Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

DIPLOMARBEIT

Einsatz von Submikro- und Nano-Zusätzen in Asphaltgemischen

eingereicht von: Bettina Müller
geb. am: 15.08.1975 in Friedrichroda
Seminargruppe: B / 95 / L
Matrikelnummer: 950128

Reg.-Nr. B / 2005 / 114

Erstprüfer: Dr.-Ing. Hutschenreuther
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Viehmann

Ausgabedatum: 20.12.2005
Abgabedatum: 20.03.2006

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis 6
0 Einleitung 7
1 Submikro- und Nanotechnologie 8
1.1 Teilchen im Submikro- und Nanobereich 8
1.2 Einsatzbereiche 9
1.3 Forschung und Entwicklung in der Nanotechnologie 10
2 Herkömmliche Additive und ihre Eigenschaften 12
2.1 Stabilisierende Zusätze 12
2.2 Viskositätssenkende Additive 14
3 Versuchsprogramm 16
3.1 Versuchsmaterialien 16
3.1.1 Bindemittel 16
3.1.2 Mineralstoff 16
3.1.3 Asphaltbeton 0/11 S 17
3.1.4 Additive 18
3.2 Herstellung der Mischungen 21
3.2.1 Bitumenmodifizierung 21
3.2.2 Asphaltmischung 22
3.3 Versuchsbeschreibung 23
3.3.1 Bitumenprüfungen 23
3.3.2 Mischgutprüfungen 26
4 Übersicht Messergebnisse 32
4.1 Ergebnisse Bitumenuntersuchungen 32
4.1.1 Nadelpenetration, EP RuK, BP nach Fraaß 32
4.1.2 Plastizitätsspanne - EP RuK und BP nach Fraaß 33
4.1.3 Viskosität 34
4.1.4 Duktilität und Elastische Rückstellung 38
4.2 Ergebnisse Mischgutuntersuchungen 40
4.2.1 Affinität 40
4.2.2 Ablauftest 41
4.2.3 Temperaturabhängige Verdichtung 41
4.2.4 Marshall-Stabilität, -Fließwert 43

4.2.5 Spurbildungsversuch 46
5 Vergleichende Betrachtung 48
6 Zusammenfassung 54
7 Ausblick 58
Literaturverzeichnis 59
Abbildungsverzeichnis 65
Tabellenverzeichnis 66
Anhang 67
Selbstständigkeitserklärung I

Abkürzungsverzeichnis

Bindemitteluntersuchungen

Pen	[1/10 mm]	Nadelpenetration
EP RuK	[°C]	Erweichungspunkt Ring und Kugel
BP	[°C]	Brechpunkt nach Fraaß
Duk	[cm]	Duktilität
EVT 100	[°C]	Äquiviskositätstemperatur, Viskosität des Bindemittels bei der Herstellung des Mischguts
EVT 1000	[°C]	Äquiviskositätstemperatur, Obere Viskositätsgrenze des Bindemittels, bei der der Einbau von Walzasphalt gerade noch möglich ist
Δ EVT	[°C]	Differenz zwischen EVT 100 und EVT 1000

Asphaltuntersuchungen

ρ_a	[g/cm³]	Raumdichte
ρ_r	[g/cm³]	Mischgutrohdichte
ρ_b	[g/cm³]	Bindemitteldichte
H	[Vol.-%]	Hohlraumgehalt
H_A	[%]	Ausfüllungsgrad
B	[Gew.-%]	Bindemittelgehalt
S	[kN]	Marshall-Stabilität
f	[mm]	Marshall-Fließwert

0 Einleitung

Die Belastung von Verkehrsflächen durch eine wachsende Anzahl von Kraftfahrzeugen, dem Zuwachs von Schwerlastverkehr und Achslasten hat in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen. Ein Weg, den gestiegenen Anforderungen an Fahrbahnbefestigungen zu begegnen, ist der Einsatz von Additiven zur Modifizierung der Asphalt- bzw. Bitumeneigenschaften. Mit der Zugabe verschiedener Additive sollen Gebrauchseigenschaften von bituminösen Fahrbahnbefestigungen verbessert und eine ausreichende Nutzungsdauer gewährleistet werden.
Auf dem Markt befinden sich derzeit eine Vielzahl von Additiven aus variierenden Ausgangsstoffen, mit unterschiedlichen Wirkungen auf Bitumen und Asphalt. Gezielte Untersuchungen bezüglich des Einsatzes von Produkten in Asphalt, deren Abmessungen im Nanobereich liegen, wurden bislang kaum vorgenommen.

Einblick in Mechanismen und Wirkungen von Nanomaterialien gibt die Nanotechnologie. Diese beschäftigt sich mit der Erforschung, Bearbeitung und Produktion von Nanometer großen Gegenständen oder Strukturen. [ENZYKLOPÄDIE 2006a]
Sie ist eine so genannte Trendtechnologie, die zukünftig eine breite Palette neuer Möglichkeiten in der Elektronik, Biotechnologie, Chemie, Medizin oder Ingenieurwissenschaft eröffnen soll. Bisher existieren nur wenige Anwendungen von nanogroßen Werkstoffen, viele befinden sich noch in der Entwicklung und Forschung.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen neue Additive im Submikro- und Nanobereich hinsichtlich ihrer Eignung zum Einsatz in Bitumen respektive Asphalten getestet und mit herkömmlichen Additiven verglichen werden. Der Einfluss auf die Eigenschaften von Bitumen und Asphalt wird unter Variation der Zugabemengen der Additive mittels einer Reihe von Bitumen- und Asphaltuntersuchungen geprüft.
Es soll untersucht werden, ob mit diesen Zusätzen eine Kombination mehrerer verbesserter Produkteigenschaften erzielt werden kann.

1 Submikro- und Nanotechnologie

1.1 Teilchen im Submikro- und Nanobereich

Der Begriff *Nano* hat seinen Ursprung im Griechischen, dort bedeutet das Wort *nãnnos* Zwerg. Er wird unter anderem als Vorsilbe für z. B. Maßeinheiten wie Nanometer verwendet. Die Größe eines Nanometers entspricht 10^{-3} Mikrometern oder auch 10^{-9} Metern (1 nm = 10^{-3} µm = 10^{-9} m). Ein Nanoteilchen kann aus wenigen Atomen oder Molekülen bestehen und eine Größe von einigen Nanometern haben. [ENZYKLOPÄDIE 2006a]

Die Größe von Submikroteilchen würde dem Namen nach zwischen Mikro- und Nanobereich angeordnet sein.

Typische Eigenschaft für Submikro- und Nanoteilchen ist ihre chemische Reaktivität. Die Submikro- und vor allem die Nanoteilchen weisen im Vergleich zum Volumen extrem hohe Teilchenoberflächen auf. Auf diesen Umstand ist die chemische Reaktionsfreudigkeit zurück zu führen. In Abhängigkeit von der Art des Ausgangsmaterials sowie der Form und Größe der Teilchen ergeben sich weitere Eigenschaften, wie z. B. die Leitfähigkeit oder die Fähigkeit, Licht mit spezifischen Wellenlängen zu absorbieren. [ENZYKLOPÄDIE 2006a]

Besondere Beachtung unter den Nanoteilchen finden Nanoröhren, insbesondere Kohlenstoffnanoröhren. Diese verfügen meist über einen Durchmesser zwischen 1 - 50 nm und Längen von mehreren Millimetern. Auf Grund ihres Aufbaus (siehe Abb. 1.1) besitzen sie die Eigenschaft der elektrischen Leitfähigkeit, die in Abhängigkeit von der Struktur unterschiedlich stark ausgebildet ist. [ENZYKLOPÄDIE 2006b]

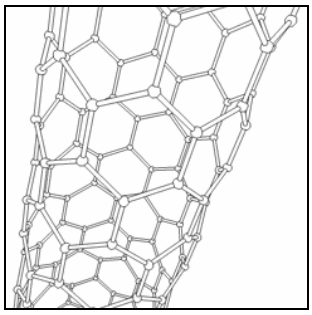


Abb. 1.1: Schematische Darstellung einer Kohlenstoffnanoröhre [ENZYKLOPÄDIE 2006b]

1.2 Einsatzbereiche

Noch steht die Forschung über die Einsatzmöglichkeiten von Submikro- und Nanoteilchen am Anfang. Einige der bereits möglichen Anwendungen werden hier kurz angeführt.

Zu den ältesten Nanowerkstoffen zählt Beton, auch wenn dieser Umstand erst mit der Entwicklung des Elektronenmikroskops zu Tage trat. Die Größe der Kristallstrukturen, auf denen die Festigkeit von Beton beruht, bewegt sich im Nanometerbereich. [ENZYKLOPÄDIE 2006a]

Bekannt ist bei Beton der Einsatz von Mikrosilika zur Verbesserung des Betongefüges, z. B. für die Herstellung von Hochfestem Beton. Die Silikapartikel sind ca. 30- bis 100-mal kleiner als die Zementpartikel. Ihre Größe liegt im Durchschnitt bei 0,10 µm - 0,25 µm, also im Submikrobereich. Somit sind sie in der Lage, zusätzlich Porenräume zwischen den Zementkörnern auszufüllen und wirken so als Füller. Durch ihren Einsatz kann eine puzzolanische Sekundärreaktion zwischen Calciumhydroxid, das bei der Zementhydratation entsteht, und dem Silikatstaub ablaufen, als dessen Ergebnis zusätzliche Calciumsilikathydrate, so genannte C-S-H-Phasen, gebildet werden. Die C-S-H-Phasen sind Hauptträger der Festigkeit im Beton. Weiterhin wird der Verbund zwischen Zementstein und Mineralstoff durch die Zugabe von Mikrosilika verbessert. [STARK 2000]

Als spezieller Zusatzstoff können Nanosilika u. a. zur Herstellung von Selbstverdichtenden Beton Anwendung finden. Dieser kommt ohne von außen zugeführte Verdichtungsenergie (Rütteln) aus, fließt, entlüftet und verdichtet sich vollständig unter seinem eigenen Gewicht. [HILLEMEIER 2001]

Nanoteilchen können auch Anwendung in so genannten Nanobeschichtungen finden. Dazu werden sie auf die gewählte Werkstoffoberfläche aufgebracht, wo sie sich selbstständig zu der gewünschten Struktur organisieren. Ursache dafür ist laut *HILLEMEIER 2001* das Bestreben der Atome und Moleküle »…sich innerhalb des Werkstoffs nach dem Minimum ihrer Energie anzuordnen…«.

An glatten Oberflächen verbinden sich die Nanoteilchen fest mit der Oberfläche, wodurch diese wasserabweisend werden und somit leichter zu reinigen sind. Durch wiederholte Beschichtung einer solchen Oberfläche mit Nanopartikeln wird der so genannte *Lotus-Effekt* erzielt. Dieser beruht nach *BOTANIK 2006* auf der Tatsache, dass eine Minimierung von Kontaktflächen (z. B. durch Nanoteilchen) die Haftung

von Schmutzpartikeln und Flüssigkeiten vermindert. Damit werden Oberflächen auch abweisend gegenüber Ölen, Fetten und Säuren. Sie sind chemisch beständig. [SCHNEPPAT 2006]



Abb. 1.2: Fassadenbeschichtungen mit *Lotus-Effekt* [LOTUSAN 2006]

Bei porösen Oberflächen können die aufgebrachten Nanoteilchen in die Poren eindringen, sie ausfüllen und somit einen Befall durch Pilze, Flechten, Algen oder Moose nahezu vollständig unterbinden sowie das Eindringen von Schmutzpartikeln und Flüssigkeiten verhindern. Wie die glatten Oberflächen werden auch die porösen somit wasserabweisend. [SCHNEPPAT 2006]
Auf die gleiche Art können auch Textilien behandelt werden. Hier können Schmutzpartikel und Flüssigkeiten durch die Ummantelung der einzelnen Fasern mit einer Nanobeschichtung nicht mehr in diese eindringen und perlen ab.
Neben Textilien können Nanobeschichtungen auch auf Werkstoffen wie Metallen, Glas, Beton, Keramik, Naturstein u. v. m. aufgebracht werden. [SCHNEPPAT 2006]

Abgesehen von den bereits angewandten Techniken befinden sich noch viele weitere in der Entwicklung und Forschung. Im Folgenden sollen einige davon näher betrachtet werden.

