/11 S (Nr. 1218)		Bitumen aus Abi 0/16 S (Nr. 19)	
			Original PmB 65 A (Nr. 1204)	zurück-gewonnen aus SMA 0/8	Original PmB 45 A (Nr. 953)	zurück-gewonnen aus SMA 0/11 S	Original PmB 25 A (Nr. 936)	zurück-gewonnen aus Abi 0/16 S
Nadelpenetration 25 °C 40 °C	DIN EN 1426	0,1 mm	68 267	50 191	34 130	30 107	37 100	16 53
Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK	DIN EN 1427	°C	52,4	55,2	59,0	64,2	69,2	71,6
Penetrationsindex $I_{P,EP}$	DIN EN 12591 Anhang B mod.		+ 0,16	+ 0,02	- 0,06	+ 0,64	+ 1,95	+ 0,63
Penetrationsindex $I_{P,Pen}$			+ 0,07	+ 0,20	+ 0,20	+ 0,56	+ 2,30	+ 1,66
Brechpunkt nach Fraaß	DIN EN 12593	°C	- 16	- 10	- 11	- 9	- 5	- 6
Plastizitätsspanne		K	68,4	65,2	70,0	73,2	74,2	77,6
Duktilität	DIN 52013	cm	(bei 13 °C) >100	(bei 13 °C) 90	(bei 25 °C) >100	(bei 25 °C) 46	(bei 25 °C) 50	(bei 25 °C) 13
Dichte 25 °C 40 °C 60 °C	DIN EN ISO 3838	g/cm³	1,019 1,008 -	1,021 1,010 1,005	1,034 - 1,009	1,020 *1,011* 0,998	1,024 - 0,994	1,038 *1,028* 1,018
Volumenausdehnungskoeffizient		K^{-1}	7,28 e-04	7,26 e-04	7,08 e-04	6,30 e-04	8,62 e-04	5,61 e-04
Elastische Rückstellung 25 °C	DIN V 52021 T.1	%	93	57	76	69	82	57
Stabilität gegen Entmischung nach Heißlagerung Differenz der EP RuK	TL PmB 2001 Anhang A DIN EN 1427	°C oben °C unten K	51,2 51,8 0,6	57,0 57,0 0,0	63,6 59,2 4,4	63,4 62,8 0,6	78,0 69,2 8,8	71,4 70,6 0,8
Aschegehalt	DIN 52 005	M.-%	0,13	0,20	0,12	0,21	0,16	0,29
Kraftduktilität Formänderungsarbeit bis Mindestduktilität Maximale Kraft Maximaler Weg	TL PmB 2001 Anhang B unter Berücksichtigung von pr EN 13589	 J N cm	(bei 13 °C) 1,95 11 >100	(bei 13 °C) 4,81 24 >100	(bei 25 °C) 0,51 5,3 >100	(bei 25 °C) 1,28 8 >100	(bei 25 °C) 1,63 17 64,4	(bei 25 °C) 2,71 28 42,2

Fortsetzung von Tab. 30

Kennwert/ Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus SMA 0/8 (Nr. 1224)		Bitumen aus SMA 0/11 S (Nr. 1218)		Bitumen aus Abi 0/16 S (Nr. 19)	
			Original PmB 65 A (Nr. 1204)	zurück-gewonnen aus SMA 0/8 S	Original PmB 45 A (Nr. 953)	zurück-gewonnen aus SMA 0/11 S	Original PmB 25 A (Nr. 936)	zurück-gewonnen aus Abi 0/16 S
Untersuchung im DSR 60 °C	TL PmB 2001							
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa	6 208	13 205	16 346	27 383	30 034	81 506
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°	78,1	74,2	74,9	69,0	65,2	66,1
G′ elastischer Modul		Pa	1 285	3 586	4 276	9 828	12 574	33 202
G″ viskoser Modul		Pa	6 096	12 653	15 770	25 614	27 149	74 954
η* komplexe Viskosität		Pa·s	622	1 312	1 630	2 737	2 984	8 177
γ Deformation			19,37 e-03	9,10 e-03	7,35 e-03	4,39 e-03	4,00 e-03	1,47 e-03
Massenänderung unter Einfluß von Wärme und Luft bei (th. B.) 163 °C	DIN EN 12607-3	M.-%	+ 0,02	- 0,03	+ 0,03	- 0,10	+ 0,02	- 0,16
Nadelpenetration nach th. B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN EN 1426	0,1 mm	52	40	23	26	27	12
Änderung der Nadelpenetration auf		%	76,5	80,0	67,6	86,7	73,0	75,0
EP RuK nach th.B.	DIN EN 12607-3 DIN EN 1427	°C	55,4	60,6	66,0	67,6	72,4	75,6
Änderung des EP RuK um		K	3,0	5,4	7,0	3,4	3,2	4,0
Penetrationsindex $I_{P,EP}$ nach th. B.	DIN EN 12607-3/DIN EN 12591, Anhang B		+ 0,16	+ 0,61	+ 0,42	+ 0,92	+ 1,75	+ 0,71
Duktilität nach th. B.	DIN EN 12607-3 DIN 52013	cm	(bei 13 °C) >100	(bei 13 °C) 52	(bei 25 °C) >100	(bei 25 °C) 24	(bei 25 °C) 41	(bei 25 °C) 8,6
Elastische Rückstellung nach th.B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN V 52021 T.1	%	64	70	69	59	76	50 (6 cm Fadenlänge)
Untersuchung im DSR nach th.B. 60 °C	DIN EN 12607-3 TL PmB 2001							
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa	10 152	14 883	48 066	32 914	67 427	115 450
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°	73,5	70,9	68,7	67,7	62,2	63,8
G′ elastischer Modul		Pa	2 887	4 957	17 660	12 563	30 952	50 971
G″ viskoser Modul		Pa	9 742	14 146	44 987	30 578	58 923	102 784
η* komplexe Viskosität		Pa·s	1 014	1 495	4 821	3 298	6 639	11 443
γ Deformation			11,84 e-03	8,07 e-03	2,50 e-03	3,65 e-03	1,78 e-03	1,04 e-03

Tab. 31: Bindemittelkennwerte von drei aus Asphalten zurückgewonnenen Bitumen: 3 Asphaltbinder 0/16 ohne und mit Asphaltgranulat

Kennwert/Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus Abi 0/16 (Nr. 1222)		Bitumen aus Abi 0/16 mit AG 2 (Nr. 1220)			Bitumen aus Abi 0/16 mit AG 1 (Nr. 1223)		
			original 50/70 (Nr. 970)	zurück-gewonnen	**Hypothetisches Ausgangsbitumen:** 50/70+ AG 2-Bitumen 68,8%+31,2%	aus AG 2 zurückgewonnenes Bitumen	zurückgewonnen aus Nr. 1220 25 M.-% AG 2	**Hypothetisches Ausgangsbitumen:** 50/70+ AG 1-Bitumen 67,8%+32,2%	aus AG 1 zurückgewonnenes Bitumen	zurückgewonnen aus Nr. 1223 20 M.-% AG 1
Nadelpenetration 25 °C 40 °C	DIN EN 1426	0,1 mm	53 231	38 167	47,7 210,1	36 164	30 138	44 181,4	25 77	29 113
Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK	DIN EN 1427	°C	50,0	55,4	51,5	54,8	57,4	55,5	67,0	60,6
Penetrationsindex $I_{P,EP}$	DIN EN 12591 Anhang B mod.		- 1,07	- 0,56	- 0,94	- 0,80	- 0,63	-0,21	+ 0,75	- 0,08
Penetrationsindex $I_{P,Pen}$			- 0,42	- 0,46	- 0,47	- 0,16	- 0,65	-0,17	+ 1,43	+ 0,10
Brechpunkt nach Fraaß	DIN EN 12593	°C	- 10	- 5	- 9	- 7	- 3	-9,4	- 8	- 5
Plastizitätsspanne		K	60,0	60,4	60,5	61,8	61,8	64,9	75,0	70,6
Duktilität	DIN 52013	cm	(bei 13 °C) >100 (bei 25 °C) >100.	(bei 13 °C) 11,3 (bei 25 °C) >100	(bei 13 °C) (bei 25 °C) >100	(bei 13 °C) n.b. (bei 25 °C) >100	(bei 13 °C) 5,3 (bei 25 °C) >100	(bei 13 °C) (bei 25 °C) >74	(bei 13 °C) n.b. (bei 25 °C) 19,4	(bei 13 °C) 7,0 (bei 25 °C) 55
Dichte 25 °C 40 °C 60 °C	DIN EN ISO 3838	g/cm³	1,025 1,013 -	1,027 1,019 *1,008*	1,026 1,015 -	1,029 1,018 *0,999*	1,027 1,018 *1,005*	1,026 1,015 -	1,028 1,018 *1,006*	1,025 1,018 *1,008*
Volumenausdehnungs-koeffizient		K^{-1}	7,90 e-04	5,23 e-04	7,68 e-04 (7,22 e-04)	7,20 e-04	5,89 e-04	7,46 e-04 (7,22 e-04)	6,55 e-04	4,58 e-04
elastische Rückstellung 25 °C	DIN V 52021 T.1	%	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	29	entfällt
Stabilität gegen Entmischung nach Heißlagerung Differenz der EP RuK	TL PmB 2001 Anhang A DIN EN 1427	°C oben °C unten K	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	69,6 70,0 0,4	entfällt
Aschegehalt	DIN 52 005	M.-%	0,14	0,25	0,20	0,34	0,36	0,25	0,48	0,55
Kraftduktilität Formänderungsarbeit bis Mindestduktilität Maximale Kraft Maximaler Weg	TL PmB 2001 Anhang B unter Berücksichtigung von pr EN 13589	 J N cm	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	bei 25 °C 1,361 17 37,6	entfällt

Fortsetzung von Tab. 31

Kennwert/Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus Abi 0/16 (Nr. 1222)		Bitumen aus Abi 0/16 mit AG 2 (Nr. 1220)			Bitumen aus Abi 0/16 mit AG 1 (Nr. 1223)		
			original 50/70 (Nr. 970)	zurück-gewonnen	**Hypothetisches Ausgangsbitumen:** 50/70+ AG 2-Bitumen 68,8 %+31,2%	aus AG 2 zurückgewonnenes Bitumen	zurückgewonnen aus Nr. 1220 25 M.-% AG 2	**Hypothetisches Ausgangsbitumen:** 50/70+ AG 1-Bitumen 67,8%+32,2%	aus AG 1 zurückgewonnenes Bitumen	zurückgewonnen aus Nr. 1223 20 M.-% AG 1
Untersuchung im DSR 60 °C	TL PmB 2001									
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa	6 536	12 122	7 935	11 134	17 325	23 881	60 513	22 750
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°	84,2	80,5	83,6	82,4	80,1	78,3	65,9	75,0
G' elastischer Modul		Pa	665	1 994	913	1 479	3 004	8 365	24 597	5 922
G'' viskoser Modul		Pa	6 453	11 961	7 850	11 023	17 086	22 189	55 412	22 071
η* komplexe Viskosität		Pa·s	647	1 210	789	1 110	1 730	2 383	6 047	2 279
γ Deformation			18,38 e-03	9,91 e-03	16,11 e-03	10,78 e-03	6,93 e-03	13,19 e-03	1,98 e-03	5,28 e-03
Massenänderung unter Einfluß von Wärme und Luft (th. B.)	DIN EN 12607-3	M.-%	+ 0,03	- 0,16	- 0,05	- 0,22	- 0,18	- 0,01	- 0,08	- 0,12
Nadelpenetration nach th. B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN EN 1426	0,1 mm	38	28	34,9	28	23	32,2	20	23
Änderung der Penetration auf		%	71,7	73,7	73,2	77,8	76,7	73,2	80	79,3
EP RuK nach th.B.	DIN EN 12607-3 DIN EN 1427	°C	56,2	59,6	56,6	57,4	61,8	61,5	72,6	65,4
Änderung des EP RuK um		K	6,2	4,2	5,1	2,6	4,4	6,0	5.6	4,8
Penetrationsindex $I_{P,EP}$ nach th. B.	DIN EN 12591 Anhang B		- 0,39	- 0,33	- 0,48	- 0,76	- 0,30	+ 0,30	+ 1,18	+ 0,32
Duktilität nach th. B.	DIN EN 12607-3 DIN 52013	cm	(bei 13 °C) 24 (bei 25 °C) >100	(bei 13°C) 6,8 (bei 25 °C) >100	bei 13°C) (bei 25 °C) >100	(bei 13 °C) n.b. (bei 25 °C) >100	(bei 13 °C) 4,1 (bei 25 °C) 39	(bei 13 °C) (bei 25 °C) >70,5	(bei 13 °C) n.b. (bei 25 °C) 8,4	(bei 13 °C) 4,4 (bei 25 °C) 39
Elastische Rückstellung nach th. B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN V 52021 T.1	%	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	36 (6 cm Fadenlänge)	entfällt
Untersuchung im DSR nach th.B. 60 °C	DIN EN 12607-3 TL PmB 2001									
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa	13 813	22 027	14 703	16 973	25 595	33 459	75 121	40 016
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°	80,1	76,8	79,8	79,0	76,7	74,2	61,9	70,9
G' elastischer Modul		Pa	2 418	5 042	2 679	3 294	5 904	13 002	35 324	13 053
G'' viskoser Modul		Pa	13 585	21 434	14 558	16 702	24 964	30 522	66 183	37 806
η* komplexe Viskosität		Pa·s	1 384	2 196	1 477	1 699	2 559	3 342	7 483	3 988
γ Deformation			8,69 e-03	5,45 e-03	8,25 e-03	7,07 e-3	4,69 e-03	6,47 e-3	1,60 e-03	3,00 e-03