1.3 Forschung und Entwicklung in der Nanotechnologie

Mit Hilfe der Nanotechnologie soll unter anderem die weitere Miniaturisierung der Halbleiterelektronik und der Optoelektronik erfolgen. In dieser Hinsicht haben besonders Kohlenstoffnanoröhren auf Grund ihrer Leitfähigkeit Bedeutung. Sie sollen in Transistoren, als Nanoröhrenspeicher, in Displays oder in der Messtechnik Anwendung finden. [ENZYKLOPÄDIE 2006b]
Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von Kohlenstoffnanoröhren stellt ihr Einsatz zur Verbesserung von Kunststoffen dar. Werden sie den Polymeren zugemischt,

können sie die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes stark verbessern und ihm zudem eine elektrische Leitfähigkeit verleihen. [NANOTECH 2006]

Zahlreiche Untersuchungen mit Nanoteilchen werden im Bereich der Medizin durchgeführt. Hier sollen sie z. B. als Trägersysteme für den gezielten Transport von Wirkstoffen zu kranken Organen eingesetzt werden. Implantate mit Oberflächen aus Nanostrukturen könnten langlebiger und vor allem bioverträglicher sein. Im Bereich der Diagnostik sollen nanopartikuläre Kontrastmittel entwickelt werden, die sich spezifisch an kranke Zellen binden und diese so über bildgebende Verfahren wie Computer- oder Magnetresonanztomographie sichtbar machen. [BMBF 2006a]

Auch im Automobilbereich ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für Nanoprodukte. Hierzu wird ihr Einsatz zur Optimierung des Verbrennungsprozesses und der Abgasreinigung untersucht. Weiterhin können sie zur Entwicklung selbstheilender Lacke beitragen, die Abriebfestigkeit und die Haftung der Reifen verbessern. [BMBF 2006b]

Bei den vielfältigen Möglichkeiten, die sich aus Nutzung der Nanotechnologie ergeben, dürfen die gesundheitlichen Effekte, die Nanoteilchen haben können, nicht außer Acht gelassen werden. Auf Grund ihrer Größe sind Nanoteilchen lungengängig und können eingeatmet werden. Die Auswirkungen sind noch unbekannt und bedürfen genauerer Untersuchungen. [ENZYKLOPÄDIE 2006a]

2 Herkömmliche Additive und ihre Eigenschaften

Additive sind »…Zusatzstoffe, die Produkten zugesetzt werden, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen…«. [ENZYKLOPÄDIE 2006c]

So sollen Additive im Asphaltbau die Gebrauchseigenschaften von Fahrbahnbefestigungen verbessern und / oder die Nutzungsdauer verlängern. Genauer bedeutet das Forderungen nach besserer Verdichtbarkeit von Asphaltgemischen, nach höherer Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdung, Verformung und thermischer Rissbildung sowie einer höheren Unempfindlichkeit gegenüber Einwirkung von Wasser. Auch können Additive, wie Pigmente, zur Farbgebung von Asphalt eingesetzt werden. Darauf wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.
Nach *GAUER 1995* ist der ideale Zusatzstoff so beschaffen, dass er außer seiner originären Aufgabe weder Auswirkungen auf Grundeigenschaften des Bitumens hat, noch die Bindemittelmenge beeinflusst. Er stellt aber ebenfalls fest, dass es kaum auszuschließen ist, dass Zusätze auch Einfluss auf die Mörteleigenschaften des fertigen Asphalts haben.

2.1 Stabilisierende Zusätze

Als so genannte stabilisierende Zusätze werden nach *ZTV-ASPHALT-STB 01* die Produktgruppen Fasern, pulverförmige Stoffe sowie Kunststoff- und Kautschukprodukte eingesetzt. Typische Vertreter dieser Gruppen sind in Tab. 2.1 aufgeführt. Laut *Suss 1993* betragen die Zugabemengen der stabilisierenden Zusätze zwischen 0,3 Gew.-% bis 1,5 Gew.-% vom Mischgut. Ausgenommen davon sind die Polymerzusätze, da sie sich in heißem Bitumen auflösen. Genaue Zugabemengen sind herstellerabhängig und den jeweiligen Produktblättern zu entnehmen.

Stabilisierende Zusätze sollen ein Ablaufen des Bitumens vom Mineralstoff verhindern und so einem Entmischen des Asphalts bei Herstellung, Transport und Einbau entgegenwirken. Daneben weisen sie aber noch weitere Einflüsse auf Asphalt auf.
Während Fasern und pulverförmige Stoffe die Bindemittel physikalisch stabilisieren, durch Anlagerung auf den meist sehr großen Oberflächen, beeinflussen die Kunststoff- und Kautschukprodukte die molekularen Verbindungen von Bindemitteln und führen so durch Veränderung der Bindemittelstruktur zu einer Art innerer Stabilisierung. [GAUER 1995]

Tab. 2.1: Gruppen stabilisierender Zusätze [SUSS 1993]

Fasern	Cellulosefasern Mineralfasern Synthetische Fasern
Pulverförmige Stoffe	Kieselsäure Besondere Füller Kalkhydrat
Kunststoffe, Kautschuk	Gummi, Latex Polymere

Im Folgenden sollen einige Produkte der verschiedenen Gruppen näher betrachtet werden. Genauere Angaben über ihren Einfluss auf Bitumen- und Asphaltkennwerte sind in Kap. 5 dargestellt.

Cellulosefasern gelten als organische Fasern. Sie werden aus dem Ausgangsmaterial Holz gewonnen und meist mit anorganischen Verbindungen auf Silikatbasis modifiziert, um ihre Hitzebeständigkeit zu erhöhen. Die durchschnittliche Länge von Cellulosefasern beträgt 1,1 mm und ihre durchschnittliche Dicke 0,045 mm. [RUWENSTROTH 2003, SUSS 1993]
Mineralfasern sind, wie der Name schon sagt, mineralisch. Das Ausgangsgestein wird bei hohen Temperaturen aufgeschmolzen und anschließend zerfasert. Die durchschnittliche Dicke der Mineralfasern beläuft sich auf 0,004 mm bei einer durchschnittlichen Länge von max. 1,5 mm. [ARAND 2000]
Die Fasern bewirken eine Bindemittelversteifung, also eine Konsistenzerhöhung. Dabei versteifen die Fasern das Bindemittel, wie von *GAUER 1995* bestätigt, schon bei geringen prozentualen Anteilen. Sie verursachen weiterhin eine starke Viskositätserhöhung des Bitumens und damit zusammenhängend auch Erhöhungen von Herstellungs- und Einbautemperatur von Asphaltgemischen mit diesem Zusatz.

Kalkhydrat gehört wie Kieselsäure zur Gruppe der pulverförmigen Stoffe. Kalkhydrat, auch Calciumhydroxid oder gelöschter Kalk genannt, ist ein weißes Pulver, das durch das so genannte Kalklöschen entsteht. [SUSS 1993]
Der Rohstoff für synthetische Kieselsäure ist Sand. Die kugelförmigen Teilchen haben eine Größe zwischen 0,05 mm bis 0,20 mm. [RUWENSTROTH 2003]

Polymere als Vertreter der Gruppe Kunststoffe und Kautschuk können aus verschiedenen Ausgangsstoffen hergestellt werden, z. B. Polyolefine, Synthesekautschuk oder Thermoelastischem Gummi. [RUWENSTROTH 2003]
Polymere bilden zusammen im Gemisch mit Bitumen so genannte Polymermodifizierte Bitumen (PmB). Sie sollen eine bessere Haftung an Mineralstoffen, vergrößerte Plastizitätsspannen, große elastische Rückformungen nach Entlastung, höhere Ermüdungsfestigkeit und geringere Alterung bewirken. [SHELL 1994]
Untersuchungen an Polymermodifizierten Bitumen wurden z. B. von *PAULMANN 1985* durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass die Kennwerte von PmB stark von der Art und Sorte des Ausgangsbitumens, der Art, Menge und vom Zugabemodus des Zusatzes sowie der Verteilung im Bitumen abhängig sind.

Bezug nehmend auf *ARAND 2006* kann Naturasphalt ebenfalls zu den stabilisierenden Zusätzen gezählt werden.
Er besteht zu je einem Drittel aus Wasser, Bitumen und Mineralstoffen und soll die Affinität, den Verformungswiderstand von Asphalt und die Alterungsbeständigkeit von Bitumen erhöhen. Naturasphalt kann aus dem größten natürlichen Asphaltvorkommen der Welt, dem Pitch Lake, einem Asphaltsee der Insel Trinidad, abgebaut werden. [ENZYKLOPÄDIE 2006d]

2.2 Viskositätssenkende Additive

Zu den neueren Entwicklungen zählen die so genannten Viskositätssenkenden Additive, wie Wachse und Fischer-Tropsch-Paraffine.

Tab. 2.2: Viskositätssenkende Additive [BUTZ 2003]

Wachse	z. B. Montanwachs
Paraffin	z. B. Fischer-Tropsch-Paraffin

Ihre Entwicklung wurde auf Grund der hohen Misch- und Einbautemperaturen, die sich durch die hohen Viskositäten bei der Verwendung von PmB im Asphalt ergeben, notwendig. Diese bedingen nicht nur einen hohen Energieaufwand, sondern bergen auch eine potenzielle Gefahr der Bitumenalterung. Dem soll durch so genannte Viskositätssenkende Additive entgegen gewirkt werden. Ein weiterer positiver Aspekt ist die Verringerung von Schadstoffemissionen während des Einbaues von Asphalt, bedingt durch die niedrigere Einbautemperatur.

Viskositätssenkende Additive senken laut *BUTZ 2003* die Viskosität im Verarbeitungstemperaturbereich unter gleichzeitiger Erhöhung der Bindemittelsteifigkeit im oberen Gebrauchstemperaturbereich.

Bestätigt wird das durch *DAMM 2002a*. Er beschreibt, dass Asphaltverflüssiger bei ca. 80 °C vom festen in den flüssigen Zustand übergehen. Somit können sie die Viskositäten der Bitumen oberhalb dieser Temperatur deutlich herabsenken. Beim Abkühlen wiederum kristallisieren die Verflüssiger in feinster Verteilung im Bitumen aus und Versteifen so das Bindemittel. Auf Grund dieser Eigenschaften bewirken sie bei hohen Temperaturen, z. B. im Sommer, eine höhere Steifigkeit, sind aber viskositätssenkend im Herstellungs- und Verarbeitungstemperaturbereich von Asphalt. Einfluss auf die Tieftemperatureigenschaften üben sie nicht aus. Sie können zusätzlich zu Polymeren im Bitumen, als so genannte ‚Co-Modifier' eingesetzt werden. Die Zugabemenge beträgt 3 Gew.-% bezogen auf die Bindemittelmenge. [DAMM 2002a, DAMM 2002b]

3 Versuchsprogramm

Es sollen die Auswirkungen der Zusätze auf die Kennwerte des Straßenbaubitumens B 50/70 sowie auf das mechanische Verhalten von Probekörpern aus Asphaltbeton AB 0/11 S untersucht werden. Die Zugabe der Additive erfolgt in unterschiedlichen prozentualen Mengen. Die so entstandenen Mischungen werden zum Vergleich einer zusatzfreien Mischung gegenübergestellt.

Alle Asphalt- und Bitumenuntersuchungen wurden im Asphaltlabor der Firma Dr. Hutschenreuther Ingenieurgesellschaft für bautechnische Prüfungen mbH, Weimar-Legefeld durchgeführt. Die mikroskopischen Aufnahmen der Additive konnten mit Hilfe des Messlabors der Professur „Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung“ an der Bauhaus-Universität Weimar hergestellt werden.

3.1 Versuchsmaterialien

3.1.1 Bindemittel

Als Bindemittel kam Straßenbaubitumen der Sorte B 50/70 der Total Deutschland GmbH zum Einsatz. Die Kennwerte des Bitumens sind in Tab. 3.1 dargestellt.

Tab. 3.1: Anforderungen an Straßenbaubitumen B 50/70 nach DIN EN 12591

		Bitumen 50/70
Penetration bei 25 °C	0,1 mm	50 - 70
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	48 - 54
Brechpunkt nach Fraaß	°C	-8

Das Bindemittel wurde in Eimern á 5 kg geliefert. Um ein mehrmaliges Erhitzen des Bitumens und somit eine Veränderung der Bindemittelkennwerte zu vermeiden sowie auf Grund der Gerätevorgaben zum Bitumenmischen, wurden Mengen zwischen 300 g und 700 g in kleinere Gefäße umgefüllt.

3.1.2 Mineralstoff

Für die Herstellung der zu untersuchenden Asphaltmischungen kam ein Mineralstoffgemisch, basierend auf Diabas, zur Anwendung. Diabas ist ein vulkanisches Gestein mit einer Rohdichte zwischen 2,75 - 2,95 g/cm³. Weitere typische Kennwerte von Diabas sind in Tab. 3.2 dargestellt.

Tab. 3.2: Charakteristische Kennwerte von Diabas [DIABAS 2006]

Wasseraufnahme	0,1 - 0,4 Gew.-%
Druckfestigkeit	180 - 250 N/mm²
Biegezugfestigkeit	15 - 25 N/mm²

Die Farbe des Gesteins ist dunkelgrün bis schwarzgrün.
Die einzelnen Komponenten des Mineralstoffgemisches und die entsprechenden ermittelten Rohdichten ρ sind nachfolgend aufgeführt:

- Diabasedelsplitt 8/11 mm ρ = 2,800 g/cm³
- Diabasedelsplitt 5/8 mm ρ = 2,808 g/cm³
- Diabasedelsplitt 2/5 mm ρ = 2,787 g/cm³
- Diabasedelbrechsand 0/2 mm ρ = 2,889 g/cm³
- Natursand 0/2 mm ρ = 2,629 g/cm³
- Kalksteinmehl 0/0,09 mm ρ = 2,743 g/cm³

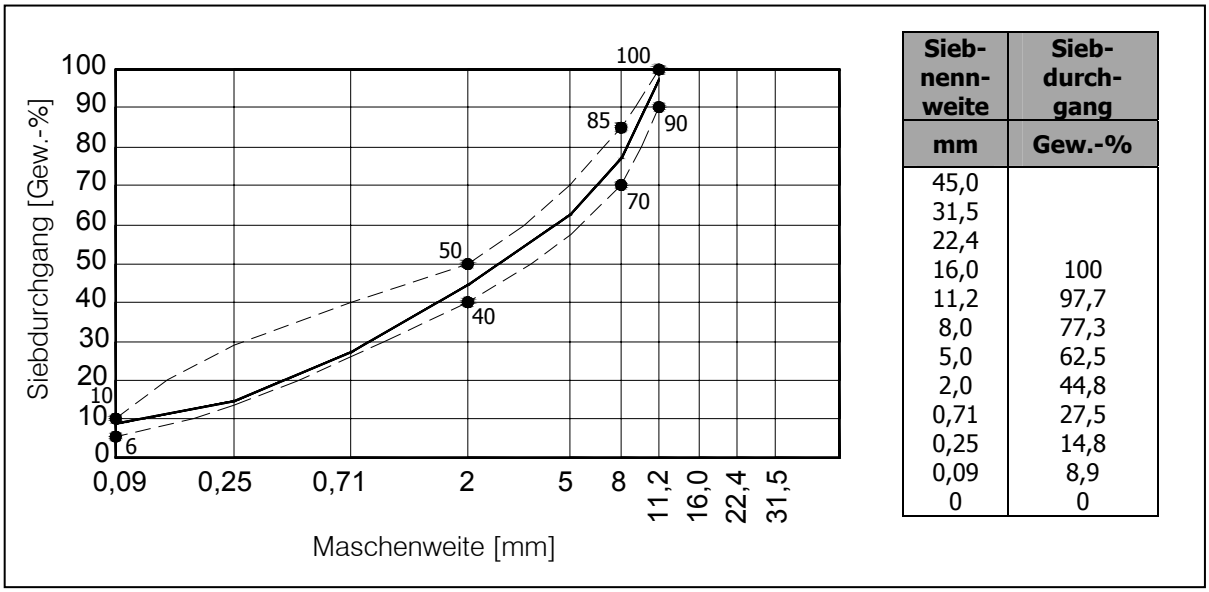
3.1.3 Asphaltbeton 0/11 S

Für die Untersuchungen an Asphaltprobekörpern wurde ein Asphaltbeton 0/11 S gewählt. Als Grundlage für die Herstellung der Asphaltmischungen erfolgte eine Eignungsprüfung nach dem Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt [FGSV 1998] (siehe 3.3.2.1). Die Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches ist in Tab. 3.3 und in Abb. 3.1 dargestellt.

Tab. 3.3: Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches für Asphaltbeton 0/11 S

Nr.	Mineralstoffart		Körnung [mm]	Herkunft/Lieferant	Zugabe [Gew.-%]
1	Diabas	Edelsplitt	8/11	Nesselgrund	24
2	Diabas	Edelsplitt	5/8	Nesselgrund	14
3	Diabas	Edelsplitt	2/5	Nesselgrund	15
4	Diabas	Edelbrechsand	0/2	Nesselgrund	25
5	Natursand		0/2	Schwabhausen	17
6	Kalkstein	Steinmehl	0/0,09	Meiningen/Herpf	5

Als Bindemittel für die Herstellung des Asphaltbetons 0/11 S kam Straßenbaubitumen B 50/70 zur Anwendung. Der Bindemittelgehalt wurde nach erfolgter Eignungsprüfung auf 5,9 Gew.-%, bezogen auf die Summe der Mineralstoffe, festgelegt.



Siebnennweite	Siebdurchgang
mm	Gew.-%
45,0	
31,5	
22,4	
16,0	100
11,2	97,7
8,0	77,3
5,0	62,5
2,0	44,8
0,71	27,5
0,25	14,8
0,09	8,9
0	0

Abb. 3.1: Sieblinienverlauf Asphaltbeton 0/11 S

3.1.4 Additive

Als Additive kamen zwei Fasertypen und zwei Nanoschichtsilikate zur Anwendung, die von der Werkstoffsysteme GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Sie wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht hinsichtlich einer Verwendbarkeit in Asphalt untersucht. Ihre Auswahl erfolgte in Abstimmung mit Herrn Dr. Hutschenreuther. Auswahlkriterium war dabei die Teilchengröße der Materialien, die sich im Submikro- oder Nanobereich bewegen sollte.

Während unter Zusatz der Fasern sowohl Bitumen- als auch Asphaltuntersuchungen durchgeführt wurden, fanden mit den Nanoschichtsilikaten nur Bitumenuntersuchungen statt. Die Zugabe der Additive zum Bindemittel und Mischgut erfolgte in unterschiedlichen prozentualen Anteilen, mit 2 bzw. 5 Gew.-% bezogen auf das Bindemittel. Soweit nicht gesondert gekennzeichnet, beziehen sich die Zugabemengen des Weiteren auf das Bindemittel.

Genauere Angaben über die verwendeten Additive als im Folgenden aufgeführt, standen nicht zur Verfügung.

3.1.4.1 Fasern

Die untersuchten Fasern sind modifizierte technische Cellulosefasern mit 35 Gew.-% mineralischen Komponenten. Sie liegen in Pulverform vor und haben eine Schüttdichte von 0,15 bis 0,20 g/cm³. Bezogen auf die Partikelanzahl ist der häufigste Faserdurchmesser < 10 µm und die häufigste Faserlänge 10 µm. Damit sind sie dem

Mikro- bis Submikrobereich zuzuordnen. Die Farbe der Fasern ist grau. [WERRA WHISK M0, WERRA WHISK F]



Abb. 3.2: Faser 1 (F1) und Faser 2 (F2)

Die zwei für die Untersuchung herangezogenen Fasern *(A)M0 - werra whisk^R M0*, im Folgenden Faser 1 genannt, und *F 0,8 - 0,9 - werra whisk^R F0,8-0,9*, Faser 2, unterscheiden sich laut Produktblatt durch ihre mit einem Alpine-Luftstrahlsieb nach DIN 53734 ermittelte Teilchengrößenverteilung. Beide finden bisher Anwendung in Kunststoffen und in der Bauchemie. [WERRA WHISK M0, WERRA WHISK F]

Faser 1 (F1):

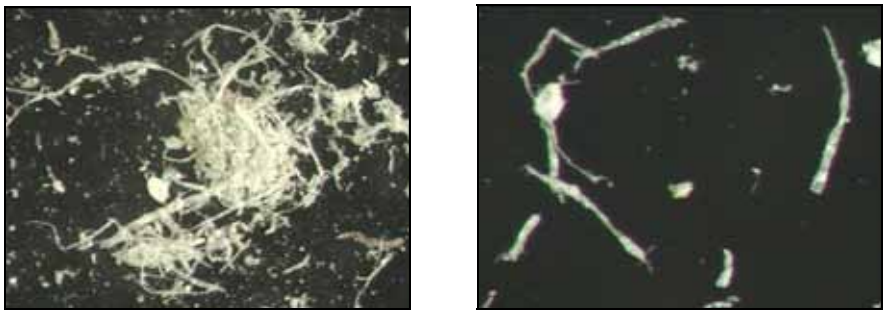


Abb. 3.3: v.l.n.r. Faser 1 in 32facher und in 66facher Vergrößerung

Die Teilchengrößenverteilung in Gew.-% stellt sich für Faser 1 wie folgt dar:

Tab. 3.4: Teilchengrößenverteilung (Gew.-%) nach DIN 53734 für F 1 [WERRA WHISK M0]

0 bis 40 µm	35 %
40 bis 63 µm	15 %
63 bis 90 µm	12 %
90 bis 200 µm	30 %
200 bis 315 µm	5 %
> 315 µm	3 %

Faser 2 (F2):

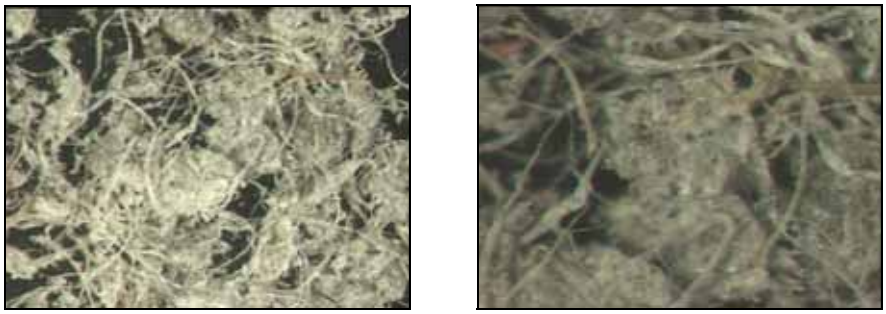


Abb. 3.4: v.l.n.r. Faser 2 in 32facher und in 66facher Vergrößerung

Die Teilchengrößenverteilung in Gew.-% stellt sich für Faser 2 wie folgt dar:

Tab. 3.5: Teilchengrößenverteilung (Gew.-%) nach DIN 53734 für F 2 [WERRA WHISK F]

> 90 µm	62 %
> 250 µm	26 %
> 315 µm	21 %
> 400 µm	12 %
> 500 µm	5 %

3.1.4.2 Nanoschichtsilikat

Weiterhin sollen unterschiedliche Nanoschichtsilikate zur Anwendung kommen.

Die beiden zur Untersuchung herangezogenen Nanoschichtsilikate haben eine Dimension von ca. 200 nm und ein l/d-Verhältnis von 100-1000:1. Sie liegen somit im Submikro- bis Nanobereich. [SCHÖNEBURG 2006]

Schichtsilikate wurden bisher unter anderem in organischen Polymeren eingesetzt. Hier trugen sie als Füllstoff zu einer Erhöhung der Festigkeit bei.

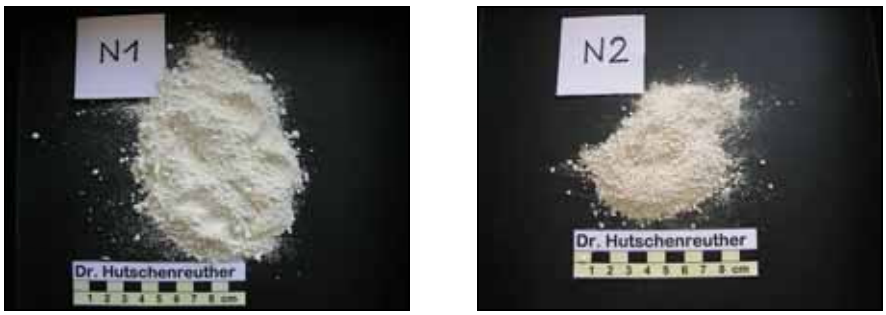


Abb. 3.5: Nanoschichtsilikat 1 (N1) und Nanoschichtsilikat 2 (N2)

Es wird angenommen, dass die Nanoschichtsilikate zu einer Erhöhung der Standfestigkeit von Asphalt beitragen können, bei geringerer Neigung zu Rissbildung und Versprödung. [SCHÖNEBURG 2006]

3.2 Herstellung der Mischungen

Eine generelle Vorgehensweise für die Verarbeitung der zum Einsatz kommenden Additive war im Vorfeld dieser Arbeit nicht bekannt. Deshalb erfolgten die Mischvorgänge in Anlehnung an die Verarbeitungsprozesse herkömmlicher Additive.

3.2.1 Bitumenmodifizierung

Zur Modifizierung des Bitumens kam ein Dispersionsgerät, PT 3100 Polytron (siehe Abb. 3.6), zum Einsatz. Bedingt durch dessen Größe und praktische Anwendbarkeit betrug die maximal verarbeitbare Bitumenmenge 700 g.

Tab. 3.6: Bezeichnung und Zugabemenge der Additive für Bitumenprüfungen

Bezeichnung	Zugabe zu Bitumen	
	Kurz	[%]
Referenzprobe	B0	-
Faser 1	F1	2; 5
Faser 2	F2	2; 5
Nanoschichtsilikat 1	N1	2; 5
Nanoschichtsilikat 2	N2	2; 5

In Tab. 3.6 sind die im Folgenden verwendeten Kurzbezeichnungen der modifizierten Bitumen abgebildet (Bsp. Faser 1, Zugabemenge 2 Gew.-% → F1-2%).
Um die Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, wurde vor der Zugabe der Additive die erforderliche Bitumenmenge in einer Wärmekammer in einem abgedeckten Gefäß auf 145 °C erhitzt.