Tab. 32: Bindemittelkennwerte von drei aus Asphaltgranulaten zurückgewonnenen Bitumen: AG 1, AG 2, AG 3

Kennwert/ Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus Asphaltgranulat AG 1 von 2000 (Nr.1168)		Bitumen aus Asphaltgranulat AG 2 von vor 1989 (Nr. 124)		Bitumen aus Asphaltgranulat AG 3 von 1991/94 (Nr.1199)	
			original PmB 45 A	zurück-gewonnen aus AG1	original unbekannt Straßen-baubitumen	zurück-gewonnen aus AG 2	original 50/70 (B65)	zurück-gewonnen aus AG 3
Nadelpenetration 25 °C 40 °C	DIN EN 1426	0,1 mm		25 77		36 164		24 96
Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK	DIN EN 1427	°C		67,0		54,8		61,6
Penetrationsindex $I_{P,EP}$	DIN EN 12591 Anhang B mod.			+ 0,75		- 0,80		- 0,26
Penetrationsindex $I_{P,Pen}$				+ 1,43		- 0,16		- 0,02
Brechpunkt nach Fraaß	DIN EN 12593	°C		- 8		- 7		- 9
Plastizitätsspanne		K		75,0		61,8		70,6
Duktilität	DIN 52013	cm		(bei 25 °C) 19,4		(bei 25 °C) >100		(bei 25 °C) 55
Dichte 25 °C 40 °C 60 °C	DIN EN ISO 3838	g/cm³		1,028 1,018 1,006		1,029 1,016 0,999		1,040 1,031 1,016
Volumenausdehnungskoeffizient		K^{-1}		6,25 e-04 6,55 e -04		8,58 e-04 7,20 e -04		6,75 e-04 5,82 e -04
Elastische Rückstellung 25 °C	DIN V 52021 T.1	%		29		entfällt		entfällt
Stabilität gegen Entmischung nach Heißlagerung Differenz der EP RuK	TL PmB 2001 Anhang A DIN EN 1427	°C oben °C unten K		69,6 70,0 0,4		entfällt		entfällt
Aschegehalt	DIN 52 005	M.-%		0,45		0,34		0,39
Kraftduktilität Formänderungsarbeit bis Mindestduktilität Maximale Kraft Maximaler Weg	TL PmB 2001 Anhang B unter Berücksichtigung von pr EN 13589	 J N cm		(bei 25 °C) 1,361 17 37,6		entfällt		entfällt

Fortsetzung von Tab. 32

Kennwert/ Merkmal/ Eigenschaft	Prüfung nach	Einheit	Bitumen aus Asphaltgranulat von 2000 (Nr.1168)		Bitumen aus Asphaltgranulat von vor 1989 (Nr. 124)		Bitumen aus Asphaltgranulat von 1991/94 (Nr.1199)	
			original PmB 45 A	zurück-gewonnen aus AG1	original unbekannt Straßen-baubitumen	zurück-gewonnen aus AG 2	original 50/70 (B65)	zurück-gewonnen aus AG 3
Untersuchung im DSR 60 °C	TL PmB 2001							
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa		60 513		11 134		37 674
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°		65,9		82,4		74,5
G′ elastischer Modul		Pa		24 597		1 479		10 024
G″ viskoser Modul		Pa		55 412		11 023		36 101
η* komplexe Viskosität		Pa·s		6 047		1 110		3 736
γ Deformation				1,98 e-03		10,78 e-03		3,19 e-03
Massenänderung unter Einfluß von Wärme und Luft bei (th. B.) 163 °C	DIN EN 12607-3	M.-%		- 0,08		- 0,20		- 0,14
Nadelpenetration nach th. B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN EN 1426	0,1 mm		20		28		20
Anderung der Nadelpenetration auf		%		80,0		77,8		83,3
EP RuK nach th.B.	DIN EN 12607-3 DIN EN 1427	°C		72,6		57,4		66,0
Änderung des EP RuK um		K		5,6		2,6		4,4
Penetrationsindex $I_{P,EP}$ nach th. B.	DIN EN 12591 Anhang B			+ 1,18		- 0,76		+ 0,16
Duktilität nach th. B.	DIN EN 12607-3 DIN 52013	cm		((bei 25 °C) 8,4		(bei 25 °C) >100		(bei 25 °C) 12,0
Elastische Rückstellung nach th.B. 25 °C	DIN EN 12607-3 DIN V 52021 T.1	%		36 (6 cm Fadenlänge)		entfällt		entfällt
Untersuchung im DSR nach th.B. 60 °C	DIN EN 12607-3 TL PmB 2001							
G* komplexer Schubmodul	Anhang C	Pa		75 121		16 973		49 581
δ Phasenwinkel	AASHTO TP 5	°		61,9		79,0		70,7
G′ elastischer Modul		Pa		35 324		3 294		16 393
G″ viskoser Modul		Pa		66 183		16 702		46 912
η* komplexe Viskosität		Pa·s		7 483		1 699		4 957
γ Deformation				1,60 e-03		7,07 e-03		2,42 e-03

Außer den in den Abb. 54 bis 70 dargestellten Kennwerten wurden die destruktiven Duktilitäten nach DIN 52 013 (Anlage 6.3.1.13) bei der für die jeweilige Sorte zutreffenden Prüftemperatur bestimmt. Die zurückgewonnenen Bindemittel wurden bei der für das Ausgangsbitumen zutreffenden Temperatur untersucht wie auch bei der Temperatur, welche sich aus ihrer penetrationsbezogenen potentiellen Einstufung ergab. Diese Einstufung führte für die zurückgewonnenen Bindemittel in vier Fällen zur Einstufung in die Ausgangssorte (Nr. 19 mit PmB 25 A; Nr. 1218 mit PmB 45 A; Nr. 1224 mit PmB 65 A und Nr. 1168 PmB 45 A). Eine Einstufung in die nächst härtere Sorte trat bei den zurückgewonnenen Bitumen aus sechs Asphalten (Nr. 1205 mit 30/45; Nr. 1220 mit 50/70 und AG 1-Bitumen; Nr. 1222 mit 50/70; Nr. 1223 mit 50/70 + AG 3-Bitumen; Nr. 1225 mit 30/45 + AG 3-Bitumen und AG 3 mit ehemals Bitumen B 65 bzw. 50/70) ein. Nur in einem Falle ist das aus Nr. 1221 mit 70/100 zurückgewonnene Bitumen um zwei Sorten härter einzustufen. Das zurückgewonnene Bitumen aus Asphaltgranulat AG 2 (Nr. 124) unbekannter Herkunft wird penetrationsbezogen als Bitumen 30/45 betrachtet.

Die zurückgewonnenen Bitumen sind stets durch niedrigere Duktilitäten charakterisiert.

Die „sortenbeibehaltenden" zurückgewonnenen polymermodifizierten Bitumen wurden bezüglich ihrer Kraftduktilitatät (Anlage 6.3.1.13), der Formänderungsarbeit bei Mindestduktiliät, der maximalen Kraft und des maximalen Weges bei 13 °C (PmB 65 A) und bei 25 °C (PmB 45 A und PmB 25 A) untersucht und den entsprechenden Werten der Ausgangsbitumen gegenübergestellt. Sowohl die Formänderungsarbeit als auch die maximale Kraft nehmen zu. Die Ausziehlänge, welche nur bei PmB 25 A < 100 cm war, vermindert sich beim zurückgewonnenen Bitumen.

In der Anlage 6.3.1.14 sind die Dichten bei unterschiedlichen Temperaturen, die Volumenausdehnungskoeffizienten β und die Aschegehalte der zurückgewonnenen Bitumen den Ausgangsbitumen gegenübergestellt. Die Volumenausdehnungskoeffizienten, in unterschiedlichen Temperaturbereichen, 25 °C/60 °C und 25 °C/40 °C bestimmt, unterscheiden sich in der Mehrheit der Fälle und zeigen bei den zurückgewonnenen Bitumen uneinheitliches Verhalten. Sie liegen insgesamt im Bereich von $4{,}21 * 10^{-4}\ K^{-1}$ bis $8{,}58 * 10^{-4}\ K^{-1}$. Für die Ausgangsbitumen, welche nur in der Temperaturspanne 25 °C/40 °C getestet wurden, ergeben sich wesentlich einheitlichere Werte zwischen $7{,}08 * 10^{-4}\ K^{-1}$ und $8{,}62 * 10^{-4}\ K^{-1}$ bzw. $7{,}90 * 10^{-4}\ K^{-1}$. Ob die zwar geringfügige Zunahme des Aschegehaltes dabei eine Rolle spielt, ist nicht gesichert. Die im Mittel niedrigeren Ausdehnungskoeffizienten deuten zwar darauf hin.

6.3.2 der extrahierten Mineralstoffe

Die vom Bindemittel befreiten und in Kornklassen gesiebten Mineralstoffe der jeweils 10 bis 17 Chargen der mit Toluol durch Kaltextraktion extrahierten Mischgüter wurden einzeln gesammelt. Die mit Trichlorethylen und Heißextraktion gewonnenen Mineralstoffe wurden gesondert gelagert und nicht für die Untersuchung der Rohdichte berücksichtigt.

Erstere wurden staubfrei in Plasttüten verpackt. Nachdem die Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes abgeschlossen waren, wurden die einzelnen Kornklassen der n Extraktionen aus einem Mischgut stammend, vereinigt. Anschließend wurden sie gemäß der mittleren Korngrößenverteilung (vgl. Tab. 28) zusammengesetzt.

Entsprechend der Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens sind die extrahierten Mineralstoffgemische durch ihre Rohdichte zu charakterisieren.

Die Rohdichte $\rho'_{R,M}$ der Mineralstoffe einschließlich der „anhaftenden Bindemittelbestandteile" wird nach DIN 52 102, wie das in DIN 1996 T.7, Abschn. 7.1.2 festgelegt ist, mehrfach ermittelt. Frühere Untersuchungen hatten ergeben, daß eine Bestimmung dieser Rohdichte mit der Prüfflüssigkeit Wasser zu wesentlich niedrigeren Werten führt. Es wurde auf die Hydrophobierung der Mineralstoffoberflächen zurückgeführt.

Des weiteren wurde die Untersuchung mit der Prüfflüssigkeit Toluol und Trichlorethylen durchgeführt. Es wurden höhere Werte, die denen der nicht mit Bitumen in Kontakt getretenen Mineralstoffe entsprachen, ermittelt.

Ein Beispiel soll das belegen.

Laut Eignungsprüfung beträgt die Rohdichte des Mineralgemisches eines Asphaltes (vorwiegend Grauwacke) $\rho_{R,M} = 2{,}724$ g/cm³. Die Dichtebestimmung mit Wasser ergab einen mittleren Wert von 2,593 g/cm³. Mit Trichlorethylen wurde quasi übereinstimmend mit dem Ausgangswert der nicht mit Bitumen in Kontakt getretenen frischen Mineralstoffe für $\rho'_{R,M}$ 2,726 g/cm³ festgestellt. Der mit Toluol ermittelte Wert lag etwas niedriger bei 2,713 g/cm³.

Allein aus nur praktischen Gründen, nämlich dem Vorhandensein einer automatischen Rückdestillationsanlage, wurde als Prüfflüssigkeit zur Bestimmung der Rohdichte $\rho'_{R,M}$ für die aus den zwölf Praxisgemischen stammenden Mineralstoffgemische Trichlorethylen gewählt.

Das Ergebnis war beeindruckend. Die ehemals mit Toluol (kalt) erschöpfend bis zur Farblosigkeit des Lösemittels extrahierten Mineralstoffe verfärbten die Prüfflüssigkeit Trichlorethylen zumindest kaffeebraun oder auch dunkler. Das bedeutet, daß noch Bitumenanteile auf und in der Mineralstoffoberfläche zurückgehalten werden, welche mit dem

Lösemittel Trichlorethylen sogar im kalten Zustand gelöst werden. Möglicherweise würde bei einer angeschlossenen Heißextraktion die Farbtiefe noch zunehmen.

Diese mehr oder weniger zufällige Erkenntnis wird andersweitig bestätigt.

Die unter 6.2.1.1 bis 6.2.1.14 experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehalte $B_{unl,exp,korr,A}$ für die Heißextraktionen mit Trichlorethylen (auch die nur zwei Varianten mit Kaltextraktion durch Trichlorethylen, vgl. 6.2.1.2 und 6.2.1.3) waren stets, wenn auch maximal auf zwei vollständigen Untersuchungen bzw. Extraktionen beruhend, niedriger als die bei der Kaltextraktion mit Toluol bei mehrfacher Wiederholung (mindestens 10 Extraktionen) bestimmten Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt.