Abb. 3.6: Dispersionsgerät zum Mischen von Bitumen und Fasern

Mit Erreichen der Verarbeitungstemperatur wurden die Additive in der festgelegten Menge dem Bitumen mit Hilfe des Dispersionsgerätes zugegeben. Durch die An-

wendung eines Temperatur Mess- und Reguliergerätes von emtec sowie einer Heizplatte konnte die Mischtemperatur konstant zwischen 140 - 150 °C gehalten werden. Das Einmischen erfolgte mit 3600 Umdrehungen/min. Dabei war auf ein Auflockern der Additive zu achten, um ein Zusetzen des Rührers zu verhindern. Zur Gewährleistung der Homogenisierung betrug die Einmischzeit nach Zugabe der Additive 5 Minuten.
Die Verarbeitung des mit Fasern modifizierten Bitumens musste direkt im Anschluss an den Mischvorgang durchgeführt werden, da sich sonst die Fasern am Gefäßboden absetzten.

3.2.2 Asphaltmischung

Die Herstellung des Asphaltmischgutes wurde gemäß DIN 1996-20 durchgeführt. Dafür stand ein beheizbarer Labormischer, Typ Bäckermischer (Abb. 3.7), zur Verfügung, der das Mischen von maximal 12 kg Mischgut ermöglichte.
Entsprechend der Mischungszusammensetzung erfolgte das Einwiegen der Mineralstoffe, die anschließend wie das Bindemittel im Wärmeschrank auf 150 °C erhitzt wurden. Die Mineralstoffe wurden in den Mischtrog gegeben und die entsprechende Bindemittelmenge hinzu gewogen.



Abb. 3.7: Labormischer

Für die Zugabe der Additive kamen zwei unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Zum einen erfolgte eine Modifizierung des Bitumens, bevor es in den Asphaltmischer gegeben wurde. Hier kam es bereits vor der Zugabe in den Asphaltmischer zu Entmischungserscheinungen, die Fasern setzten sich im Bitumen ab. Bei dem zweiten Verfahren wurde das Additiv direkt in den Asphaltmischer vor bzw. während der Bitumenzugabe gegeben. Das Mischgut wurde solange gemischt, bis alle Mineralstoffe vollständig von Bitumen umhüllt waren, maximal jedoch 3 Minuten.

Tab. 3.7: Bezeichnung und Zugabemenge der Additive für Asphaltprüfungen

Bezeichnung	Zugabe zu Bitumen vor Asphaltmischung		Zugabe zu Mischgut	
	Kurz	[%]	Kurz	[%]
Referenzprobe	M0	-	M0	-
Faser 1	MF1B	2	MF1A	2
Faser 2	MF2B	2	MF2A	2

Für die Asphaltuntersuchungen wurden als Additive nur die Fasern mit jeweils 2 Gew.-% verwendet. Die Referenzmischungen wurden ohne Zugabe von Additiven hergestellt.

3.3 Versuchsbeschreibung

3.3.1 Bitumenprüfungen

Für die Bitumenuntersuchungen kamen die gängigen Verfahren zum Einsatz. Durch eine Veränderung der Kennwerte des mit Additiven versetzten Bitumens gegenüber den Kennwerten des nicht modifizierten Bitumens ist der Einfluss der Zusätze ableitbar.

3.3.1.1 Bestimmung der Nadelpenetration

Die Bestimmung der Nadelpenetration erfolgte nach DIN EN 1426.
Sie dient neben der Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel (3.3.1.2) und des Brechpunktes nach Fraaß (3.3.1.3) zur Sortenklassifizierung des untersuchten Bindemittels und stellt ein Maß für dessen Härte oder auch innere Zähigkeit dar. [HIESE 1988]

Für die Bestimmung der Nadelpenetration wurde die Bitumenprobe bei einer festgelegten Temperatur von 25 °C mit einer Nadel, Gewicht 100 g, 5 s lang belastet. Die Eindringtiefe der Nadel wurde dann in zehntel Millimeter bestimmt.

3.3.1.2 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Der Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) wurde nach DIN EN 1427 bestimmt.
Er gibt einen Temperaturpunkt im Konsistenzübergang von plastisch zu flüssig an, also die obere Temperaturgrenze, bis zu der das Bitumen ohne zu fließen gerade noch plastisch verformbar bleibt. [HIESE 1988]

Die Bestimmung des EP RuK erfolgte in einem Wasserbad mit destilliertem Wasser. Dabei wurde die in einen Ring eingeschmolzene Bitumenschicht mit einer Stahlkugel belastet, die durch ihr Gewicht die Bitumenschicht mit steigender Temperatur verformte. Die Temperatur, bei der die Kugel die untere Bodenplatte berührte, wurde gemessen.

3.3.1.3 Brechpunkt nach Fraaß

Nach DIN EN 12593 erfolgte die Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß, der den Konsistenzübergang von plastisch zu fest kennzeichnet.
Der Brechpunkt nach Fraaß wurde mittels eines auf ein Prüfblech aufgeschmolzenen Bindemittelfilmes gemessen, der bei zunehmender Abkühlung und Biegebeanspruchung reißt. Als Brechpunkt wird die Temperatur bezeichnet, bei welcher der Bitumenfilm spröde bricht. [HIESE 1988]

Der Bereich zwischen dem Brechpunkt nach Fraaß und dem EP RuK stellt die Plastizitätsspanne des untersuchten Bitumens dar. Er entspricht somit dem Temperaturbereich, in dem sich das Bitumen im Bauwesen einsetzen lässt. [HUTSCHENREUTHER 1998]

3.3.1.4 Duktilität

Die Bestimmung der Duktilität wurde nach DIN 52013 durchgeführt.
Die Duktilität beschreibt das Fadenziehvermögen eines Bitumens. Sie gibt an, wie weit sich ein Bitumenfilm verformen lässt, ohne zu reißen.
Dazu wurden die Probekörper in einem Wasserbad bei 25 °C mit einer konstanten Ziehgeschwindigkeit von 51,4 mm/min solange auseinander gezogen, bis der entstehende Faden riss oder bis die Grenze von 1000 mm erreicht war. Die Probekörperverlängerung bis zum Riss stellt den Wert der Duktilität dar.

3.3.1.5 Bestimmung der Viskosität

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Viskosität wird in den DIN 52007-1 und DIN 52007-2 beschrieben.
Die Viskosität ist eine temperaturabhängige Größe, die vor allem für die Verarbeitung von Bitumen wichtig ist. Für die Bestimmung der Viskosität mittels des Kugelzieh-Viskosimeters war es notwendig, den Temperaturbereich zu ermitteln, in dem sich das Bitumen wie eine newtonsche Flüssigkeit verhält. In diesem Bereich ist die Viskosität des Bitumens nur von der Temperatur abhängig, außerhalb dieses Bereiches

haben auch Schubspannungen bzw. Geschwindigkeitsgefälle Einfluss. [HUTSCHENREUTHER 1998]



Abb. 3.8: Kugelzieh-Viskosimeter

Zur Bestimmung der Viskosität mit Hilfe eines Kugelzieh-Viskosimeters (siehe Abb. 3.8) wurde eine Stabkugel mit einer festgelegten Zugkraft durch ein mit Bitumen gefülltes Messrohr gezogen und dabei die Zeitspanne gemessen, die zum Zurücklegen eines definierten Weges benötigt wurde. Diese Zeitspanne ist das Maß der Viskosität. Nach Formel (3.1) ist die dynamische Viskosität η in [mPa s] ermittelbar.

$$\eta = K * m * t \qquad (3.1)$$

mit:

K Stabkugelkonstante [mPa/g]

m Masse des Gewichtsstückes [g]

t Zeit [s], die Zeiger zum Durchwandern der Messstrecke benötigt hat

Dividiert man die so gewonnene dynamische Viskosität durch die Bindemitteldichte nach Formel (3.2), so erhält man die kinematische Viskosität *v* in [mm²/s].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \qquad (3.2)$$

mit:

η dynamische Viskosität [mPa s]

ρ Dichte des Bindemittels bei Prüftemperatur [g/cm³]

Als Prüftemperaturen wurden 101; 124 und 151 °C gewählt. Auf Grund der zu erwartenden Viskositäten von Bitumen B 50/70 wurde die Stabkugel Nr. 2 für alle Untersu-

chungen eingesetzt und somit die Stabkugelkonstante sowie der definierte Weg bestimmt.
Mit modifiziertem Bitumen, dem 5 Gew.-% F1 oder F2 zugegeben waren, konnte die Bestimmung der Viskosität mittels des Kugelzieh-Viskosimeters nicht durchgeführt werden. Ein Durchziehen der Stabkugel durch das Messrohr war nicht mehr möglich.

3.3.1.6 Bestimmung der Elastischen Rückstellung

Die Bestimmung der Elastischen Rückstellung erfolgte nach DIN EN 13398.
Sie stellt eine Ergänzung zur Bestimmung der Duktilität (DIN 52013) dar und wird üblicherweise nur bei Polymermodifiziertem Bitumen eingesetzt.
Da die Wirkungsweise der untersuchten Additive im Vorfeld nicht bekannt war, wurde diese Prüfung zur Untersuchung des modifizierten Bitumens mit herangezogen, um eine eventuell auftretende elastische Rückstellung feststellen zu können.

Die Prüfung wurde ebenso wie die Duktilitätsbestimmung in einem Wasserbad bei 25 °C Wassertemperatur durchgeführt. Die Probekörper wurden bei einer konstanten Ziehgeschwindigkeit von 51,4 mm/min bis auf eine Länge von 200 mm gestreckt und sofort im Anschluss innerhalb von 10 s mit einer Schere mittig durchgeschnitten. Der nach 30 min gemessene Abstand zwischen den Fadenenden, angegeben in % bezogen auf die ursprüngliche Fadenlänge von 200 mm, stellt die Elastische Rückstellung dar. [HUTSCHENREUTHER 1998]

3.3.2 Mischgutprüfungen

Für die Mischgutuntersuchungen kamen nur die Additive F1 und F2 mit jeweils 2 Gew.-% bezogen auf die verwendete Bitumenmenge zur Anwendung. Die Mischungen erfolgten wie in Kap. 3.2 dargestellt. Als Referenzprobe diente eine Mischung ohne Zusätze.

3.3.2.1 Eignungsprüfung

Im Vorfeld der Asphaltuntersuchungen wurde eine Eignungsprüfung nach dem Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt, Ausgabe 1998 [FGSV 1998] durchgeführt.
Nach der Bestimmung der Rohdichten und der Korngrößenverteilung der Mineralstoffe, der Auswahl des Mineralstoffgemisches und des einzusetzenden Bindemittels wurden Marshall-Probekörper mit drei verschiedenen Bindemittelgehalten hergestellt.

An diesen erfolgten die Bestimmung der Rohdichte des Mischgutes, der Raumdichten und der Hohlraumgehalte sowie die Ermittlung von Marshall-Stabilität und Fließwert.
Die Ergebnisse wurden mit den Anforderungen an Asphaltbeton 0/11 S nach der *ZTV-ASPHALT-STB 01* verglichen, bewertet und anhand dieser Ergebnisse die entsprechende Mischgutzusammensetzung festgelegt.

3.3.2.2 Probekörperherstellung

Marshall-Probekörper

Auf Grundlage der DIN 1996-4 wurden Marshall-Probekörper aus Asphaltbeton 0/11 S gefertigt. Die erforderlichen Abmessungen der Probekörper sind in Abb. 3.9 dargestellt.

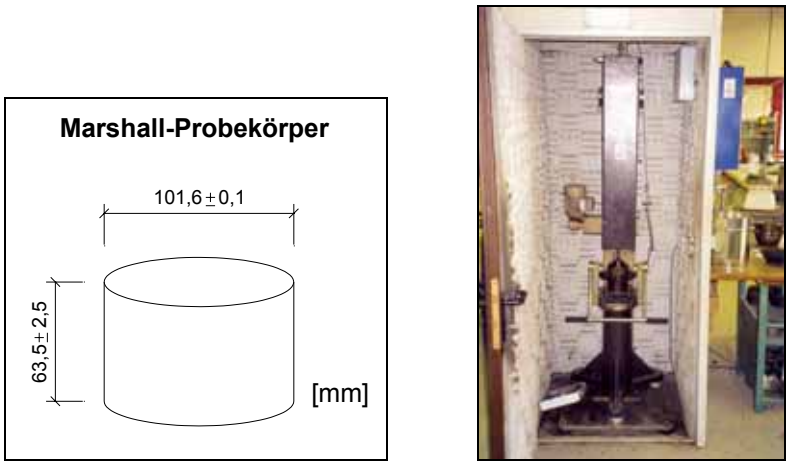


Abb. 3.9: v.l.n.r. Marshall-Probekörper, Marshall-Verdichtungsgerät [MÜLLER 2005]

Das abgedeckte Mischgut wurde im Wärmeschrank auf die festgelegte Verdichtungstemperatur erhitzt. Anschließend erfolgte das lagenweise Einfüllen in die auf 100 - 150 °C vorgewärmten Verdichtungsformen aus Stahl. Der Verdichtungsvorgang fand in einem Marshall-Verdichtungsgerät (vgl. Abb. 3.9) statt. Dabei wurde die Probe durch das Herabfallen des Fallhammers mit 50 Schlägen je Seite verdichtet. Im Anschluss wurden die Probekörper auf Raumtemperatur abgekühlt und ausgeformt.

Probekörper für Spurbildungstest

Die Herstellung der Probeplatten für die Spurbildungstests erfolgte in einer Walzvorrichtung (vgl. Abb. 3.10). Dadurch wurde eine möglichst praxisnahe Verdichtung erreicht.

In eine Stahlform mit den Innenabmessungen 360 mm x 600 mm wurde das zuvor auf Verdichtungstemperatur erhitzte Mischgut in einer Höhe von 40 mm eingefüllt. Die dafür notwendige Mischgutmenge ergab sich aus den jeweiligen Raumdichten, bezogen auf das Volumen der Stahlform und dem nötigen Verdichtungsgrad zwischen 98 - 100 %.

Im Anschluss an den Verdichtungsvorgang mittels der Walzvorrichtung wurden die Probeplatten abgekühlt und ausgeschalt. Um prüfformgerechte Probeplatten zu erhalten, wurden die ausgeschalten Platten mittig zersägt. Die Abmessungen der Prüfkörper sind in Abb. 3.10 dargestellt.

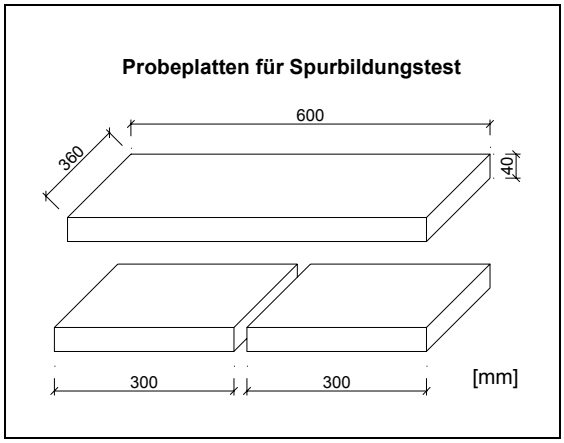




Abb. 3.10: v.l.n.r. Spurbildungstest-Probeplatten, Gerät zur Herstellung Probeplatten

3.3.2.3 Affinität

Die Überprüfung der Affinität von Gesteinskörnungen zum Bitumen erfolgte nach DIN EN 12697-11.

Dafür wurden die Körnungen von 8 mm bis 11,2 mm gewaschen, getrocknet und mit Bitumen gemischt. Die bitumenumhüllten Gesteinskörner wurden lose über einen festgelegten Zeitraum in einer flachen Schüssel gelagert. Anschließend erfolgte eine

Lagerung im Wasserbad, nach welcher der Grad der Umhüllung der einzelnen Gesteinskörner mit Bitumen nach Augenschein bestimmbar war.

3.3.2.4 Bindemittelablauftest

Der Bindemittelablauftest nach *Schellenberg / von der Weppen* ist ein „Verfahren zur Bestimmung der Homogenitäts-Stabilität von Splittmastixasphalt“ [SCHELLENBERG 1986].

Mittels dieses Verfahrens kann die Menge an stabilisierenden Zusätzen bestimmt werden, die ein Ablaufen des Bindemittels während Herstellung, Transport und Einbau vom Mischgut verhindert [HUTSCHENREUTHER 1998]. In dieser Arbeit soll unter Anwendung dieses Verfahrens untersucht werden, ob die eingesetzten Additive eine stabilisierende Wirkung aufweisen.

Für diese Prüfung wurde ca. 1000 g Mischgut in ein genormtes Becherglas gefüllt, abgedeckt und bei 170 °C eine Stunde im Wärmeschrank gelagert. Anschließend wurde das Becherglas umgestülpt und das Mischgut ausgeschüttet. Der Rückstand im Becherglas wurde gewogen. Er ist, bezogen auf die Einwaage, ein Maß für die Entmischungsneigung, je größer der Rückstand, umso höher auch die Entmischung.

3.3.2.5 Temperaturabhängige Verdichtung

Anhaltspunkte für die Verdichtung bzw. Verdichtbarkeit ergeben sich aus der Bestimmung der Raumdichte und des Hohlraumgehaltes von bituminösen Massen. [HIESE 1988]

Die Raumdichte setzt sich aus dem Verhältnis Masse zu Volumen der Marshall-Probekörper zusammen. Sie wurde über Tauchwägung bestimmt. Der Hohlraumgehalt ergibt sich rechnerisch aus der Rohdichte und der Raumdichte von Marshall-Probekörpern. Die Ermittlung von Raumdichte und Hohlraumgehalt erfolgte nach DIN 1996-7.

Die Bestimmung der Verdichtung wurde mittels dieser Verfahren an Marshall-Probekörpern, die bei Temperaturen von 115 °C, 125 °C, 135 °C (entsprechend DIN 1996-7) und 145 °C hergestellt wurden, untersucht, um eine eventuelle Auswirkung der eingesetzten Additive auf die Verdichtung bei niedrigeren Temperaturen feststellen zu können.

3.3.2.6 Marshall-Stabilität, -Fließwert

Die Marshall-Stabilität gibt die Belastbarkeit des Asphaltes wieder, der Marshall-Fließwert die dabei auftretenden Verformungen am Probekörper. Beide stellen somit ein Maß für den Widerstand gegen mechanische Beanspruchung bituminöser Massen dar. [HIESE 1988]



Abb. 3.11: Prüfgerät Marshall-Stabilität und -Fließwert

Die Bestimmung der Marshall-Stabilität und des Marshall-Fließwertes wurde nach DIN 1996-11 durchgeführt.

Dazu wurden die Marshall-Probekörper (30 ± 5) min in einem Wasserbad bei 60 °C temperiert. Die eigentliche Prüfung fand in dem in Abb. 3.11 dargestellten Prüfgerät innerhalb von 30 s nach Entnahme der Probekörper aus dem Wasserbad statt. Der eingelegte Probekörper wurde dabei mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/min bis über die Höchstkraft hinaus verformt. Während des Versuches erfolgte die Aufzeichnung eines Kraft-Verformungs-Diagramms, aus dem die Höchstkraft (unkorrigierte Marshall-Stabilität) und die Strecke bis zum Erreichen der maximalen Kraft (Fließwert) abgelesen werden konnten. Der unkorrigierte Wert für die Marshall-Stabilität ergab, mit einem Korrekturfaktor multipliziert, die Marshall-Stabilität. Der Marshall-Fließwert konnte ohne Korrekturfaktor abgelesen werden.

3.3.2.7 Spurbildungsversuch

Die Spurbildungsversuche wurden auf Grundlage der *TP A-StB 1997* durchgeführt und dienten dazu, den Einfluss der Additive auf den Widerstand der Asphaltprobekörper gegen Verformungen durch wiederholte Belastungen zu untersuchen.

Je Spurbildungsversuch wurden zwei in Stahlformen befindliche Probeplatten (Abmessungen siehe Abb. 3.10) in das Prüfgerät eingespannt und anschließend im Wasserbad auf eine vorgegebene Temperatur erwärmt. Belastet wurden die Probekörper durch je ein rollendes Stahlrad, ebenfalls im temperierten Wasserbad, und die entstehenden Verformungen aufgenommen. Die Versuche waren nach 20.000 Überrollungen oder bei einer Spurrinnentiefe von 20,0 mm beendet.



Abb. 3.12: Spurbildungsgerät

Da bei den Untersuchungen mit 50 °C Versuchstemperatur die Spurrinnenbildung sehr stark war und es zu Ablösungen des Bitumens kam (so genanntes Stripping [HUTSCHENREUTHER 1998]), wurde, um eine Vergleichbarkeit der Wirkungen zu ermöglichen, entschieden, die Versuchstemperatur auf 40 °C abzusenken.

4 Übersicht Messergebnisse

4.1 Ergebnisse Bitumenuntersuchungen

4.1.1 Nadelpenetration, EP RuK, BP nach Fraaß

Da die Bestimmungen der Nadelpenetration, des Erweichungspunktes Ring und Kugel sowie des Brechpunktes nach Fraaß zu den Prüfverfahren zugeordnet werden können, die der Klassifizierung von Bitumen dienen, sollen ihre Ergebnisse hier zusammen betrachtet werden.

Tab. 4.1: Kennwerte des modifizierten Bitumens

Additiv	Nadel-penetration 25 °C	EP RuK	BP nach Fraaß
	[0,1 mm]	[°C]	[°C]
B0	48	49,8	-5
F1-2 %	47	51,4	-8
F1-5 %	46	52,8	-7
F2-2 %	45	53,4	-7
F2-5 %	43	59,4	-8
N1-2 %	43	51,2	-7
N1-5 %	38	54,0	-11
N2-2 %	44	50,6	-8
N2-5 %	41	52,8	-11

Außer bei der Bestimmung der Nadelpenetration, bei dem das für alle Versuche verwendete Bitumen B 50/70 geringwertig unter dem geforderten Wert bleibt, entspricht es allen nach DIN EN 12591 gestellten Anforderungen. Alle mit Zusätzen modifizierte Bitumen sind im Vergleich zum nicht modifizierten Bitumen „härter“, d. h. die Eindringtiefen der Nadelpenetration sind geringer und die Erweichungspunkte Ring und Kugel höher. Mit steigendem prozentualem Anteil der Zusätze am Bitumen wuchs auch die Konsistenz.

Die am stärksten verringernde Wirkung auf die Nadelpenetration zeigten die Nanoschichtsilikate, insbesondere N 1. Die Modifizierung mit Fasern wirkte sich weniger stark aus. Bemerkenswert ist, dass bezüglich des EP RuK die Zugabe von Fasern die stärkere Erhöhung bewirkt. Dies könnte auf einen armierenden Effekt der Fasern zurück zu führen sein.

Nimmt man anhand der Kennwerte eine Einordnung der Proben in Bitumenklassen vor, so liegen alle modifizierten Bitumen, außer F1-2% und F1-5%, bei der Penetration im Bereich eines B 30/45. Die Probe N1-5% entspricht auch im EP RuK einem B 30/45, die Probe F2-5% sogar einem B 20/30.
Die Brechpunkte nach Fraaß waren bei allen modifizierten Bitumen niedriger als beim Ausgangsbitumen. Die Bitumen mit N1-5% und N2-5% lassen sich in den Brechpunkten einem B 70/100 oder B 160/220 zuordnen.

4.1.2 Plastizitätsspanne - EP RuK und BP nach Fraaß

Wie in 3.3.1.3 erläutert, stellt die Plastizitätsspanne die Temperaturdifferenz zwischen dem Brechpunkt nach Fraaß und dem EP RuK dar, also den Bereich der plastischen Verformbarkeit. Sie gibt damit den Gebrauchstemperaturbereich an, bei dem sich das untersuchte Bitumen im Bauwesen einsetzen lässt. [HIESE 1988]
Setzt man den Erweichungs- und den Brechpunkt als Äquiviskositätstemperaturen an, so kann die Plastizitätsspanne als Maß für die Temperaturempfindlichkeit angenommen werden. Daraus schlussfolgernd ergibt sich aus einer Vergrößerung der Plastizitätsspanne ein Verminderung der Temperaturempfindlichkeit.
In Tab. 4.2 sind die Werte der Plastizitätsspannen abgebildet.

Tab. 4.2: Ermittlung Plastizitätsspannen

Additiv	EP RuK	BP nach Fraaß	Plastizitätsspanne
	[°C]	[°C]	[°C]
B0	49,8	-5	54,8
F1-2%	51,4	-8	59,4
F1-5%	52,8	-7	59,8
F2-2%	53,4	-7	60,4
F2-5%	59,4	-8	67,4
N1-2%	51,2	-7	58,2
N1-5%	54,0	-11	65,0
N2-2%	50,6	-8	58,6
N2-5%	52,8	-11	63,8

Graphisch sind die Plastizitätsspannen in Abb. 4.1 dargestellt.
Die Probe B0 weist den höchsten Brechpunkt und den geringsten Erweichungspunkt auf. Die Anhebung des Erweichungspunktes durch Zugabe von Additiven lag zwischen 0,8 °C unter Verwendung von N2-2% und 9,6 °C mit F2-5%. Der Brechpunkt

erfuhr eine Verminderung zwischen 2 °C unter Zugabe von F1-5%, F2-2% sowie N1-2% und 6 °C mit N 1-5% und N2-5%.
Die größte Plastizitätsspanne weist das Bitumen mit F2-5% mit 67,4 °C auf. Das entspricht einer Vergrößerung von 11,6 °C im Vergleich zum reinen B 50/70.