Wenn die Überlegungen von Horan /26/27/28/ (Kap. 2.3) berücksichtigt werden, könnte man einen Zusammenhang mit den drei Mineralstoffdichten G_{sb}, G_{sa} und G_{sa} annehmen. Die bulk-(Raum)-Dichte G_{sb}, entspricht möglicherweise der mit Wasser bestimmten Rohdichte $\rho'_{R,M}$. Die mit Toluol bestimmte Rohdichte, vorausgesetzt, es wurde auch mit Toluol extrahiert, könnte ggf. der wirksamen effective Dichte G_{sa} entsprechen. Die mit Trichloethylen ermittelte Dichteder vom Bindemittel befreiten Mineralstoffe, welche der mit Wasser bestimmten im Ausgangszustand der Mineralstoffe entspricht, wäre dann der höchsten der drei Rohdichtevarianten, der scheinbaren apparent Dichte G_{sa}, zuzuordnen.

Die Rohdichten der extrahierten Mineralstoffe $\rho'_{R,M}$ wurden dreifach bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 33 angeführt.

Nur für Asphaltbinder 0/16 S (Nr. 19) als einzige Ausnahme wurde die Dichte der frischen Mineralstoffe $\rho_{R,M}$, welche fast vollständig aus Granodiorit G bestehen, laut Eignungsprüfung wesentlich höher angegeben als die Rohdichte, welche an den vom Bindemittel befreiten Mineralstoffen festgestellt wurde. Die Differenz beträgt ca. 0,1 g/cm³ und ist signifikant.

Eine Ursache für diese aufgetretene Differenz könnte daraus resultieren, daß dieser Granodiorit G stets ein nicht exakt definiertes Gemisch aus Diorit und Granodiorit darstellt. Für die zwei Asphaltgranulate AG 2 und AG 3 konnten keine Untersuchungen an den frischen Mineralstoffen durchgeführt werden, da AG 2 unbekannter Herkunft ist und für AG 3 nur uneinheitliche Angaben für die Mineralstoffrohdichten ($\rho_{R,M}$ von 2,591 g/cm³ bis 2,751 g/cm³) in den Eignungsprüfungen angegeben wurden, welche ganz und gar nicht mit den ermittelten Rohdichten der extrahierten Mineralstoffe $\rho'_{R,M}$ übereinstimmen. Diese werden um ca. 0,1 g/cm³ höher berstimmt.

Die übrigen acht vom Bindemittel befreiten Mineralstoffgemische stimmen ausgezeichnet bis gut ($\rho'_{R,M}$ für Nr. 1222 und AG 1 liegen geringfügig niedriger) mit den harmonisch gemittelten mittleren Rohdichten der adäquaten frischen Mineralstoffgemische überein.

Tab. 33: Rohdichten $\rho'_{R,M}$ der extrahierten Mineralstoffe der zwölf Praxisgemische

Asphaltmischgut/ Asphaltgranulat	Labor-Nr.	Herstellung Wo/Wann	Bindemittel	Beteiligte Mineralstoffe	Prozentuale Beteiligung im Mineralgemisch der Zugabe-zusammensetzung	Rohdichte $\rho'_{R,M}$ der extrahierten Mineralstoffe DIN 52 102* Prüfflüssigkeit Trichlorethylen				Rohdichte $\rho_{R,M}$ der frischen Mineralstoffe (soweit bekannt) DIN 52 102* Prüfflüssigkeit Wasser			
						Einzelwerte			Mittel	Rohdichte der beteiligten Mineralstoffe			aus EP berechnetes Mittel
					M.-%	g/cm³				g/cm³			g/cm³
Abi 0/16 S	19	MA 1	PmB 25 A	G, K$^{n.u.}$	98,5; 1,5	2,812	2,827	2,809	2,816	2,882 G	unbekannt K*		2,901**
GA 0/11 S	1205	MA 2	30/45	D, S, K	53,0; 22,0; 25,0	2,835	2,835	2,840	2,837	2,874 D	2,710 S	2,860 K	2,836
SMA 0/11 S	1218	MA 2	PmB 45 A	S, K	90,0; 10,0	2,733	2,733	2,732	2,733	2,720 S	2,860 K		2,743
Abi 0/16 (AG2)	1220	MA 3	50/70 + AG 2, 25 M.-%	A, K, (unbek.)	71,6; 3,4; (25,0)	2,823	2,822	2,808	2,818	2,848 A	2,860 K	2,723^{ex} AG 2	2,817
AB 0/11 S	1221	MA 2	70/100	S	100,0	2,723	2,718	2,721	2,721	2,720 S			2,720
Abi 0/16	1222	Labor	50/70	A, K	96,6; 3,4	2,835	2,826	2,814	2,825	2,848 A	2,860 K		2,849
Abi 0/16 (AG1)	1223	Labor	50/70 + AG 1, 20 M.-%	A, K, (D, S, K)	78,7; 1,3; (20,0)	2,848	2,851	2,854	2,851	2,848 A	2,860 K	2,817^{ex} (2,834) AG 1	2,842 (2,846)
SMA 0/8 S	1224	Labor	PmB 65 A	D, K	90,1; 9,9	2,868	2,873	2,873	2,871	2,874 D	2,860 K		2,873
Abi 0/22S (AG3)	1225	Labor	30/45 + AG 3, 25 M.-%	G, K, (O, K$^{n.b.}$)	72,0; 3,0; (25,0)	2,879	2,886	2,880	2,882	2,882 G	2,860 K	2,800^{ex} AG 3	2,860
AG 1	1168	1999	PmB 45 A	D, S, K	51,0; 24,0; 25,0	2,815	2,819	2,817	2,817	2,874 D	2,710 S	2,860 K	2,834
AG 2	124	vor 1989	unbekannt	unbekannt		2,723	2,719	2,726	2,723	unbekannt			-
AG 3	1199	1991/1994	B 65 (50/70)	O, K$^{n.b.}$		2,804	2,799	2,797	2,800	unbekannt			-

* In der DIN EN 1097-6 sind aus Asphalt extrahierte Mineralstoffe nicht vorgesehen.

** in der Eignungsprüfung angeführte Rohdichte der Mineralstoffe

$^{n.b.}$ nicht bekannt $^{n.u.}$ nicht untersucht ^{ex} extrahiertes Mineralstoffgemisch

7. Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Bestimmung des Bindemittelgehaltes nach DIN 1996. T. 6 (Ausgabe 10/1988) auf den Prüfstand gestellt.

Die zwei Komponenten des Bindemittelgehaltes, der unproblematische lösliche und der problembehaftete unlösliche, werden untersucht.

Da die Bestimmung des Gesamtbindemittelgehaltes zwingend die Kenntnis der Korngrößenverteilung voraussetzt, ist diese in die Untersuchungen integriert.

An sich war für sämtliche Untersuchungen zur Bindemittelgehaltsbestimung nur die Kaltextraktion mit Toluol vorgesehen, verbunden mit dem Rückgewinnungsverfahren.

Die Eigenschaften der zurückgewonnenen Bindemittel können nur unter diesen festgelegten schonenden Bedingungen weitgehend fehlerfrei bestimmt werden.

Diese Art der Extraktion läßt natürlich auch die Auswertung nach dem Differenzverfahren zu.

Als zusätzliche Leistung wurde die Heißextraktion mit Trichlorethylen vergleichshalber durchgeführt, welches an sich nur die Auswertung durch das Differenzverfahren sinnvoll macht.

Die Untersuchungen waren insbesondere darauf gerichtet, einen Nachweis zu erbringen, ob die im Rahmen des Forschungsvorhabens als Füllergleichung bezeichnete Gleichung, wie sie in der zur Zeit gültigen vertragsrelevanten Form existiert, ihre Berechtigung hat oder nicht.

Sie soll hier nochmals explizit mit zusätzlicher Indizierung des Verfassers angeführt werden

$B_{unl,emp,A} = 0{,}013 * F_M + 0{,}1$

Dem Rechenergebnis dieser Gleichung wird der experimentell ermittelte unlösliche Bindemittelgehalt $B_{unl,exp,korr,A}$ nach Anhang C der DIN 1996 T. 6 (Verfahren 1996-06A-W1-KR-Z) unter Anwendung des Zentrifugenverfahrens gegenübergestellt, wobei $B_{unl,emp,A}$ den jeweiligen Bezugswert darstellt. Als relativer unlöslicher Bindemittelgehalt Q_{unl} wird das prozentuale Verhaltnis bzw. Quotient von $B_{unl,exp,korr,A}$ zu $B_{unl,emp,A}$ eingeführt.

Diese Vergleiche werden an Modell-Asphaltbeton AB 0/11 mit einem Füllergehalt im Mineralgemische von 10 M.-% ($B_{unl,emp,A}$ = 0,23 M.-%) unter Verwendung eines Bitumens 70/100 und einem Modell-Asphaltmastix AM 0/2 mit einem Füllergehalt im Mineralgemisch von 40 M.-% ($B_{unl,emp,A}$ = 0,62 M.-%) mit Bitumen 30/45 durchgeführt.

Dabei werden sechs unterschiedliche Mineralstoffe, als siebenter der Fremdfüller FF, berücksichtigt und jeweils Modell-Asphaltgemische gleicher Rezeptur mineralstoffkonform hergestellt. Zusätzlich wurde der Fremdfüller durch das mineralstoffeigene Gesteinsmehl, hier als Eigenfüller EF bezeichnet, ersetzt.

Um auch die Wirkung des Alters des Asphaltes und die einer thermischen Beanspruchung, welche bei der Asphaltproduktion auftreten kann, auf den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt nachzuvollziehen, wurden die Untersuchungen zur Analyse des Asphaltes, die Extraktionen erstens nicht nur sofort (1) nach der Herstellung, sonden auch zweitens 28 Tage nach der Herstellung (2) und drittens nach einer thermischen Beanspruchung von 5 h bei 163 °C (3) durchgeführt.

Der Einfluß der 28-Tage-Lagerung auf den experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehalt ist unbedeutend, ebenso auf die Eigenschaften des zurückgewonnenen Bindemittels. Deshalb wurde bei den Modell-Asphaltmastizes auf diese Art der Vorgeschichte (2) bis zur Extraktion verzichtet.

Die aus unterschiedlichen Mineralstoffen hergestellten Modell-Asphalte ergeben mit Ausnahme eines Mineralstoffes (Q) wesentlich niedrigere Werte für den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,exp,korr,A}$ als nach der Füllergleichung berechnet wird. Noch stärker als bei Modell-Asphaltbeton ist diese Tendenz bei den füllerreicheren Modell-Asphaltmastizes ausgeprägt.

Nach thermischer Beanspruchung erhöhen sich die Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,exp,korr,A}$ mineralstoffspezifisch ebenso die Kennwerte der zurückgewonnenen Bindemittel durch eine Zunahme der Konsistenz, der Härte.

Die Untersuchungen an Modell-Asphalten eröffnen eine zweite, eine alternative Möglichkeit zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes - mit dem vom Verfasser entwickelten SAP-Verfahren oder auch als Synthese-Analyse-Prinzip bezeichnet. Das Verfahren ist einfach, in jedem Labor mit normaler Ausstattung durchführbar im Vergleich zu der sehr aufwendigen Bestimmung gemäß Anhang C der DIN 1996 T.6. Selbst durch den Einsatz des Elemental Analyzers EA 3000, dem Stand neuer Technik Tribut zollend, bleibt diese Art der Untersuchung äußerst zeitraubend und personal- und energieintensiv.

Das SAP-Verfahren beruht auf einer einfachen Überlegung und erfordert nur genaues analytisches Arbeiten. Die zur Herstellung/Synthese des Modell-Asphaltes oder auch einer Asphaltmischung zur Herstellung der Vorzugsvariante einer Eignungsprüfung exakt bekannte Masse an Bitumen wird nach der Extraktion/Analyse des Asphaltes, der Rückgewinnung des löslichen Bindemittels um den unlöslichen Anteil $B_{unl,SAP}$ vermindert. Die Differenz zwischen der Zugabemenge $m_{B,v}$ und der Ergebnismenge $m_{B,n} = m_{B,lös}$, dem löslichen Bitumen $B_{lös,W}$, in Prozent ausgedrückt, führt zum unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,SAP,A}$ im Asphalt. Die auf diese Art und Weise ermittelten Werte stimmen im wesentlichen mit den nach Anhang C der DIN 1996 T. 6 experimentell bestimmten Werten $B_{unl,exp,korr,A}$ überein.

Wiederum nimmt der Mineralstoff Q eine Ausnahmestellung ein, indem die damit hergestellten Modell-Asphaltbetone den empirischen Wert nach der Füllergleichung erreichen oder sogar überschreiten.

Bei der Berechnung des Gesamtbindemittelgehaltes nach DIN 1996 T. 6 aus löslichem, sowohl nach dem Rückgewinnungs- als auch nach dem Differenzverfahren bestimmten, und nach der Füllergleichung berechneten unlöslichem Bindemittelgehalt wird mit Ausnahme des Mineralstoffes Q der exakt eingewogene Zugabebindemittelgehalt überschritten, stärker ausgeprägt bei den Modell-Asphaltmastizes AM 0/2 (B_{ges} > 15,0 M.-%) als bei den Modell-Asphaltbetonen AB 0/11 (B_{ges} > 7,0 M.-%).