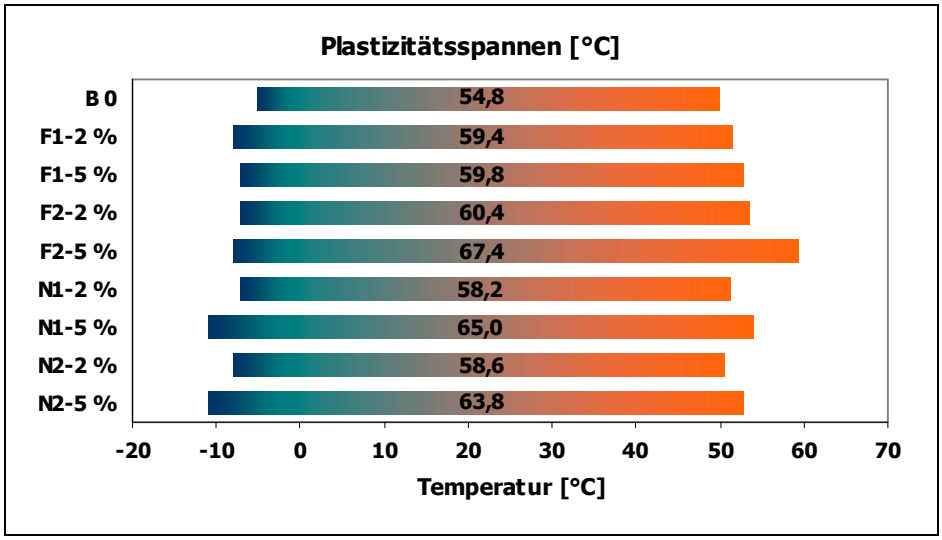


Abb. 4.1: Plastizitätsspannen

Diese Untersuchungsergebnisse zeigen, dass durch die Zugabe der Additive zum Bitumen eine Vergrößerung der Plastizitätsspanne und somit auch des Gebrauchstemperaturbereiches erreicht wurde. Daraus schlussfolgernd sind diese modifizierten Bitumen weniger temperaturempfindlich als das Ausgangsbitumen B 50/70.

4.1.3 Viskosität

Die Bestimmung der Viskositäten wurde bei Prüftemperaturen von 101 °C, 124 °C und 151 °C durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 4.3 dargestellt.

Zur Beurteilung des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens wurden die Kinematischen Viskositäten der unterschiedlich modifizierten Bitumen zusammen mit den dazugehörigen Temperaturen in ein Viskositäts-Temperatur-Blatt nach DIN 52007-1 eingetragen (siehe Abb. 4.2). Die so ermittelten Funktionsgeraden der einzelnen modifizierten Bitumen geben Aufschluss über das Viskositäts-Temperatur-Verhalten und lassen eine Bestimmung der Äquiviskositätstemperaturen zu.

Tab. 4.3: Ergebnisse Bestimmung Viskosität

Additiv	Dynamische Viskositäten			Kinematische Viskositäten		
	101 °C	124 °C	151 °C	101 °C	124 °C	151 °C
	[mPa s]			[mm²/s]		
B0	4695	875	256	4800	908	271
F1-2%	5637	1101	339	5764	1142	358
F1-5%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
F2-2%	5969	1257	389	6103	1304	411
F2-5%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
N1-2%	5821	1085	313	5952	1126	330
N1-5%	2955	1632	545	3056*)	1693	576
N2-2%	5538	1052	314	5662	1092	331
N2-5%	7448	1447	452	7616	1501	477

n.b. = nicht bestimmbar

*) Prüftemperatur 119 °C

Aus Abb. 4.2 wird deutlich, dass sich alle Geraden in einem ähnlichen Viskositätsbereich befinden. Die Gerade für B0, also das reine Bitumen B 50/70 ohne Additive, weist die höchste Neigung auf und liegt im Diagramm deutlich unter den anderen Geraden. Dadurch wird ersichtlich, dass durch die Zugabe der Additive eine Erhöhung der Viskosität erreicht wurde.
Ordnet man die modifizierten Bitumen aufsteigend nach der Größe ihrer Viskositäten, so wird B0 von N2-2%, F1-2%, N1-2%, F2-2%, N2-5% und N1-5% gefolgt.

Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität des untersuchten Bindemittels steigt mit zunehmender Größe des Winkels zwischen der Abszisse des Viskositäts-Temperatur-Diagramms und der Bitumengeraden. Somit lässt sich feststellen, dass der Einfluss der Temperatur auf die Viskosität bei dem mit N1-5% modifizierten Bitumen am geringsten ist.

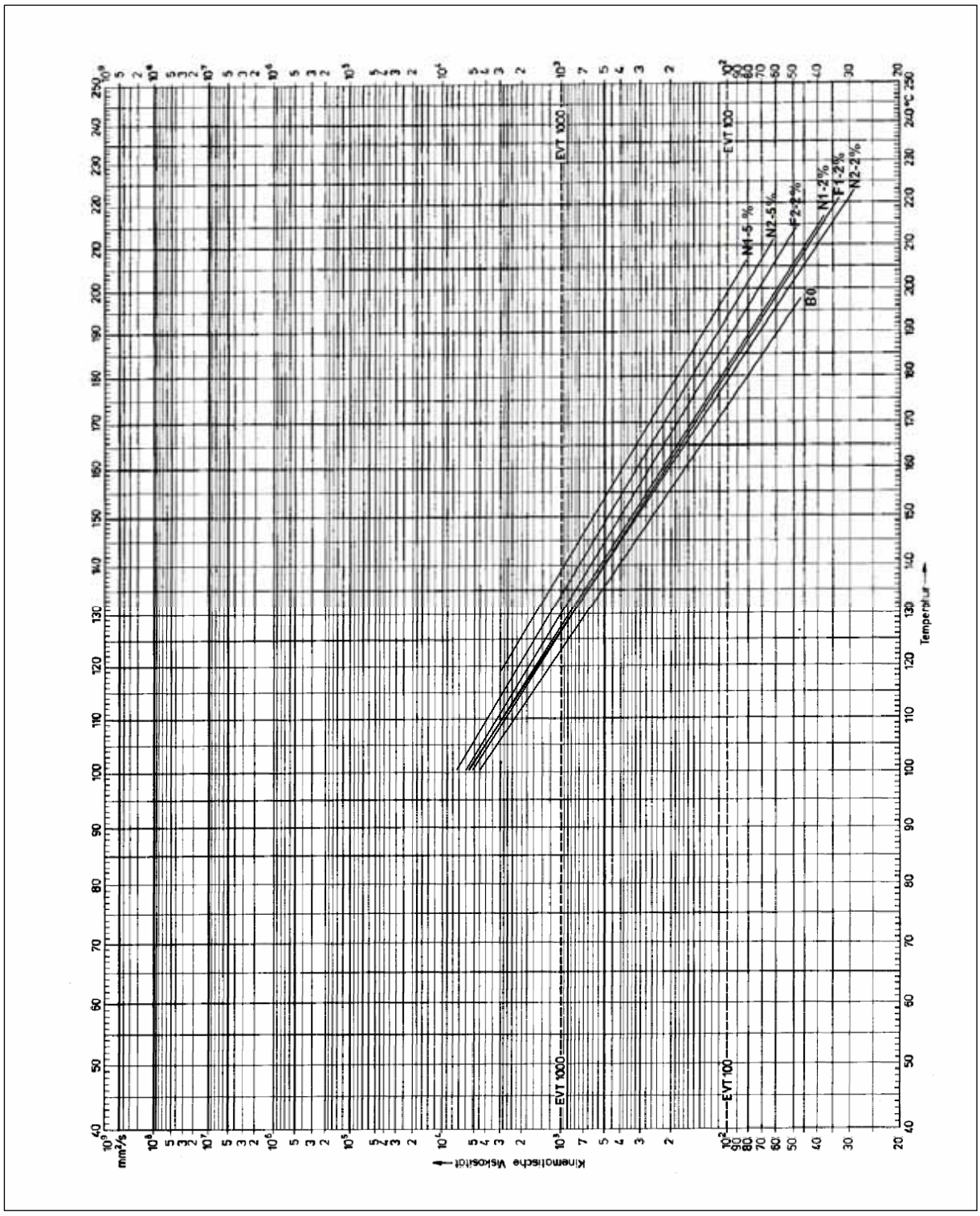


Abb. 4.2: Viskositäts-Temperatur-Verhalten der modifizierten Bitumen (nach DIN 52007-1)

Für die Bitumen mit F1-5% und F2-5% war eine Ermittlung der Viskositäten nicht möglich. Eine Ursache dafür könnte ein Absetzen oder Verklumpen der Faser sein. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die Modifizierung des Bitumens mit jeweils 5 Gew.-% Fasern die Viskosität soweit erhöhte, dass mit dem gewählten Prüfgerät keine Messung möglich war. Unterstützt wird diese Annahme durch die Ergebnisse von 4.1.2 (siehe auch *Suss 1993*).

Die Äquiviskositätstemperaturen EVT 100 und EVT 1000 sind maßgeblich für die Asphaltherstellung in der Mischanlage und den Einbau von Walzasphalt. Sie können aus dem Viskositäts-Temperatur-Blatt abgelesen werden und sind in Tab. 4.4 zusammengefasst.

Tab. 4.4: Äquiviskositätstemperaturen

Additiv	EVT 100 [°C]	EVT 1000 [°C]	Δ EVT [°C]
B0	173	123	50
F1-2%	181	126	55
F2-2%	187	130	57
N1-2%	182	127	55
N1-5%	199	139	68
N2-2%	179	127	52
N2-5%	194	134	60

Es ist ersichtlich, dass die mit Additiven versetzten Bitumen höhere Temperaturen zur Verarbeitung und Mischung benötigen, als das reine Bitumen. Die Ursache liegt in den höheren Viskositäten. Um eine Mischviskosität äquivalent zu B0 zu erhalten, müsste die Temperatur des Bitumens mit:

- F1-2% um 8 °C,
- F2-2% um 14 °C,
- N1-2% um 9 °C,
- N1-5% um 26 °C,
- N2-2% um 6 °C,
- N2-5% um 21 °C

erhöht werden.

Für eine Einbauviskosität ähnlich der von B0 wäre eine Temperaturerhöhung für Bitumen mit:

- F1-2% um 3 °C,
- F2-2% um 7 °C,
- N1-2% um 4 °C,
- N1-5% um 16 °C,
- N2-2% um 4 °C,
- N2-5% um 11 °C

nötig.

Dabei ist zu beachten, dass die erhöhten Temperaturen, vor allem EVT 100, ein Beschleunigen der Alterung des Bitumens verursachen können.

Die in Tab. 4.4 aufgeführte Differenz von EVT 100 zu EVT 1000 gilt als Maß für die Temperaturempfindlichkeit des untersuchten Bitumens. Denn je größer die Spanne zwischen diesen beiden Temperaturen ist, umso flacher ist der Geradenverlauf und damit auch die Empfindlichkeit geringer. Eine Zunahme der Differenz würde also die Zeitspanne zwischen dem Mischen und dem Verdichten von Walzasphalt vergrößern. Deutlich hebt sich in diesem Zusammenhang keines der hier untersuchten modifizierten Bitumen ab. Es lässt sich feststellen, dass das Bitumen mit N2-2% die geringste und das mit N1-5% die größte Spanne aufweist.

4.1.4 Duktilität und Elastische Rückstellung

Die Ergebnisse der Bestimmung der Duktilität und der Elastischen Rückstellung sind in Tab. 4.5 aufgeführt.

Die Untersuchungen zur Duktilität fanden nach Norm bei einer Prüftemperatur von 25 °C statt.

Dabei ergaben sich im Vergleich große Unterschiede bei den Duktilitäten der untersuchten Bitumen. Das Ausgangsbitumen B 50/70 und die mit N1-2%, N1-5% und N2-2% modifizierten Bitumen weisen Duktilitäten größer 100 cm auf, das Bitumen mit N2-5% liegt mit 93 cm nur kurz darunter. Die Beimischung der Fasern ergab dagegen Werte zwischen 17 cm bei Zugabe von F1-5%, F2-5% und 33 cm mit F1-2%. Hier bildeten sich während des Ziehvorganges kleine Knötchen im Bitumenfaden, was auf eine Klümpchenbildung der Fasern schließen lässt. Das wurde umso deutlicher, je höher der Faseranteil im Bitumen war.

Nach *PAULMANN 1985* sind 25 °C als Prüftemperatur ungünstig, um ein Differenzierung der einzelnen Bindemittel vornehmen zu können. Es wird empfohlen, die so genannte Kälteduktilität zu untersuchen, bei Temperaturen um 13 °C.

Tab. 4.5: Ergebnisse Duktilität und Elastische Rückstellung

Additiv	**Duktilität** 25 °C, 51,4 mm/min	**Elastische Rückstellung**
	[cm]	[%]
B0	> 100	12
F1-2%	33	10
F1-5%	17	15
F2-2%	20	13
F2-5%	17	19
N1-2%	> 100	8
N1-5%	> 100	9
N2-2%	> 100	13
N2-5%	93	13

Die Elastische Rückstellung wird üblicherweise, wie schon in Kap. 3.3.1.6 erläutert, nur bei Polymermodifiziertem Bitumen untersucht. Um aber mögliche Einflüsse der verwendeten Additive auf die Rückstellung feststellen zu können, wurde diese Prüfmethode auch für die durchgeführten Untersuchungen angewandt.

Die in Tab. 4.5 aufgeführten Ergebnisse wiesen Rückstellungen in einer Größenordnung von 8 - 19 % nach 30 min auf. Unterschiede sind bei den Wirkungen der verschiedenen Additive zu erkennen. So ergaben die Zugaben von F 1, F 2 und N 2 gleichwertige oder höhere Rückstellungen als das Ausgangsbitumen B 50/70. Das Bitumen mit N 1 wies niedrigere Rückstellungen auf.

Das mit F2-5% versetzte Bitumen verfügt hier nicht nur über die größte Plastizitätsspanne, sondern auch die höchste prozentuale Rückstellung, was auf eine Konsistenzerhöhung, also „Verhärtung“ durch F 2 schließen lässt. Grund dafür könnte ein gewisser Armierungseffekt durch die Faser sein.

4.2 Ergebnisse Mischgutuntersuchungen

Im Folgenden werden für die verschiedenen Asphaltmischungen nachstehend aufgeführte Kurzbezeichnungen verwendet:

M0 - Nullmischung,

MF1B / MF2B - Faser 1 / Faser 2 Zugabe zu Bitumen,

MF1A / MF2A - Faser 1 / Faser 2 Zugabe zu Asphalt.

4.2.1 Affinität

Untersucht hinsichtlich der Affinität von Gesteinskörnungen zum Bitumen wurden eine Nullmischung M0 ohne Zusatz von Additiven, eine Mischung, deren Bitumen zuvor mit Faser 1 (F 1) sowie eine mit Faser 2 (F 2) modifiziert wurde. Da alle Asphaltuntersuchungen, bei denen Additive zur Anwendung kamen, nur an Gemischen mit 2 Gew.-% Zugabe F 1 oder F 2 stattfanden, erfolgten auch die Affinitätsuntersuchungen nur mit diesen Materialien.



Abb. 4.3: v.l.n.r. Affinität bei M 0, MF1 und MF2

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tab. 4.6 dargestellt.

Tab. 4.6: Ergebnisse Affinitätsuntersuchung

Additiv	Umhüllte Oberfläche Prüfkörnung mit Bitumen [%]
M0	85
MF1B	85 - 90
MF2B	90

Die Einschätzung durch einen Prüfer nach Augenschein ergab für die Mischung mit Faser 2 die stärkste Umhüllung der Gesteinskörnung mit Bitumen. Die Nullmischung M0 wies von den untersuchten Mischungen die geringste Umhüllung auf. Gravierende Unterschiede waren aber nicht sichtbar, eine Auswirkung der Fasern nicht deutlich erkennbar.

4.2.2 Ablauftest

In Tab. 4.7 sind die Ergebnisse der Ablauftests dargestellt.

Tab. 4.7: Ergebnisse Ablauftest

Mischung	**Rückstand im Becherglas** [Gew.-%]
M0	0,02
MF1B	0,04
MF2B	0,03
MF1A	0,02
MF2A	0,02

Der erfasste Rückstand für die Mischung M0 liegt bei 0,02 Gew.-%, also so dicht am Idealfall, der keinen Rückstand aufweist, dass eine Verbesserung des Ablaufverhaltens der mit Zusätzen versehenen Mischungen gegenüber der zusatzfreien Mischung nicht möglich war. Die Rückstände der Mischungen mit Additiven bewegen sich in ähnlichen Bereichen wie von M0. Eine signifikante Verschlechterung des Ablaufverhaltens durch die Zugabe von Additiven war nicht festzustellen. Alle erfassten Rückstände liegen deutlich unter 0,1 Gew.-%.

4.2.3 Temperaturabhängige Verdichtung

Um die Verdichtung der mit Additiven hergestellten Mischgutvarianten beurteilen zu können, wurden die Raumdichten und die daraus resultierenden Hohlraumgehalte der jeweiligen Probekörper einander gegenübergestellt und verglichen.

Da die innere Reibung und die Fließfähigkeit des bituminösen Mörtels (Bindemittel + Füllstoff) das Verdichtungsverhalten bestimmen, können somit Aussagen über die Wirkung der Additive gemacht werden.

Die Ergebnisse sind in Tab. 4.8 sowie Tab. 4.9 abgebildet.

Tab. 4.8: Ergebnisse Raumdichte

Verdichtungs-temperatur [°C]	**Raumdichte ρ_a** [g/cm³]				
	M0	**MF1B**	**MF2B**	**MF1A**	**MF2A**
115	2,427	2,415	2,414	2,427	2,422
125	2,437	2,417	2,422	2,429	2,432
135	2,448	2,426	2,431	2,436	2,442
145	2,444	2,445	2,437	2,448	2,435

Tab. 4.9: Ergebnisse Hohlraumgehalt

Verdichtungs-temperatur [°C]	Hohlraumgehalt H [Vol.-%]				
	M0	MF1B	MF2B	MF1A	MF2A
115	3,6	4,0	4,1	3,6	3,8
125	3,2	4,0	3,8	3,5	3,4
135	2,8	3,6	3,4	3,2	3,0
145	2,9	2,9	3,2	2,7	3,3

Veranschaulicht werden diese Werte in Abb. 4.4 und Abb. 4.5.

Bei diesen Untersuchungen zeigt die zusatzfreie Mischung mit Ausnahme des Ergebnisses bei der Verdichtungstemperatur von 145 °C die größten Raumdichten und die niedrigsten Hohlraumgehalte. Weiterhin wird deutlich, dass die Probekörper der Mischungen, deren Additivzugabe während des Asphaltmischvorgangs statt fand, höhere Raumdichten und demzufolge niedrigere Hohlraumgehalte aufweisen, als die Probekörper, für deren Herstellung die Additivzugabe zum Bitumen vor der Mischgutherstellung erfolgte.

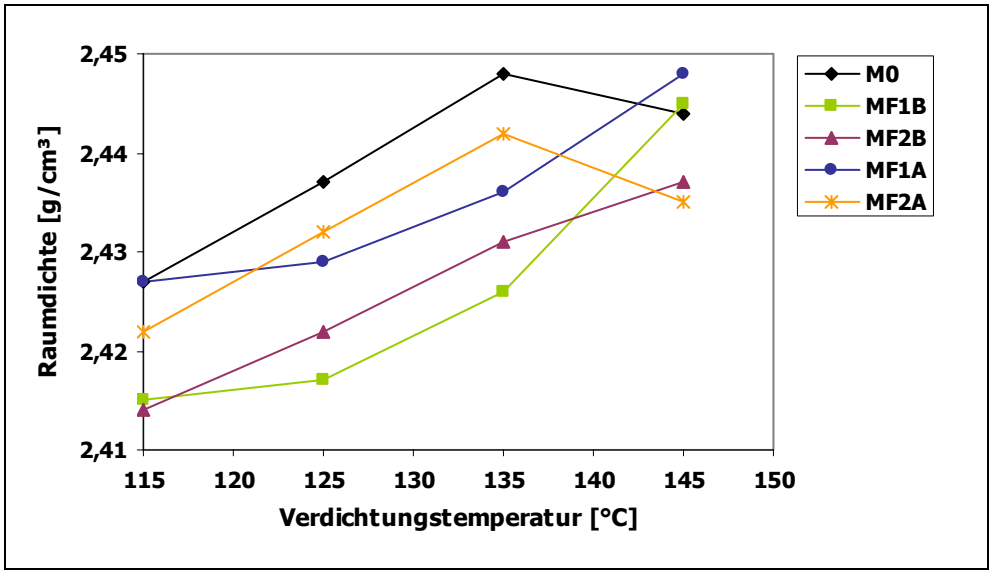


Abb. 4.4: Raumdichten in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur

An dieser Stelle wird von der Annahme ausgegangen, dass zunehmende Raumdichten und abnehmende Hohlraumgehalte eine steigende Verdichtung indizieren. Somit würden die Probekörper der Mischung M0 die höchste Verdichtung aufweisen, gefolgt von den Probekörpern der Mischung MF2A, MF1A. Die geringsten Verdichtungen wurden bei den Mischungen MF1B und MF2B erzielt.

Das bestätigt die Ergebnisse der Viskositätsuntersuchungen in Kap. 4.1.3. Dass die modifizierten Bitumen höher viskos waren als das Ausgangsbitumen, ließ erwarten, dass keine Erhöhung der Verdichtung bei den Mischungen mit Zusätzen bei niedrigeren Temperaturen feststellbar ist, da mit steigender Viskosität der Bindemittel die Verdichtung schwerer wird.

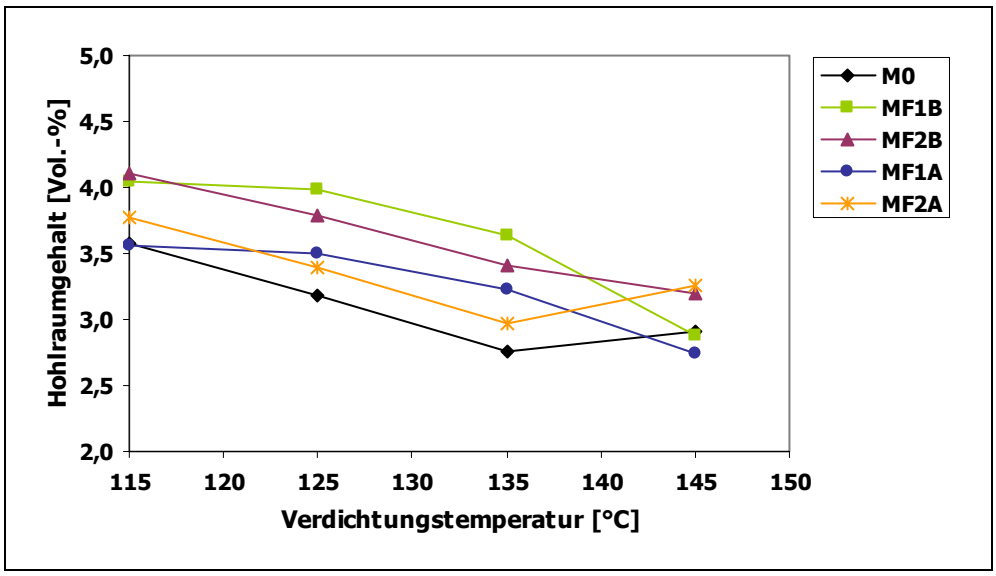


Abb. 4.5: Hohlraumgehalte in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur

Die Verdichtungstemperatur zeigt einen plausiblen und praxiskonformen Einfluss auf die Hohlraumgehalte von M0. Mit zunehmender Verdichtungstemperatur von 115 °C - 135 °C verringern sich die Hohlraumgehalte der Probekörper. Bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C war wieder eine leichte Anhebung des Hohlraumgehaltes festzustellen. Das gilt auch für die Probekörper der Mischung MF2A. Bei allen anderen Mischgutvarianten nahm der Hohlraumgehalt mit zunehmender Verdichtungstemperatur von 115 °C - 145 °C kontinuierlich ab.

4.2.4 Marshall-Stabilität, -Fließwert

Die Aussagekraft von Marshall-Stabilität und -Fließwert zur Beurteilung der Standfestigkeit ist laut PAULMANN 1985 allgemein als gering anzusehen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden von den Eigenschaften des bituminösen Mörtels (Bitumen + Füllstoff) und den Kornverspannungen beeinflusst. Dabei werden vor allem von den verkeilten Splittkörnern die während des Versuches eingeleiteten Druckkräfte aufgenommen, während die Zugkräfte hauptsächlich vom Mörtel getragen werden. Zwar sind auch größere Dehnungen zu verzeichnen, es wird aber davon ausgegangen, dass der überwiegende Teil der eingeleiteten Kräfte durch die Mineralkörner aufge-

nommen wird. Die Wirkung der Bindemittel ist in diesem Zusammenhang kaum zu ermitteln. Da aber die untersuchten Mischungen die gleiche Kornzusammensetzung und volumenmäßig gleiche Bindemittelgehalte aufweisen, sind eventuelle Unterschiede im Verformungsverhalten der Probekörper auf die Bindemitteleigenschaften zurück zu führen.

Die Ergebnisse von Marshall-Stabilität und -Fließwert sind in Tab. 4.10 und Tab. 4.11 und graphisch in Abb. 4.6 und Abb. 4.7 aufgeführt.