Ergänzend wurden von den sechs Referenzgesteinen, einschließlich des Kalksteinfüllers sämtliche sieben an den Modell-Asphalten beteiligten Kornklassen (von 0 bis 11 mm) als Bitumen-Mineralstoff-Gemische und Bitumen-Füller-Gemische mit Bitumen 70/100 und sofortiger (1) Kaltextraktion mit Toluol nach Anhang C bezüglich ihres unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,exp,korr,A}$ untersucht.

Die jeweils sechs Kornklassen der sechs Referenzgesteine > 0,09 mm, gleichsam füllerfreie Gemische, sollten bei Gültigkeit der Füllergleichung einen unlöslichen Bindemitteltgehalt von $B_{unl,emp,A}$ = 0,1 M.-% enthalten. Die reinen Bitumen-Füller-Gemische enthalten demnach $B_{unl,emp,A}$ = 1,4 M.-%.

Die Kornklassen > 0,09 mm ergaben mineralstoffspezifisch eine mehr oder weniger ausgeprägte Abstufung, eine Abnahme des unlöslichen Bindemittelgehaltes in Richtung gröberer Kornklassen, in Richtung geringerer spezifischer Oberfläche.

Der Grenzwert 0,1 M.-% wird in nur 4 Fällen bei der feinsten Kornklasse 0,09/0,025 überschritten. Die nachfolgenden gröberen Kornklassen liegen fast ausnahmslos unterhalb, z.T. weit unterhalb dieser Marke.

Wiederum nehmen die hier nun untersuchten sechs Kornklassen des Mineralstoffes Q eine Sonderstellung ein, übereinstimmend mit den daraus hergestellten Modell-Asphalten. So ergibt die feinste Kornklasse 0,09/0,25 dieses Mineralstoffes das etwa 2,7fache des „Sollwertes“ und die nachfolgenden gröberen Kornklassen übertreffen diesen mindestens um die Hälfte.

Die hier erstmalig durchgeführten Vergleichsuntersuchungen mittels Heißextraktion und Trichlorethylen als Lösemittel an der mittleren Kornklasse 2/5 (nur für zwei Mineralstoffen , für S und Q) führten zu signifikant geringeren Werten für den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt als die an gleicher Kornklasse mittels Kaltextraktion unter Verwendung von Toluol bestimmten.

Dieses Ergebnis führte dazu, die Heißextraktion mit Trichlorethylen ergänzend bei der Untersuchung der Praxisgemisch durchzuführen.

Die Bitumen-Füller-Gemische schnitten beim "Sollwert"-Vergleich noch deutlicher ab. Selbst bei einer realistischeren Modifikation der Füllergleichung zur ursprünglichen Form /10/ ($B_{unl,A} = 0{,}013\ F_A + 0{,}1 - F_A = F_M{*}M/A$) lägen die experimentell ermittelten Werte weit unter den auf Erfahrung beruhenden. Der Höchstwert der sieben untersuchten Bitumen-Füller-Gemische ergab etwa ein Drittel und der niedrigste Wert etwa 1/10 des nach der derzeit gültigen Füllergleichung errechenbaren Wertes, ohne Berücksichtigung der Gültigkeits-einschränkung nach DIN 1996 T. 6.

Die bisher geschilderten Untersuchungen ließen die Schlußfolgerung zu, daß der unlösliche Bindemittelgehalt im Asphalt nicht einzig und allein eine Funktion des Füllergehaltes, der Kornklasse < 0,09 mm- $F_{0,09}$, im Mineralgemisch sein kann sondern eine Funktion des individuellen Mineralgemisches. Auch der Ersatz dieser Kornklasse durch die in Hinblick auf die Europäische Normung interessierende feinere Kornklasse < 0,063 mm - $F_{0,063}$, wurde in Betracht gezogen, führte jedoch zu keinen wesentlichen Veränderungen der Ergebnisse.

Diese Aussage bedurfte der Bestätigung durch die Praxis, der Untersuchung von Mischgütern aus drei Mischanlagen unterschiedlicher Asphaltsorten und –arten mit unterschiedlichen Bindemittteln, von Asphaltgranulaten, großen Labormischungen und Bohrkernen längerer Liegedauer.

Insgesamt wurden für zwölf Asphalte mindestens je zehn Tests, 10 Kaltextraktionen mit Toluol (Verfahren 1996-06A-W1-KR-Z) durchgeführt und von jedem der jeweils 10 Test der unlösliche Bindemittelgehalt bestimmt.

Sechs bzw. neun Bindemittel kamen zum Einsatz:

3 Straßenbaubitumen Sorte 70/100, Sorte 50/70, Sorte 30/45

3 polymermodifizierte Bitumen PmB 65 A, PmB 45 A, PmB 25 A und drei

evt. als Mischbitumen oder hypothetische fiktive Bitumen zu bezeichnende Bindemittel, die anteilmäßig, bestimmt durch die Zugabemenge des Asphaltgranulates und dessen Bindemittelgehalt aus dem löslichen Bitumen des jeweiligen Asphaltgranulates AG und dem zugesetzten frischen Bitumen bestehen.

Mischbitumen 50/70 + AG 1-Bitumen (PmB 45 A als ursprüngliche Zugabebitumen)

Mischbitumen 50/70 + AG 2-Bitumen (unbekanntes Zugabebitumen)

Mischbitumen 30/45 + AG 3-Bitumen (B 65 bzw. 50/70 als ursprüngliches Zugabebitumen)

Von Interesse dürfte sein, daß als Mineralstoffe vier (fünf) der Referenzgesteine zum Einsatz kamen. Sie sollen hier nochmals verbal angeführt werden. Es handelt sich um Syenodiorit S,

Diabas D, Amphibolit A, Granodiorit G und Kalkstein K. An im Asphaltgranulat AG 3 enthaltenem Orthophyr O wurden nur einige wenige, nicht nennenswerte Untersuchungen im Vorfeld durchgeführt.

Fünf der untersuchten Mischgüter stammen aus Mischanlagen, acht, wenn die drei Asphaltgranulate, welche aus zwar nicht bekannten Mischanlagen stammen hinzugezählt werden, und vier Asphalte wurden als große Labormischungen realisiert.

Es wurden fünf Asphaltbinder ohne und mit Asphaltgranulatzusatz
zwei Splittmastixasphalte
ein Asphaltbeton
ein Gußasphalt und

die drei Asphaltgranulate
AG 1 aus einem Gußasphalt stammend
AG 2 unbekannter Herkunft
AG 3 aus Asphaltbeton und –binder bestehend

untersucht.

In der folgenden Tab. 34 und Abb. 71 sind die aus je mindestens zehn völlig separaten Untersuchungen gemittelten Ergebnisse für die zwölf Asphalte und die Bohrkerne längerer Liegedauer dargestellt. Zur Verdeutlichung sind nicht die Absolutwerte des unlöslichen Bindemittelgehaltes angeführt sondern das prozentuale Verhältnis, der Quotient Q_{unl} vom experimentell bestimmten zum empirisch mit der Füllergleichung berechneten Wert. (Die Einzelwerte sind in den Abbn. 38 e bis 50 e, bzw. in den Anlagen 6.2.1.1 bis 6.2.1.13 zu finden.)

Es ist offensichtlich, daß nicht nur bei Modell-Asphalten sondern auch bei Praxismischungen der nach der Füllergleichung berechnete auf Erfahrungen beruhende Wert für den unlöslichen Bindemittelgehalt z. T. wesentlich höher liegt bzw. der experimentell ermittelte Wert für den unlöslichen Bindemittelgehalt weit unter dem Niveau der jeweiligen vom ermittelten Ergebnis-Füllergehalt $F_{M,n}$ im Mineralgemisch abhängigen Wert liegt.

Nicht völlig erklärlich ist der extrem niedrige Wert für die Bohrkerne längerer Liegedauer Das sollte möglicherweise weiter verfolgt werden. Das dazugehörige Mischgut ergibt zwar ebenfalls niedrige Werte für den experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt, die aber höher liegen als die der Bohrkerne. Eine Wiederholung der Untersuchungen bestätigte jedoch die Ergebnisse. Dieser niedrige Wert ist auch von Seiten des Bindemittels, es handelt sich hierbei um das härteste der polymermodifzierten Bitumen, um PmB 25 A, nicht unbedingt zu erwarten. Möglicherweise verhindert zum einen die hohe Viskosität und zum

anderen die Armierung des Bindemittels durch den Polymerzusatz ein Eindringen des Bindemittels in die Poren des Gesteins oder ist das zutreffende Gestein so wenig porös, daß zwar Wasser aber nicht oder nur sehr wenig Bitumen eindringen kann und so das lösliche Bitumen sich dem Gesamtbitumen weitgehend annähert. Aus den Ergebnissen bei Modell-Asphalten mit Granodiorit G könnte das geschlußfolgert werden.

Deutlich erkennbar sind auch die Unterschiede der relativen unlöslichen Bindemittelgehalte der mit Toluol kalt extrahierten Asphalte und der mit Trichlorethylen heiß extrahierten Asphalte. Teilweise betragen letztere (TRI-H) nur die Hälfte von Toluol-K.

Wenn dann noch in Betracht gezogen wird, daß der Füllergehalt im Mineralgemisch bei der Extraktion mit Trichlorethylen aus unterschiedlichsten Gründen etwas niedriger bestimmt wird als mit Toluol und sich dadurch ein niedrigerer Bezugswert $B_{unl,emp,A}$ ergibt, ist die höhere Lösefähigkeit von Trichlorethylen (Abb. 71) im heißen Zustand außer Zweifel.

An dieser Stelle sollte zumindest die Einstufung von Trichlorethylen als krebserzeugend nicht unerwähnt sein.

Die umfassenden Untersuchungen an den zurückgwonnenen Bindemitteln ergaben eine vor allem vom Mineralstoff abhängige Konsistenzzunahme, welche z.T. in Abhängigkeit von der Vorgeschichte, stark von der Konsitenzänderung durch thermische Beanspruchung des reinen Bitumens abwich.

Tab. 34: Mittlere unlösliche Bindemittelgehalte (relativ) der zwölf Praxisgemische und der Borhkerne längerer Liegedauer

Asphaltmischgut/ Bohrkern/ Asphaltgranulat	Labor-Nr.	Herstellung Wo/Wann	Bindemittel	Mineralstoffe	mit Toluol extrahiert (K)	mit Trichlor-ethylen extrahiert (H)
					$100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$	
					%	%
Abi 0/16 S	19	MA 1	PmB 25 A	G, K*	49,93	46,09
Abi 0/16 S(BK)	BK 19	MA 1	PmB 25 A	G, K*	22,19	14,74
Abi 0/16 S(BK)w	BK 19	MA 2	PmB 25 A	G, K*	27,08	14,74
GA 0/11 S	1205	MA 2	30/45	D, S, K	62,96	50,52
SMA 0/11 S	1218	MA 2	PmB 45 A	S, K	70,89	43,18
Abi 0/16(AG2)	1220	MA 3	50/70 + AG 2, 25 M.-%	A, K, (unbek.)	61,91	49,62
AB 0/11 S	1221	MA 2	70/100	S	76,93	49,04
Abi 0/16	1222	Labor	50/70	A, K	29,12	18,76
Abi 0/16(AG1)	1223	Labor	50/70 + AG 1, 20 M.-%	A, K, (D, S, K)	51,93	43,19
SMA 0/8 S	1224	Labor	PmB 65 A	D, K	39,29	27,08
Abi 0/22S(AG3)	1225	Labor	30/45 + AG 3, 25 M.-%	G, K, (O, K')	48,46	23,03
Abi 0/22S(AG3)w	1225	Labor	30/45 + AG 3, 25 M.-%	G, K, (O, K')	48,01	21,97
AG 1	1168	1999	PmB 45 A	D, S, K	71,68	51,03
AG 2	124	vor 1989	unbekannt	unbekannt	86,08	64,63
AG 3	1199	1991/1994	B 65 (50/70)	O, K'	83,14	69,77

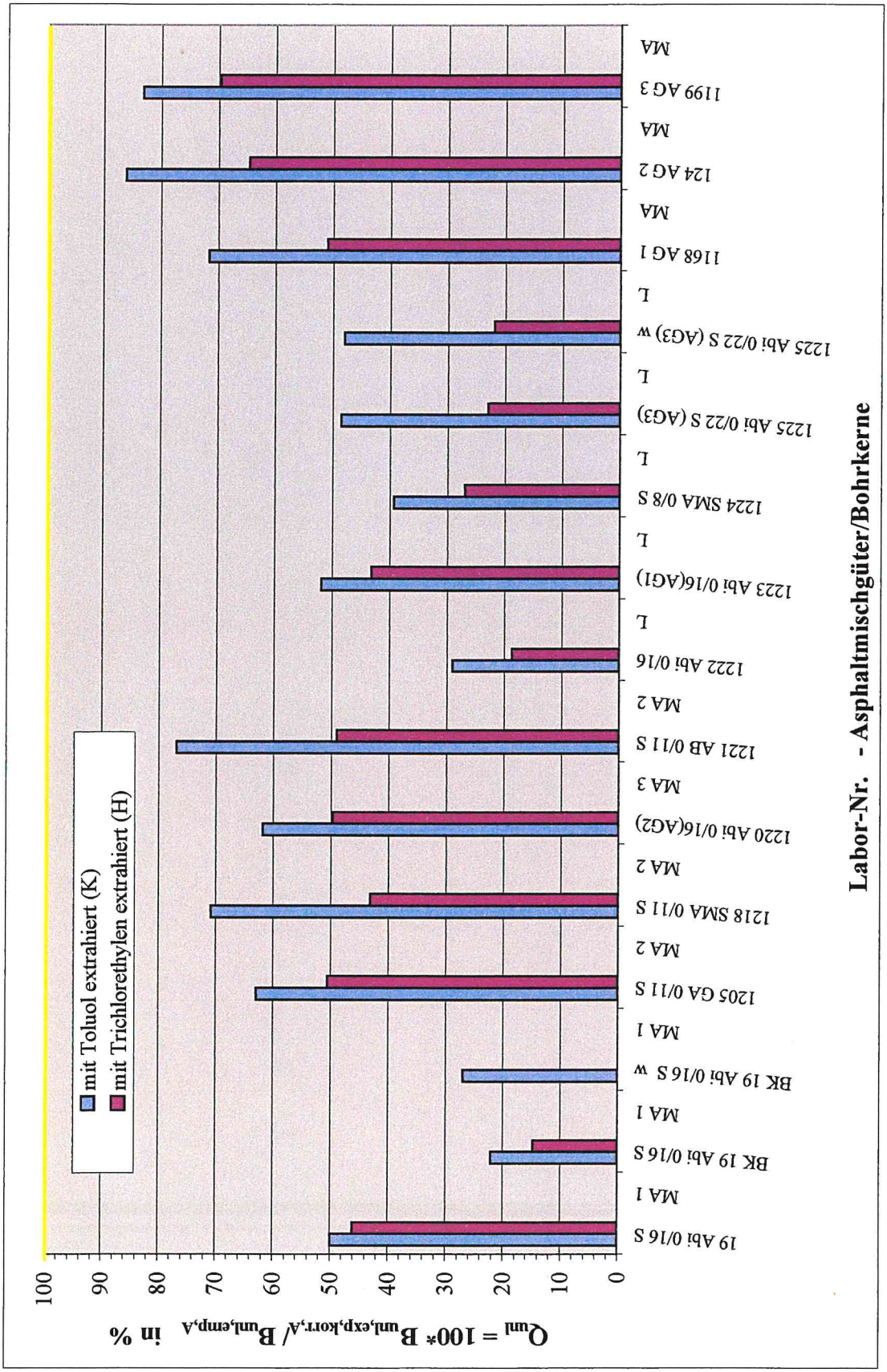


Abb. 71: Mittlere unlösliche Bindemittelgehalte (relativ) Q_{unl} der zwölf Praxisgemische und der Bohrkerne längerer Liegedauer

8. Zusammenfassung

Die unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes im Asphalt, verbunden mit der Untersuchung des zurückgewonnenen Bindemittels und im geringen Umfang, außer der zwangsläufig erforderlichen Bestimmung der Korngrößenverteilung, auch der Untersuchung der vom Bindemittel befreiten Mineralstoffe, ist Inhalt des Berichtes.

Die Bindemittelgehaltsbestimmung wurde an die Bedingungen und Anforderungen, die an eine Schiedsanalyse gestellt werden, angepaßt. Sie wurde als Kaltextraktion (K) mit Toluol (1) als Lösemittel durchgeführt, und das lösliche Bindemittel durch Abdestillieren des Lösemittels, das Rückgewinnungsverfahren, mit dem Vakuum-Rotationsverdampfer (R) zurückgewonnen (W).

Der unlösliche Anteil des Bindemittels wurde nach Anhang C der DIN 1996 T. 6 experimentell bestimmt, wobei das Zentrifugenverfahren (Z) eingesetzt wird, so daß sich die Verfahrensbezeichnung DIN 1996-06A-W1-KR-Z ergibt.

Dem Stand der Technik angepaßt, wird der organische Kohlenstoffgehalt bzw. der unlösliche Bindemittelgehalt im Elemental Analyzer EA 3000 ermittelt.

Zum Vergleich wurde die Heißextraktion (H) mit Trichlorethylen (2) durchgeführt, der lösliche Bindemittelgehalt mit dem Differenzverfahren (D) berechnet und der unlösliche Bindemittelgehalt nach den Erfahrungswerten (E) mit der Füllergleichung nach Abschnitt 8.2 der DIN 1996 T.6 bestimmt. Das ist die in der Praxis allgemein angewendete Methode mit der Verfahrensbezeichnung DIN 1996-6A-D2-H(K)-E, auch ein Grund, um diese nicht geplanten kostenneutralen Untersuchungen in das Forschungsvorhaben zu integrieren.

Die aus einer älteren Fassung der DIN 1996 T.6 stammende logischere Füllergleichung $B_{unl,emp,A} = 0{,}013\ F_A + 0{,}1$ erscheint in der z.Z. gültigen DIN 1996 T.6 von 1988 in einer weniger nachvollziehbaren aber vertragsrelevanten Form - $B_{unl,emp,A} = 0{,}013\ F_M + 0{,}1$.

Es wurden zunächst Modell-Asphalte, Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Bitumen 70/100) und Modell-Asphaltmastix AM 0/2 (Bitumen 30/45) mit jeweils exakt festgelegten Rezepturen untersucht. Die Modellmischungen wurden jeweils mit sechs Mineralstoffen realisiert.

Es handelt sich um Syenodiorit S, Quarzporphyr Q, Diabas D, Lamprophyr L, Amphibolit A und Granodiorit G aus sächsischen Steinbrüchen. Das als Fremdfüller eingesetzte Kalksteinmehl K stammt ebenfalls aus Sachsen.

Die sich durch den Füllergehalt im Mineralgemisch (10 M.-% im AB 0/11 und 40 M.% im AM 0/2; d.h. konstanter unlöslicher auf Erfahrungen beruhenden Bindemittelgehalt $B_{unl,emp,A}$ = 0,23 M.-% bzw. 0,62 M.-%) und die Füllerart (Eigenfüller EF und Fremdfüller FF) unterscheidenden Modell-Asphalte werden insbesondere bezüglich des experimentell

bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes untersucht. Außerdem wird jeweils die Ergebniszusammensetzung der Mineralstoffe festgestellt, welche bei der praktizierten analytischen Vorgehensweise der Zugabezusammensetzung entspricht, und das zurückgewonnene Bitumen bezüglich der Nadelpenetration, des Erweichungspunktes RuK und des Aschegehaltes, letztere als Qualitätskriterium einer exakt durchgeführten Extraktion, bestimmt.

Diese o.a. Gesteine wurden in Hinblick auf die vor allem aus Mischanlagen stammenden Praxisgemische ausgewählt.

Die Extraktion der Modell-Asphalte wird bei unterschiedlicher Vorgeschichte des Asphaltes, einmal sofort, zum anderen nach einer 28-Tage-Lagerung und nach einer thermischen Beanspruchung von 5h bei 163 °C, durchgeführt..

Des weiteren wurden sämtliche sieben beteiligten Kornklassen der 6 Gesteine in Form von Bitumen-Mineralstoff-Gemischen bzw. Bitumen-Füller-Gemischen bezüglich des experimentell bestimmten unlöslichen Bindemitelgehaltes untersucht.

Die an dem gesamten umfassenden Pool von Modell-Asphalten und Bitumen- Mineralstoff-Gemischen erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Mit Ausnahme der Gemische mit Quarzporphyr Q liegen die experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehalte z.T. weit unter dem Niveau des auf Erfahrungswerten beruhenden unlöslichen Bindemittelgehaltes.

Es wird deutlich, daß der unlösliche Bindemittelgehalt nicht vom Füllergehalt sondern von der Art des Mineralstoffes und der spezifischen Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches im Asphalt abhängt.

Die Sorte und die Art der betrachteten Bindemittel scheint ohne wesentlichen Einfluß auf den unlöslichen Bindemittelgehalt zu sein

Bei der Heißextraktion mit Trichlorethylen, die nur stichprobenartig für die Modell-Gemische durchgeführt wurde, sind wesentlich niedrigere unlösliche Bindemittelgehalte ermittelt worden im Vergleich zur Kaltextraktion mit Toluol.

Fünf der zwölf untersuchten Praxisgemische stammen aus drei unterschiedlichen Mischanlagen. Vier große Labormischungen wurden hergestellt und untersucht. Drei Asphaltgranulate (zwei davon straßenbaubitumenhaltig und eines PmB-haltig) sowie Bohrkerne längerer Liegedauer waren in die Untersuchungen eingeschlossen.

Unterschiedliche Asphaltsorten bzw. –arten mit unterschiedlichen Bindemitteln)Straßenbaubitumen und PmB) mit unterschiedlicher Mineralstoffen, Asphaltemit und ohne

Asphaltgranulatzusatz, werden nicht nur einfach oder doppelt, wie die Modell-Asphalte untersucht, sondern mindestens 10fach bis maximal 17 fach je Asphalt mit dem o.a. ausgewählten Verfahren DIN 1996-06A-W1-KR-Z. Das ist auch deshalb notwendig, um eine umfassende Charakterisierung der zurückgewonnenen löslichen Bindemittel durchführen zu können.

Zusätzlich werden je zwei Heißextraktionen mit Trichlorethylen durchgeführt, in der Regel aber nur eine Untersuchung für die experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes verwendet, um die mit Modell-Asphalten erhaltenen Ergebnisse zu bestätigen.

Für sämtliche zwölf Praxisgemische konnte festgestellt werden, daß die Heißextraktion mit Trichlorethylen z.T. nur die Hälfte an experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt ergab wie vergleichsweise die Kaltextratkion mit Toluol.

Außerdem liegen die experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehalte der Praxisgemische zum Teil, wie das schon aus den Untersuchungen der Modell-Asphalte hervorgeht, weit unter den nach der Füllergleichung berechneten Werten.

Nicht einmal die teilweise schon sehr alten Asphaltgranulate sowie die Bohrkerne längerer Liegedauer folgen der Füllergleichung, insbesondere wieder die durch Heißextraktion mit Trichloethylen erhaltenen Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt.

Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, daß die Füllergleichung, selbst die ehemals /10/ realistischere Form, in der Regel zu hohe Werte für den unlöslichen Bindemittelgehalt ergibt. Auch die Anwendung einer Füllerdefinition von < 0,063 mm anstatt 0,09 mm kann die Diskrepanz zwischen experimentell ermittelten unlöslichen Bindemittelgehalt und den empirischen, auf Erfahrungen beruhenden, bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Asphalten, nicht ausgleichen.

Daraus kann man schlußfolgern, daß der Gehalt an unlöslichem Bindemittel im Asphalt nicht eine Funktion des Füllergehaltes ist sondern vom eingesetzten Mineralstoff bzw. dem jeweils im Asphalt enthaltenen aktuellen Mineralstoffgemisch abhängt.

An einer Kornklasse (Bitumenschluckwert am 2/5-Splitt) das Absorptionsvermögen eines Mineralstoffes für Bitumen, d.h. den unlöslichen Bindemittelgehalt, nach Anhang C der DIN 1996 T.6 zu prüfen, wie das von mir vor zwei Jahren in Berchtesgaden vorgeschlagen wurde, ist vielleicht nicht sinnvoll,. weil auch aufwendig..

Die Bindemittelart und -sorte scheint auch bei den Praxisgemischen keinen bestimmenden Einfluß auf die Höhe des unlöslichen Bindemittelgehaltes zu besitzen.

Die im Rahmen des Forschungsvorhaben erhaltenen Ergebnisse sind eindeutig und das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht..

Da die experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach Anhang C der DIN 1996 kein Routineverfahren ist, kann folgende Alternative vorgeschlagen werden, welche zu o.a. Verfahren gut übereinstimmenden Werte ergibt.
Mein Vorschlag wäre im Rahmen der Eignungsprüfung die der Mischanlage vorgeschlagenen Mischung als Referenzmischung „mit der Vorsicht völlig quantitativer Arbeit" /1/, ein Zitat aus dem Jahre 1929, herzustellen.
Die exakte Einwaage an Bitumen ist dabei bekannt, die Mineralstoffzusammensetzung ist ebenfalls exakt festgelegt.
Nach dem Mischen und ggf. einer vom Mineralstoffgemisch abhängigen Lagerzeit /27/28/, auch angepaßt an die Herstellung des Asphaltes an der Mischanlage und die verstreichende Zeit bis zum Einbau, wird der Asphalt einschließlich das Mischwerkzeug kalt mit Toluol oder auch Trichlorethylen extrahiert. Das lösliche Bitumen wird aus der von mehlfeinen mineralischen Bestandteilen freien Bitumenlösung im Vakuum-Rotationsverdampfer zurückgewonnen und der lösliche Bindemittelgehalt $B_{lös,W}$ bestimmt.
Aus der Differenz der Masse des Synthese – oder Zugabebitumens ($m_{B,v}$) vor dem Mischen und des Analyse- oder Ergebnisbitumens nach der Extraktion ($m_{B,n}$) wird die Masse des unlöslichen Bitumens bzw. der unlösliche Bindemittelgehalt $B_{unl,SAP,A}$ nach dem im Forschungsvorhaben entwickelten sogenannten Synthese-Analyse-Prinzip (SAP) festgestellt.
Auf diese Art und Weise wird m.E. eine realere Einschätzung des unlöslichen Bindemittelgehaltes möglich als durch die Füllergleichung.
Das Verfahren ist praktikabel, wesentlich einfacher durchführbar als das Verfahren nach Anhang C der DIN 1996 T.6, den damit gewonnenen Ergebnissen adäquat, und die dafür notwendige Ausrüstung ist in jedem nach RAP-Stra zugelassenen Labor vorhanden.
Abschließend wird folgendes festgestellt:
Nur der lösliche, der effektive, wirksame Bindemittelgehalt ist derjenige, welcher das Gebrauchsverhalten und die Lebensdauer von Asphaltkonstruktionsschichten bestimmt.

9. Literaturverzeichnis

/1/ DIN 1995 (1929)
Vorschriften für die Prüfung von Asphalt und Teer, sowie von Asphalt und Teer enthaltenden Massen, soweit sie im Straßen-Tief- und Hochbau verwendet werden
Aufgestellt im Jahre 1928 vom Hauptausschuß für Asphalt- und Teerforschung

/2/ DIN 1996 Deutsche Norm 2. Ausg. 10/1935
Bitumen und Teer enthaltende Massen für den Straßenbau und ähnliche Zwecke
Aufgestellt vom Hauptausschuß der Zentralstelle für Asphalt- und Teerforschung im Juni 1935
BEUTH-Verlag GMBH/ Berlin SW 19 S. 21 – 23
Eingeführt durch Erlaß des Generalinspektors für das deutsche Straßenwesen Nr. 94/35 vom 14.11.35

/3/ DIN 1996 Deutsche Norm 3. Ausg. April 1944 Bitumen und Teer enthaltende Massen für den Straßenbau und ähnliche Zwecke

/4/ DIN 1996 Teil 6 1966 (April 1966)
Bestimmung des Bindemittelgehaltes

/5/ K. Bahlo
Zur Überarbeitung der Norm 1996, 3.Ausgabe, April 1944
Zeitschrift „Straße und Autobahn“ 1965 H 4 S. 141 – 144

/6/ K. Bahlo
Zur Überarbeitung der Norm 1996, 3.Ausgabe, April 1944
1966 H. 2 S. 49 – 50

/7/ E. Bischoff
Schnellverfahren zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes in bituminösen Deckenbaumassen auf Baustellen
Zeitschrift „Straße und Autobahn“ 1953 H.1, S. 24

/8/ F. Schulz
Über ein Schnellverfahren zur Analyse von bituminösen Mischgut
Zeitschrift „Straße und Autobahn“ 1957 H. 4 S.128

/9/ H. Schmidt
Vereinfachte Verfahren zur Bestimmung des Bindemittelgehaltes von Asphalt-Mischungen
Zeitschrift „Bitumen“, Ausgabe 6/1963 S. 130 - 133

/10/ DIN 1996 Blatt 6 ,Oktober 1973
Bestimmung des Bindemittelgehaltes

/11/ DIN 1996 Teil 6 12/ 1980
Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete
Bestimmung des Bindemittelgehaltes

/12/ L. Geldern
Die Bestimmung des Bindemittelgehaltes von bituminösen Massen unter Verwendung eines Rotationsverdampfers
Zeitschrift „Bitumen“ 1967 H. 1, S 18 –20

/13/ H. Schmidt
Erfahrungen mit der „Schweizer Extraktionszentrifuge“ zur Wiedergewinnung des Bindemittels aus Asphaltmassen
Zeitschrift „Bitumen“ 1956 S. 93

/14/ F. Schulz
Eine neue Zentrifuge zur Untersuchung von bituminösen Mischgut
Zeitschrift „Straße und Autobahn“ 1965 H. 8, S. 274

/15/ DIN 1996 Blatt oder Teil 6 10/1988
Bestimmung des Bindemittelgehaltes und Rückgewinnung des Bindemittels

/16/ TGL 20801 Blatt 4 Januar 1969
Prüfung bituminöser Bindemittel-Gesteins-Gemische
Bindemittelgehalt

/17/ TGL 20801 Blatt Blatt 3
Prüfung bituminöser Bindemittel-Gesteins-Gemische
Bestimmung des Wassergehaltes

/18/ H. Nüssel,H, Henneke
Beitrag zur Analyse von Bitumen– und Teer-Mineralgemischen
Bitumen 5 (1935) S.143 - 149

/19/ TGL 20801 Blatt 4 Dezember 1981
Prüfung von Asphalt
Bindemittelgehalt

/20/ Schweizer Norm SN 671 955 a 5/1980
Bituminöses Mischgut
Bestimmen des löslichen Bindemittelanteils

/21/ Schweizer Norm SN 670 510 11/1982
Bituminöse Bindemittel
Rückgewinnung aus Extraktionsanlagen

/22 / DIN EN 12 697-1
Prüfverfahren für Heißasphalt
Löslicher Bindemittelgehalt

/23 / DIN EN 12 697-3
Prüfverfahren für Heißasphalt
Rückgewinnung des Bindemittels mit dem Rotationsverdampfer

/24/ DIN EN 12 697-4

Prüfverfahren für Heißasphalt
Rückgewinnung des Bindemittels mit der Fraktionierkolonne

/25/ DIN EN 12 592 (11/1999)
Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel
Bestimmung der Löslichkeit

/26/ SUPERPAVE Level 1
Mix Design
Asphalt Institut
Superpave No.2 (SP-2)
S 37 - 46, Kapitel 4, Volumetrische Rezeptierung von Asphalten (HMA)

/27/ R.D. Horan
Asphalt Mix Curing at ehe Design Lab and the field Lab
Probenvorbereitung von Asphaltgemischen bei der Eignungsprüfung und Eigenüberwachung
Asphalt,Vol 16, Nr.2, 2001
Asphalt Institut (USA) S.22 –24)

/28/ R.D.Horan
Effective Specific Gravity for VMA Calculations
Asphalt,Vol.18, No.2, 2003
Asphalt Institut (USA) S.18 – S.21

/29/ Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen
Teil 1, Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren, Ausgabe 2000
FGSV 926/1
FGSV Verlag GmbH

/30/ J.Huet
Methode de Recuperation avec evaporateur rotatif du liant soluble extrait d'enrobes bitumineux
Commision technique
RILEM 56 MHM
Materiaux Hydrocarbones –Hydrocarbon materials 4/1987

10. Verzeichnis der Tabellen

Tab.1.1: Klasssifizierung der Mineralstoffe nach DIN 1995 von 1929 /1/

Tab. 1.2: Basisdaten für eine Probe einer Asphaltdeckenmischung /26/

Tab. 2: Kennwerte der Ausgangsbitumen

Tab. 3: Ausgewählte Kennwerte von Füllern für Modell-Asphalte, große Labormischungen und Praxisgemische

Tab. 4: Ausgewählte Kennwerte und Daten der Asphaltgranulate

Tab. 5: Berechnung des unlöslichen Bindemittelgehaltes nach modifizierter Füllergleichung in Bitumen-Füller-Gemischen

Tab. 6: Berechnung des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,SAP,A}$ im Modellasphaltbeton AB 0/11 S

Tab. 7: Berechnung des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,SAP,A}$ im Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Tab. 8: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von Modell-Asphaltbeton AB 0/11

Tab. 9: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Tab. 10: Kennwerte der aus Modell-Asphaltbeton AB 0/11 zurückgewonnenen Bitumen

Tab. 11: Kennwerte des aus Modell-Asphaltmastix AM 0/2 zurückgewonnenen Bitumen

Tab. 12: Mischgutrezepturen gemäß Eignungsprüfungen

Tab. 13: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder 0/16 S von MA 1 (Nr. 19)

Tab. 14: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Gußasphalt 0/11 S von MA 2 (Nr. 1205)

Tab. 15: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Splittmastixasphalt SMA 0/11 S von MA 2 (Nr. 1218)

Tab. 16: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder Abi 0/16 von MA 3 (Nr. 1220)

Tab. 17: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbeton AB 0/11 S von MA 2 (Nr. 1221)

Tab. 18: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder Abi 0/16, große Labormischung (Nr. 1222)

Tab. 19: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder Abi 0/16, große Labormischung (Nr. 1223)

Tab. 20: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Splittmastixasphalt SMA 0/8 S, große Labormischung (Nr. 1224)

Tab. 21: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltbinder Abi 0/22 S, große Labormischung (Nr. 1225)

Tab: 22: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltgranulat AG 1 (Nr. 1168)

Tab. 23: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltgranulat AG 2 (Nr. 124)

Tab. 24: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Asphaltgranulat AG 3 (Nr. 1199)

Tab. 25: Statistische Auswertung der experimentellen Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes von Bohrkernen eines Asphaltbinders Abi 0/16 S von MA 1 (Nr. 19)

Tab. 26: Statistische Kennwerte zum löslichen Bindemittelgehalt

Tab. 27: Gesamtbindemittelgehalt (Differenzverfahren, löslicher und unlöslicher Binde-Mittelgehalt (Füllergehalt)

Tab. 28: Mittlere Korngrößenverteilung der vom Bindemittel befreiten Mineralstoffe der zwölf untersuchten Asphalte/Asphaltgranulate

Tab. 29: Bindemittelkennwerte von drei aus Asphalten zurückgewonnenen Bitumen: GA 0/11 S, Abi 0/16 mit AG 3 und AB 0/11 S

Tab. 30: Bindemittelkennwerte von drei aus Asphalten zurückgewonnenen polymer-modifizierten Bitumen: SMA 0/8 S, SMA 0/11 S und Abi 0/16 S

Tab. 31: Bindemittelkennwerte von drei aus Asphalten zurückgewonnenen Bitumen: 3 Asphaltbinder 0/16 ohne und mit Asphaltgranulat

Tab. 32: Bindemittelkennwerte von drei aus Asphaltgranulaten zurückgewonnenen Bitumen: AG 1, AG 2, AG 3

Tab. 33: Rohdichten $\rho'_{R,M}$ der extrahierten Mineralstoffe der zwölf Praxisgemische

Tab. 34 Mittlere unlösliche Bindemittelgehalte (relativ) der zwölf Praxisgemische und der Bohrkerne längerer Liegedauer

11. Verzeichnis der Abbildungen

Abb.: 1: Zusammensetzung einer verdichteten Asphaltprobe – Volumetrisches Diagramm /26/

Abb. 2: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulates AG 1 und Korngrößenverteilung der aus dem Granulat und dem zugehörigen Ausbaustück extrahierten Mineralstoffe

Abb. 3: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulates AG 2 und Korngrößenverteilung der aus dem Granulat extrahierten Mineralstoffe

Abb. 4: Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulates AG 3 und Korngrößenverteilung der aus dem Granulat extrahierten Mineralstoffe

Abb. 5: Grafische Darstellung der Abhängigkeit des unlöslichen Bindemittelgehaltes (E) nachDIN 1996 T.6 Abschnitt 8.2 und nach einer modifzierten Füllergleichung

Abb. 6: Mittlere M_{cf}-Werte der extrahierten Mineralstoffgemische von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 und Modell-Asphaltmastix AM 0/2

Abb. 7: Glühverlust der extrahierten Mineralstoffgemische eines Modell-Asphaltbetons mit Fremdfüller (K) in Abhängigkeit von der Glühtemperatur

Abb. 8: Glühverlust der extrahierten Mineralstoffgemische eines Modell-Asphaltbetons mit Eigenfüller (S, Q, D, L, A, G) in Abhängigkeit von der Glühtemperatur

Abb. 9: Unlöslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbetonen AB 0/11 unterschiedlicher Mineralstoffe (S, Q, D)

Abb.10: Unlöslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbetonen AB 0/11 unterschiedlicher Mineralstoffe (L, A, G)

Abb.11: Unlöslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltmastix AM 0/2 unterschiedlicher Mineralstoffe (S, Q, D, L, A, G)

Abb. 12: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Syenodiorit)

Abb. 13: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Quarzporphyr Q)

Abb. 14: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Diabas D)

Abb. 15: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Lamprophyr L)

Abb. 16: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltbeton AB 0/11 (Amphibolit A und Granodiorit G)

Abb. 17: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltmastix AM 0/2 (Syenodiorit S, Quarzporphyr Q, Diabas D)

Abb. 18: Vergleich des nach unterschiedlichen Methoden bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes im Modell-Asphaltmastix AM 0/2 (Lamprophyr L, Amphibolit A, Granodiorit G)

Abb. 19: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Syenodiorit-Gemische

Abb. 20: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Quarzporphyr-Gemische

Abb. 21: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Diabas-Gemische

Abb. 22: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Lamprophyr-Gemische

Abb. 23: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Amphibolit-Gemische

Abb. 24: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahierten (Toluol-K) Kornklassen der Bitumen-Granodiorit-Gemische

Abb. 25: Unlöslicher Bindemittelgehalt (relativ) von extrahiertem Füller unterschiedlicher Mineralstoffe

Abb. 26: Löslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbeton (S , Q)

Abb. 27: Löslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbeton (D, L, A, G)

Abb. 28: Löslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltmastix (S, Q, D, L, A, G)

Abb. 29: Gesamtbindemittelgehalte B_{ges} von Modell Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,emp,A}$

Abb.30: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,emp,A}$

Abb. 31: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltmastix AM0/2 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,emp,A}$

Abb. 32: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,exp,korr,A}$

Abb. 33: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,exp,korr,A}$

Abb. 34: Gesamtbindemittelgehalt B_{ges} von Modell-Asphaltmastix AM 0/2 als Summe von $B_{lös,W}$ und $B_{unl,exp,korr,A}$

Abb. 35: Vergleich vom Ausgangsbitumen 70/100 im Vergleich zu aus Modell-Asphalten extrahierten Bitumen (Toluol-K), Vorgeschichte 3

Abb.36: Kennwerte von aus Modell-Asphaltbeton extrahierten Bitumen (Toluol-K) im Vergleich zum Ausgangsbitumen 70/100 nach Sofortextraktion (1) nach 4-Wochen-Lagerung (2)

Abb. 37: Kennwerte von aus Modell-Asphaltmastix extrahierten Bitumen (Toluol-K) im Vergleich zum Ausgangsbitumen 30/45 nach Sofortextraktion (1) und Extraktion nach thermischer Beanspruchung (3)

Abb. 38: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder Abi 0/16 S mit PmB 25 A (MA 1, Nr. 19)

Abb. 39: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Gußasphalt 0/11 S mit Bitumen 30/45 (MA 2, Nr. 1205)

Abb. 40: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Splittmastixasphalt SMA 0/11 S mit PmB 45 A (MA 2, Nr. 1218)

Abb. 41: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulat AG 2 (MA 3, Nr. 1220)

Abb. 42: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen 70/100 (MA 2, Nr. 1221))

Abb. 43: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 (große Labormischung Nr. 1222)

Abb. 44: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und Asphaltgranulat AG 1 (Labormischung Nr. 1223)

Abb. 45: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 65 A (Labormischung Nr. 1224)

Abb. 46: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltbinder 0/22 S mit Bitumen 30/45 und Asphaltgranulat AG 3 (Labormischung Nr. 1225)

Abb. 47: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltgranulat AG 1 mit PmB 45 A (Nr. 1168)

Abb. 48: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltgranulat AG 2 (Nr. 124)

Abb. 49: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Asphaltgranulat AG 3 (Nr. 1199)

Abb. 50: Experimentell ermittelter unlöslicher Bindemittelgehalt von Bohrkernen längerer Liegedauer eines Asphaltbinders Abi 0/16 S (BK, Nr. 19)

Abb. 51: Gesamtbindemittelgehalt unter Berücksichtigung des empirisch und des experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehaltes

Abb. 52: Gesamtbindemittelgehalt mit Differenzverfahren ermittelt- Vergleich der Lösemittel und Extraktionstemperatur

Abb. 53: Mittlere Korngrößenverteilung der vom Bindemittel befreiten Mineralstoffe von 5 Mischgütern (MA 1, MA 2, MA 3), 4 großen Labormischungen und 3 Asphaltgranulaten

Abb. 54: Nadelpenetration bei 25 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bitumen im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 55: Nadelpenetration bei 25 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bitumen im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Abb. 56; Nadelpenetration bei 40 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bitumen im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb.57: Penetrationsindex $I_{P,Pen}$ der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 58: Erweichungspunkt Ring und Kugel der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb.59: Erweichungspunkt Ring und Kugel der aus Mischgütern (Asphaltgranulat) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bitumen im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Abb. 60: Penetrationsindex $I_{P,EP}$ der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb.61: :Penetrationsindex $I_{P,EP}$ der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Abb.62: Brechpunkt nach Fraass der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 63: Aschegehalte der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 64: Komplexer Schubmodul G* bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 65: Komplexer Schubmodul G* bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Abb. 66: Elastischer Modul (Speichermodul) G' bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 67: Elastischer Modul (Speichermodul) G' bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Abb. 68: Phasenwinkel δ bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsbitumen

Abb. 69: Phasenwinkel δ bei 60 °C der aus Mischgütern (Asphaltgranulaten) zurückgewonnenen zusätzlich thermisch beanspruchten Bindemittel im Vergleich zum thermisch beanspruchten Ausgangsbitumen

Abb. 70: Elastische Rückstellung von polymermodifizierten Bitumen – Vergleich zwischen Ausgangsbitumen und aus Mischgut zurückgewonnenen Bitumen sowie den thermisch beanspruchten Bindemitteln

Abb. 71 Mittlere unlösliche Bindemittelgehalte (relativ) der zwölf Praxisgemische und der Bohrkerne längerer Liegedauer

12. Verzeichnis der Anlagen

4.1.1 Kennwerte von Straßenbaubitumen 70/100 (Nr. 1013)
4.1.2 Kennwerte von Straßenbaubitumen 50/70 (Nr. 970)
4.1.3 Kennwerte von Straßenbaubitumen 30/45 (Nr.934)
4.1.4 Kennwerte von PmB 65 A
4.1.5 Kennwerte von PmB 45 A
4.1.6 Kennwerte von PmB 25 A

4.1.7 Beständigkeit gegen Verhärtung bei163 °C nach DIN 52 016 und DIN EN 12607-3 Kennwertveränderungen der Ausgangsbitumen unter Einfluß Wärme und Luft (th. B.)

5.1.1 Ungeklärte Masseverluste (Modell-Asphaltbeton)
5.1.2 Ungeklärte Masseverluste (Modell-Asphaltmastix)
5.1.3 Blindwerte von organischem Kohlenstoff in den Referenzgesteinen und den Modell-Asphalten (berechnet)

5.3 Harmonische Mittelung der M_{cf}-Werte der Kornklassen bezogen auf die Zusammensetzung der Modell-Asphalte

5.4.1.1 Glühverlust GV als Funktion der Temperatur
5.4.1.2 Glühverlust GV_{200} im Vergleich mit auf unterschiedliche Art und Weise bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt
5.4.1.3 Glühverlust bei 200 °C und unlöslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphaltbeton AB 0/11

5.5.1.1.1 Zugabe- und Ergebniszusammensetzung von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 und Bindemittelgehalt
5.5.1.1.2 Zugabe- und Ergebniszusammensetzung von Modell-Asphaltmastix AM 0/2 und Bindemittelgehalt
5.5.1.2.1 Unlöslicher Bindemittelgehalt, schrittweise Ermittlung, von Modell-Asphaltbeton AB 0/11
5.5.1.2.2 Unlöslicher Bindemittelgehalt, schrittweise Ermittlung, von Modell-Asphaltmastix AM 0/2
5.5.1.2.3 Unlöslicher Bindemittelgehalt, schrittweise Ermittlung, von Bitumen-Mineralstoff-Gemischen unterschiedlicher Kornklassen
5.5.1.2.4 Unlöslicher Bindemittelgehalt, schrittweise Ermittlung, von Bitumen-Füller-Gemischen
5.5.1.2.5 Harmonische Mittelung der $B_{unl,exp,unkorr,M}$-Werte der Kornklassen bezogen auf die Zusammensetzung des Mineralgemischs der Modell-Asphalte
5.5.2.1 Löslicher Bindemittelgehalt mit dem Differenzverfahren berechnet von Modell-Asphaltbeton AB 0/11
5.5.2.2 Löslicher Bindemittelgehalt mit dem Differenzverfahren berechnet von Modell-Asphaltmastix AM 0/2

6.2.1 Berechnung der mittleren Blindwerte $C_{M,bl}$ der Asphalte und mittlerer Bindemittel- und Mineralstoffgehalt B + M = A
6.2.1.1 Unlöslicher Bindemittelgehalt im Abi 0/16 S aus MA 1 (vorwiegender Mineralstoff Granodiorit G)

6.2.1.2	Unlöslicher Bindemittelgehalt im GA 0/11 S aus MA 2 (Mineralstoffe Diabas D, Syenodiorit S, Kalkstein K)
6.2.1.3	Unlöslicher Bindemittelgehalt im SMA 0/11 S aus MA 2 (Mineralstoffe Syenodiorit S und Kalkstein K)
6.2.1.4	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Abi 0/16 mit Asphaltgranulat AG 2 aus MA 3 (vorwiegender Mineralstoff Amphibolit A und unbekannte aus AG 2)
6.2.1.5	Unlöslicher Bindemittelgehalt im AB 0/11 S aus MA 2 (Mineralstoff ausschließlich Syenodiorit S)
6.2.1.6	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Abi 0/16 einer großen Labormischung (Mineralstoff Amphibolit A und Kalkstein K)
6.2.1.7	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Abi 0/16 einer großen Labormischung (Mineralstoffe Amphibolit A, Kalkstein K und D, S, K aus AG 1)
6.2.1.8	Unlöslicher Bindemittelgehalt im SMA 0/8 S einer großen Labormischung (Mineralstoffe Diabas D, Kalkstein K)
6.2.1.9	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Abi 0/22 S einer großen Labormischung (Mineralstoffe Granodiorit G, Kalkstein K und Orthophyr O und Kalkstein K* n.b. aus AG 3)
6.2.1.9w	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Abi 0/22 S einer großen Labormischung (Mineralstoffe Granodiorit G, Kalkstein K und Orthophyr O und Kalkstein K* n.b. aus AG 3)
6.2.1.10	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Asphaltgranulat AG 1 aus GA 0/11 S (Mineralstoffe Diabas D, Syenodiorit S, Kalkstein K)
6.2.1.11	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Asphaltgranulat AG 2 von vor 1989 (Mineralstoffe unbekannt)
6.2.1.12	Unlöslicher Bindemittelgehalt im Asphaltgranulat AG 3 (vorwiegender Mineralstoff Orthophyr O und Kalkstein K* n.b.)
6.2.1.13	Unlöslicher Bindemittelgehalt in Bohrkernen aus Abi 0/16 S (Nr. 19, Mischgut aus MA 1 mit vorwiegend Granodiorit G)
6.2.2.1	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Asphaltbinder 0/16 S mit PmB 25 A der MA 1 (Nr. 19) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.2	Auswertung von n Extraktionen von Bohrkernen längerer Liegedauer eines Asphaltbinders 0/16 S (Nr. 19) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.3	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Gußasphalt 0/11 S mit Bitumen 30/45 der MA 2 (Nr. 1205) - Bindemittelgehalt und Korngrößen-verteilung
6.2.2.4	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Splittmastixasphalt 0/11 S mit PmB 45 A der MA 2 (Nr. 1218) - Bindemittelgehalt und Korngrößen-verteilung
6.2.2.5	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und AG 2-Bitumen der MA 3 (Nr. 1220) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.6	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Asphaltbeton 0/11 S mit Bitumen 70/100 der MA 2 (Nr. 1221) - Bindemittelgehalt und Korngrößen-verteilung
6.2.2.7	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70, große Labormischung (Nr. 1222) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.8	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Asphaltbinder 0/16 mit Bitumen 50/70 und AG 1-Bitumen, große Labormischung (Nr. 1223) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung

6.2.2.9	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Splittmastixasphalt SMA 0/8 S mit PmB 65 A, große Labormischung (Nr. 1224) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.10	Auswertung von n Extraktionen eines Mischgutes Asphaltbinder 0/22 S mit Bitumen 30/45 und AG 3-Bitumen, große Labormischung (Nr. 1225) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.11	Auswertung von n Extraktionen eines Asphaltgranulates AG 1, Gußasphalt 0/11 S (Nr. 1168) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.12	Auswertung von n Extraktionen eines Asphaltgranulates AG 2 (Nr. 124) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.2.2.13	Auswertung von n Extraktionen eines Asphaltgranulates AG 3 aus Asphaltbeton 0/11 S und Asphaltbinder 0/22 (Nr. 1199) - Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung
6.3.1.1	Aus Abi 0/16 S (Nr. 19) mit PmB 25 A zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.2	Aus GA 0/11 S (Nr. 1205) mit Bitumen 30/45 zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.3	Aus SMA 0/11 S (Nr. 1218) mit PmB 45 A zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.4	Aus Abi 0/16 + AG 2 (Nr.1220) mit Bitumen 50/70 zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.5	Aus AB 0/11 S (Nr. 1221) mit Bitumen 70/100 zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.6	Aus Abi 0/16 (Nr. 1222) mit Bitumen 50/70 zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.7	Aus Abi 0/16 + AG 1 (Nr. 1223) mit Bitumen 50/70 zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.8	Aus SMA 0/8 S (Nr. 1224) mit PmB 65 A zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.9	Aus Abi 0/22 S + AG 3 (Nr. 1225) mit Bitumen 30/45 zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.10	Aus Asphaltgranulat AG 1 (Nr.1168) mit PmB 45 A zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.11	Aus Asphaltgranulat AG 2 (Nr.124) zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.12	Aus Asphaltgranulat AG 3 (Nr.1199) zurückgewonnenes Bindemittel – Kennwerte
6.3.1.13	Vergleich der Duktilität nach DIN 52 013, der elastischen Rückstellung nach DIN V 52 021 T. 1 und der Kraftduktilität nach mod. TL PmB von Ausgangsbitumen und zurückgewonnenen Bitumen
6.3.1.14	Dichte, Ausdehnungskoeffizient und Asche – ein Vergleich zwischen Ausgangsbitumen und zurückgewonnenen Bitumen

13. Symbole und Abkürzungsverzeichnis

S	Syenodiorit
Q	Quarzporphyr
D	Diabas
L	Lamprophyr
A	Amphibolit
G	Granodiorit
O	Orthophyr
K	Kalkstein
FF	Fremdfüller
EF	Eigenfüller

S(K)	Mineralstoffe von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 bzw. Modell-Asphaltmastix AM 0/2, bestehend aus Syenodiorit und 10 M.-% bzw. 40 M.-% Kalksteinfüller FF
S(S)	Mineralstoffe von Modell-Asphaltbeton 0/11 mit 10 M.-% Eigenfüller EF
Q(K)	Mineralstoffe von Modell-Asphaltbeton AB 0/11 bzw. Modell-Asphaltmastix AM 0/2, bestehend aus Quarzporphyr und 10 M.-% bzw. 40 M.-% Kalksteinfüller FF
Q(Q)	Mineralstoffe von Modell-Asphaltbeton 0/11 mit 10 M.-% Eigenfüller EF usw.
$(B_v)B$	(Zugabe)Bindemittelgehalt in M.-% (zum) im Asphalt
$(M_v)M$	(Zugabe)Mineralstoffgehalt in M.-% (zum) im Asphalt
F ($F_{0,09}$)	Füllergehalt im Mineralstoffgemisch in M.-% < 0,09 mm
F ($F_{0,063}$)	Füllergehalt im Mineralstoffgemisch in M.-% < 0,063 mm
F_v ($F_{M,v}$)	Zugabe-Füllergehalt in M.-% **v**or Extraktion im **M**ineralstoffgemisch
F_n ($F_{M,n}$)	Ergebnis-Füllergehalt in M.-% **n**ach Extraktion im **M**ineralstoffgemisch
F_A ($F_{A,v}$, $F_{A,n}$)	Füllergehalt in M.-% im **A**sphalt
Toluol-K	Kaltextraktion mit Toluol
TRI-H	Heißextraktion mit Trichlorethylen
TRI-K	Kaltextraktion mit Trichlorethylen (an Mischanlage-Sonderfall)
$m_{B,v}$	Masse des Bindemittels in g vor dem Mischen, **v**or der Extraktion
$m_{B,n} = m_{B,lös}$	Masse des zurückgewonnenen Bindemittels in g **n**ach Extraktion
$m_{Bunl,SAP,A} = m_{B,v} - m_{B,n}$	Masse des unlöslichen Bindemittels in g (berechnet nach SAP) im Asphalt
$m_{Bunl,emp,A}$	nach Definiton gemäß DIN 1996 T. 6: $B_{unl,emp,A} * m_A/100) = (0{,}013\ F_M + 0{,}1) * m_A/100) = m_{B,unl,emp,A}$ im Asphalt
$m_{M,v}$	Masse der gesamten eingewogenen Mineralstoffe in g vor Erwärmen, vor Mischen, **v**or Extraktion
$m_{M,n}$	Masse der gesamten aus Asphalt gewonnenen Mineralstoffe in g **n**ach Extraktion
m_A	Masse des Asphaltes (Mischgut, Aspahltgranulat, Bohrkern) in g

$m_{A,theor.}$	Theoretische Masse des Modell-Asphaltes in g aus Summe von $m_{B,v} + m_{M,v}$ in g (Einwaage)
$m_{A,v}$	Masse des tatsächlich nach dem Mischen und Abkühlen gewogenen Modell-Asphaltes in g (Auswaage) vor Extraktion
m_w	Masse von (Kristall)-Wasser in den Mineralstoffgemischen des Modell-Asphaltbetons bzw. des Modell-Asphaltmastix, nach der Ofentrocknung bei 160 °C (Temperatur der Mineralstoffe beim Mischen) nach der vorangegangenen üblichen Trocknung bei 110 ± 5 °C in g
$\Delta m_{A,Verlust}$	ungeklärter Masseverlust von Asphalt nach Mischen und Abkühlen, abzüglich m_w in g
$m_{A,n}$	$m_{B,n} + m_{M,n}$ in g (rechnerisch)
M_{cf}	Anteil der carbonatfreien bzw. HCl-unlöslichen extrahierten Mineralstoffe in M.-%
m_{cf}	Masse der carbonatfreien Teilprobe in g
m_{Corg}	Masse des organischen Kohlenstoffs in der Teilprobe in g
$M_{cf,bl}$	Anteil der carbonatfreien bzw. HCl-unlöslichen nicht mit Bitumen in Kontakt getretenen Mineralstoffen in M.-%
$C_{org,unkorr,EA}$	Gehalt an organischem Kohlenstoff in M.-% in den HCl-unlöslichen extrahierten (vom Bindemittel befreiten) Mineralstoffen ohne Berücksichtigung des Blindwertes (bestimmt im Elemental Analyzer)
$C_{org,bl,EA}$	Gehalt an organischem Kohlenstoff in M.-% in den HCl-unlöslichen nicht mit Bitumen in Kontakt getretenen ausgewählten Mineralstoffen/ Kornklasen (2/5 bzw. 0/0,09)
$C_{org,korr.}$	Gehalt an organischem Kohlenstoff in M.-% in den HCl-unlöslichen extrahierten Mineralstoffen unter Berücksichtigung des Blindwertes
$C_{M,unkorr.}$	Gehalt an organischem Kohlenstoff in M.-% in den gesamten extrahierten Mineralstoffen ohne Berücksichtigung des Blindwertes DIN 1996 T. 6, Anhang C
$C_{M,bl}$	Gehalt an organischem Kohlenstoff in M.-% in den nicht mit Bitumen in Kontakt getretenen ausgewählten Mineralstoffen (2/5 bzw. 0/0,09)
$C_{M,korr.}$	Gehalt an organischem Kohlenstoff in M.-% in den gesamten extrahierten Mineralstoffen unter Berücksichtigung des Blindwertes
E	Empirisches Verfahren zur Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,emp,A} = 0{,}013*F_M + 0{,}1$; DIN 1996 T.6 Abschnitt 8 (10/1988)
Z	Experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,exp}$ mit dem Zentrifugenverfahren; DIN 1996 T.6, Anhang C
F	Experimentelle Bestimmung des unlöslichen Bindemittelgehaltes $B_{unl,exp}$ mit dem Filtrationsverfahren; DIN 1996 T.6, Anhang C
B_{unl}	Unlöslicher Bindemittelgehalt in M.-%
$B_{unl,emp,A}$	Unlöslicher Bindemittelgehalt in M.-% im Asphalt nach Definition gemäß DIN 1996 T.6, empirisch nach der Füllergleichung berechnet $B_{unl,A} = 0{,}013*F_M + 0{,}1$ (realer wäre es, in der Gleichung den Füllergehalt im Asphalt zu berücksichtigen d.h. F* M/A)
$B_{unl,exp,unkorr,M}$	Unlöslicher Bindemittelgehalt in M.-%, experimentell ermittelt ohne Berücksichtigung des Blindwertes der beteiligten Mineralstoffe, im Mineralgemisch (Kornklasse) - mod. Anhang C der DIN 1996 Teil 6 (organischer Kohlenstoff im frischen Mineralstoff wird auch als Bitumen wegen geringfügigen Fehler angenommen)

$B_{unl,exp,korr,M}$	Unlöslicher Bindemittelgehalt in M.-%, experimentell ermittelt mit Berücksichtigung des Blindwertes der beteiligten Mineralstoffe, im **M**ineralgemisch (Kornklasse)- mod. Anhang C der DIN 1996 Teil 6
$B_{unl,exp,korr.,A}$	Unlöslicher Bindemittelgehalt in M.-%, experimentell ermittelt mit Berücksichtigung des Blindwertes der beteiligten Mineralstoffe, im **A**sphalt (Bitumen-Einzelkörnung-Gemisch)
Q_{unl}	prozentuales Verhältnis/ Quotient von experimentell bestimmten unlöslichen Bindemittelgehalt zu mit der Füllergleichung berechneten unlöslichen Bindemittelgehalt ($100*B_{unl,exp,korr,A}/B_{unl,emp,A}$)
SAP	Synthese-Analyse-Prinzip
$B_{unl,SAP,A}$	Unlöslicher Bindemittelgehalt in M.-% **im Asphalt**, berechnet aus $100*(m_{B,v} - m_{B,n})/m_A$ $m_{A,v}$ oder $m_{A,theor}$ (variierte Bezugswerte)
$B_{lös}$	Löslicher Bindemittelgehalt in M.%
$B_{lös,W}$	Löslicher Bindemittelgehalt –Wiedergewinnungsverfahren in M.-%
$B_{lös,D}$	Löslicher Bindemittelgehalt –Differenzverfahren in M.-%
$B_{lös}$*	Löslicher Bindemittelgehalt von Modell-Asphalt, berechnet aus Zugabe-Bindemittelgehalt B_v und vermindert um den nach der Füllergleichung (E) berechneten unlöslichen Bindemittelgehalt $B_{unl,emp,A}$ in M.-%
$B_{lös}$ W-K	Löslicher Bindemittelgehalt in M.-% (**W**iedergewinnung/**K**altextraktion mit Toluol) bezogen auf $m_{A,v}$ oder $m_{A,theor}$ (Bezugswerte)
B_{ges} W-K	Gesamtbindemittelgehalt in M.-% (**W**iedergewinnung/**K**altextraktion mit Toluol) bezogen auf $m_{A,v}$ oder $m_{A,theor}$ (Bezugswerte)
$B_{lös}$ D-EW	Löslicher Bindemittelgehalt in M.-% nach dem **D**ifferenzverfahren berechnet (bei Wiedergewinnung/Kaltextraktion mit Toluol bzw. ohne Wiedergewinnung /Heißextraktion mit Trichlorethylen) auf die theoretische **E**in**w**aage (Summe der Zugabe-Komponenten B + M) an Asphalt $m_{A,theor.}$ bezogen
$B_{lös}$ D-AW	Löslicher Bindemittelgehalt in M.-% nach dem Differenzverfahren berechnet (bei Wiedergewinnung/Kaltextraktion mit Toluol bzw. ohne Wiedergewinnung /Heißextraktion mit Trichlorethylen) auf die Praktische **Aus**waage an Asphalt $m_{A,v}$ nach dessen Mischen und Abkühlen bezogen
B_{ges} D-EW	Gesamtbindemittelgehalt in M.-% nach dem Differenzverfahren berechnet, bezogen auf theoretische **E**inwaage (Summe der Zugabe-Komponenten B + M) an Asphalt $m_{A,theor.}$ bezogen
B_{ges} D-AW	Gesamtbindemittelgehalt in M.-% nach dem Differenzverfahren berechnet, bezogen auf die praktische **A**uswaage an Asphalt $m_{A,v}$ nach dessen Mischen und Abkühlen
$GV_{200,cf}$ ($GV_{T,cf}$)	Glühverlust der HCl-unlöslichen extrahierten Mineralstoffe bei 200 °C (T bei einer beliebigen anderen Temperatur) in M.-%
$GV_{200,M}$ ($GV_{T,M}$)	Glühverlust der extrahierten Mineralstoffe bei 200 °C (T bei einer beliebigen anderen Temperatur) in M.-%
	Vorbehandlung/Vorgeschichte der Modellasphalte vor der Extraktion
1	Sofortextraktion (nach Mischen und Abkühlen)
2	Extraktion nach 4-wöchiger Lagerung
3	Extraktion nach thermischer Beanspruchung (th. B.) des Asphaltes (Luftumwälzung, ohne Abdeckung, T = 163 °C, t = 5 h)
1-**1**/ 2-**1**/ 3-**1**	Test **1** mit Sofortextraktion/4-Wochen-Lagerung/therm. Beanspruchung

th. B.	thermische Beanspruchung von Bitumen nach DIN EN 12607-3 (DIN 52016)
RFT_{500}	Beanspruchung unter Einfluß von Wärme und Luft nach DIN 52016 im 500-ml-Kolben
RFT_{1000}	Beanspruchung unter Einfluß von Wärme und Luft nach DIN EN 12607-3 im 1000-ml-Kolben
EP RuK	Erweichungspunkt Ring und Kugel in °C nach DIN EN 1427
Pen	Penetration in 1/10 mm nach DIN EN 1426
I_p	Penetrationsindex
A_{EP}	Temperatur-Penetration-Anstiegsfaktor (Annahme Penetration am EP RuK beträgt 800 1/10 mm) in K^{-1}
A_{Pen}	Temperatur-Penetration-Anstiegsfaktor (berechnet aus 2 Penetrationen bei unterschiedlichen Temperaturen) in K^{-1}
$I_{P,EP}$	Penetrationsindex nach DIN EN 12291, mod. Anhang B (gemäß Pfeiffer Doormaal)
$I_{P,Pen}$	Penetrationsindex, aus zwei Penetrationen bei unterschiedlicher Prüftemperatur ermittelt
β	Volumenausdehnungskoeffizient in K^{-1}
n.b.	nicht bestimmt, nicht bestimmbar, nicht bekannt
w	wiederholte Bestimmung eines Kennwertes
o. Anf.	ohne Anforderung gemäß Regelwerken
KV	Korngrößenverteilung der extrahierten Mineralstoffe nach DIN 1996 T. 14
p	Porosität von Kornklassen der Mineralstoffe in Vol.-%
d	Dichtigkeitsgrad von Kornklassen der Mineralstoffe
AG	Asphaltgranulat
MA	Mischanlage
L	Labormischung