Tab. 4.10: Ergebnisse Marshall-Stabilität

Verdichtungs-temperatur [°C]	Marshall-Stabilität S [kN]				
	M0	MF1B	MF2B	MF1A	MF2A
115	10,7	10,4	9,9	10,9	11,0
125	12,5	12,5	11,0	11,2	11,4
135	12,6	12,0	12,5	12,5	13,6
145	16,5	14,1	13,8	14,5	12,6

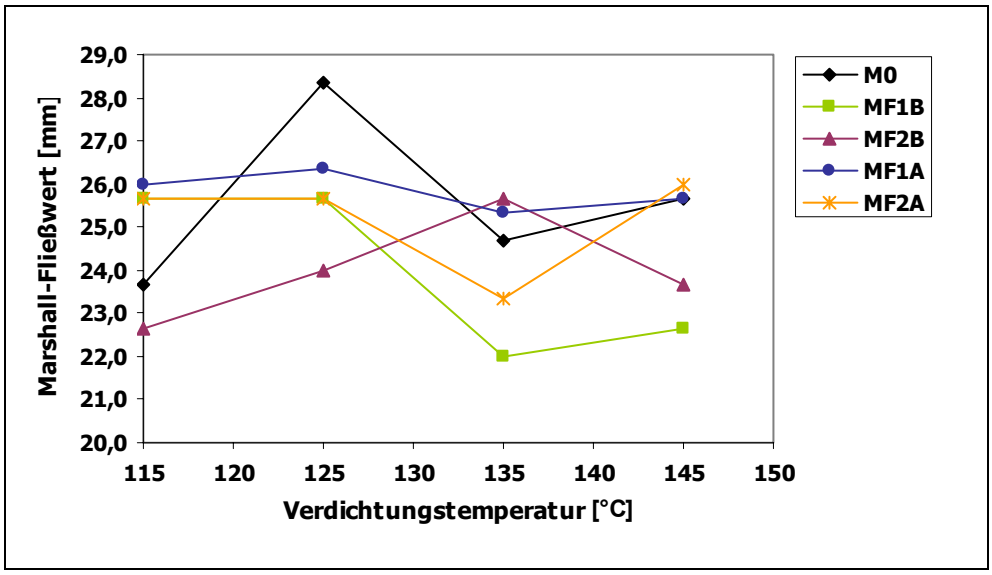


Abb. 4.6: Marshall-Stabilität

Bei Betrachtung der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass die Spannen zwischen höchster und niedrigster Stabilität je Versuchstemperatur ca. im Bereich der Wiederholbarkeit (bei 22 %) nach DIN 1996-11 liegen. Somit sind nur tendenzielle Aussagen möglich.

Bis auf die Mischungen MF1A und MF2A bei 115 °C und MF2A bei 135 °C blieben alle Marshall-Stabilitäten der Mischungen mit Zusätzen unter denen der Ausgangsmischung. Die Marshall-Stabilität für M0 war am größten, da die Probekörper dieser Mischung auch die höchste Verdichtung aufwiesen (vgl. 4.2.3). Teilweise wird bei den modifizierten Mischungen dieser Zusammenhang aber anscheinend durch die höheren Viskositäten der modifizierten Bindemittel während des Prüfvorganges kompensiert.

Betrachtet man die Marshall-Stabilitäten der jeweiligen Mischungen in Abhängigkeit von den Verdichtungstemperaturen, so ist bis auf Mischung MF2A eine Zunahme der Stabilität mit ansteigender Verdichtungstemperatur zu verzeichnen. Die Erklärung dafür liefert die bessere Verdichtung bei höheren Temperaturen und bestätigt sich bei Betrachtung der Hohlraumgehalte (4.2.3).

Tab. 4.11: Ergebnisse Marshall-Fließwert

Verdichtungs-temperatur [°C]	Marshall-Fließwert f [mm]				
	M0	MF1B	MF2B	MF1A	MF2A
115	23,7	25,7	22,7	26,0	25,7
125	28,3	25,7	24,0	26,3	25,7
135	24,7	22,0	25,7	25,3	23,3
145	25,7	22,7	23,7	25,7	26,0

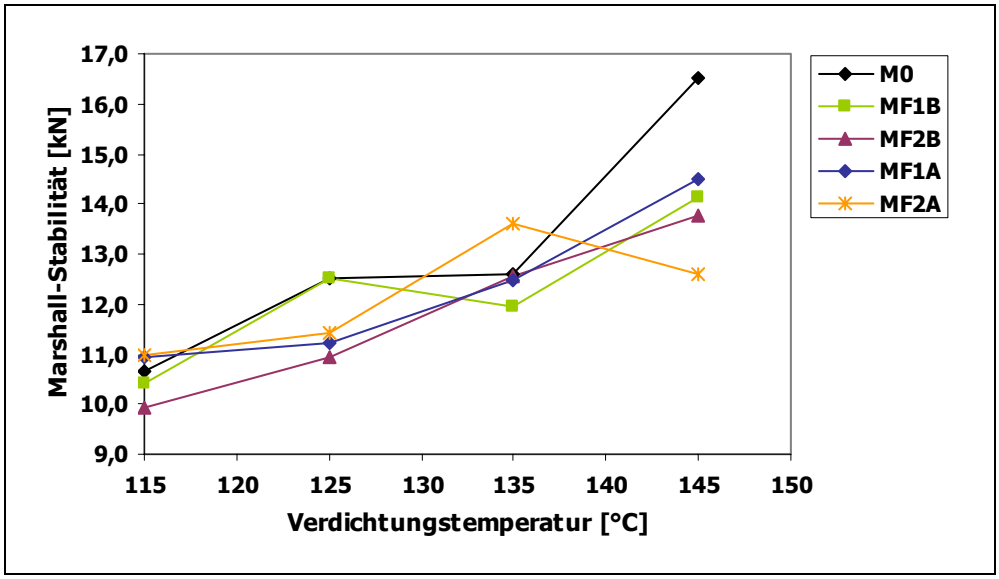


Abb. 4.7: Marshall-Fließwert

Aus den Fließwerten lassen sich keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Bindemittelwirkung ziehen.

4.2.5 Spurbildungsversuch

Die Ergebnisse der Spurbildungsversuche lassen Rückschlüsse auf die Standfestigkeit von Asphaltmischungen zu. Dabei ist die Spurtiefe, die sich bei einer gewählten Temperatur einstellt, ein Maß für den Verformungswiderstand [MOTZ 1985].

Anders als bei den Marshall-Untersuchungen kann hier auf Grund der Herstellungsart davon ausgegangen werden, dass der Verdichtungsgrad für alle Probekörper gleich ist. Somit sind Änderungen in der Spurrinnentiefe auf den Einfluss der eingesetzten Bindemittel zurückzuführen.

Der erste Spurbildungsversuch fand bei 50 °C Versuchstemperatur mit der Mischung M0 statt. Auf Grund des in Abb. 4.8 deutlich zu erkennenden „Strippings“, wurde die Versuchtemperatur für alle nachfolgenden Untersuchungen auf 40 °C reduziert.

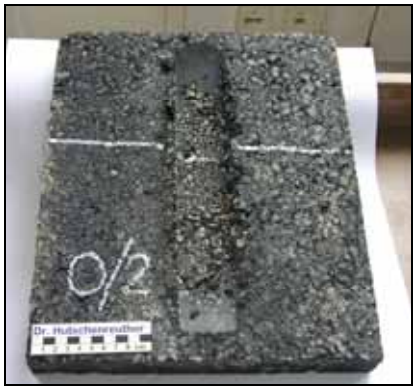


Abb. 4.8: „Stripping“ an Probekörper M 0 bei Versuchstemp. 50 °C

Den Verlauf der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollung der Prüfräder zeigt Abb. 4.9.

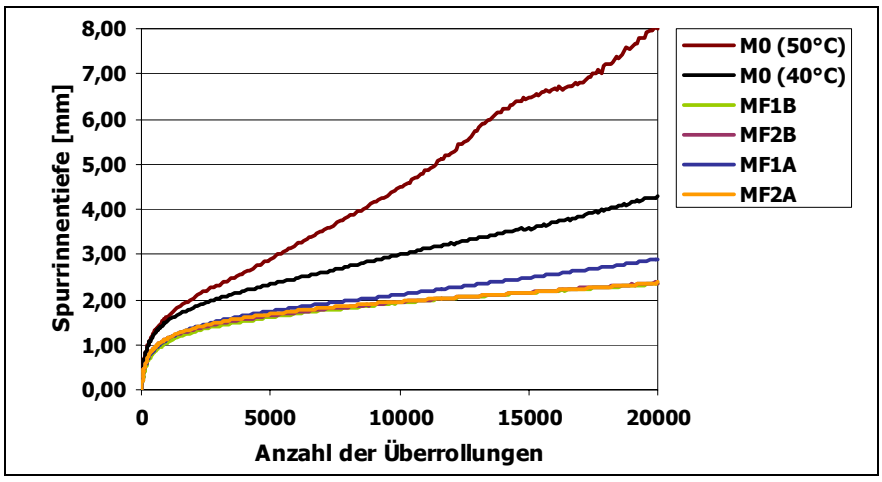


Abb. 4.9: Vergleich Spurrinnentiefe

Die Ergebnisse sind in Tab. 4.12 noch einmal zusammengefasst.

Tab. 4.12: Spurrinnentiefen

Versuchsmischung	Spurrinnentiefe nach 20000 Überrollungen [mm]
M0 (50 °C)	7,99
M0 (40 °C)	4,28
MF1B	2,35
MF2B	2,37
MF1A	2,89
MF2A	2,38

Alle Mischungen, denen Additive zugegeben wurden, zeigen geringere Spurrinnentiefen als Mischung M0. Das würde bestätigen, dass mit zunehmender Bindemittelhärte die Spurrinnentiefe abnimmt. Laut *MOTZ 1985* könnten auch die höheren Viskositäten von Einfluss sein, weil dadurch das Korngerüst verstärkt durch Klebestellen verbunden wird.

Eine klare Differenzierung beider untersuchter Fasertypen ist nicht möglich. Bis auf MF1A bewegen sich ihre Ergebnisse in annähernd gleichen Bereichen. Dabei wiesen die Mischungen mit modifiziertem Bitumen bessere Ergebnisse auf, als die Mischungen MF1A und MF2A. Das günstigste Ergebnis zeigt MF1B mit 2,35 mm. Das sind 1,93 mm oder 45 % weniger Spurtiefe als M0 (40 °C). Versuchskörper dieser beiden Mischungen sind in Abb. 4.10 einander gegenübergestellt. Während auch MF2B eine um 45 % verminderte Spurtiefe aufwies, waren es bei MF2A 44 % und bei MF1A nur noch 32 % im Vergleich zu M0 (40 °C).



Abb. 4.10: v.l.n.r. Spurbildungstest M0 (40 °C), MF1B

5 Vergleichende Betrachtung

Im Folgenden sollen die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit mit den Wirkungen herkömmlicher Additive nach Literaturangaben verglichen werden. Auf Grund unterschiedlicher Untersuchungsmethoden und verwendeter Materialien der zum Vergleich herangezogenen Ergebnisse, ist nur ein qualitativer Vergleich möglich.
Für diese Arbeit wurden Untersuchungen an mit Fasern und Nanoschichtsilikaten modifizierten Bitumen und an fasermodifizierten Asphalten durchgeführt. Diese Additive entsprechen am ehesten den stabilisierenden Zusätzen Fasern und pulverförmigen Stoffen. Ein Vergleich mit herkömmlichen Additiven dieser Gruppen ist daher sinnvoll. Der Vollständigkeit halber werden auch die Wirkungen anderer Zusätze mit aufgeführt.

In Tab. 5.1 werden einige der in Kap. 2 vorgestellten Additive den in dieser Arbeit untersuchten Fasern und Nanoschichtsilikaten hinsichtlich der erzielten Bitumenkennwerte gegenüber gestellt. Bezug wird dabei auf die jeweiligen Referenzproben ohne Zusätze genommen.

Bei *Suss 1993* und *PAULMANN 1985* wird für alle untersuchten stabilisierenden Zusätze eine Konsistenz erhöhende Wirkung festgestellt, was mit niedrigeren Nadelpenetrationen und Duktilitäten sowie höheren Brech- und Erweichungspunkten im Vergleich zum unmodifizierten Bitumen einherging. Eine besonders starke Erhöhung war durch die Verwendung von Cellulose- und Mineralfasern zu verzeichnen.
Auch in den Untersuchungen dieser Arbeit waren bei den modifizierten Bitumen Konsistenzerhöhungen festzustellen, die mit zunehmendem prozentualem Anteil der Zusätze im Bitumen anstiegen. Hier wiesen die stärksten Erhöhungen die mit Nanoschichtsilikat N 1 sowie Faser F 2 modifizierten Bitumen auf.

Tab. 5.1: Vergleich der Bitumenkennwerte

Gegenüberstellung von Asphaltkennwerten herkömmlicher und untersuchter Additive im Vergleich zur jeweiligen Referenzprobe			
Additiv	**Konsistenz**	**Plastizitätsspanne**	**Viskosität**
Cellulosefasern[1)]	→ **starke Erhöhung** • Verringerung Pen, Duktilität • Erhöhung EP RuK, BP	→ **Verringerung** • Verschiebung in höheren Temperaturbereich	→ **starke Erhöhung** • Erhöhung EVT 100 und EVT 1000 • Verminderung Temperatur-empfindlichkeit
Mineralfasern[1)]	→ **starke Erhöhung** • Verringerung Pen, Duktilität • Erhöhung EP RuK, BP	→ **Erhöhung** • Verschiebung in höheren Temperaturbereich	→ **starke Erhöhung** • Erhöhung EVT 100 und EVT 1000 • Verminderung Temperatur-empfindlichkeit
Kalkhydrat[1, 2)]	→ **Erhöhung** • Verringerung Pen, Duktilität • Erhöhung EP RuK, BP	→ **Verringerung** • Verschiebung in höheren Temperaturbereich	→ **geringe Erhöhung** • geringe Erhöhung EVT 100 und EVT 1000 • leichte Verminderung Temperatur-empfindlichkeit
Kieselsäure[1, 3)]	→ **Erhöhung** • Verringerung Pen, Duktilität • Erhöhung EP RuK, BP	→ **Verringerung** • Verschiebung in höheren Temperaturbereich	→ **geringe Erhöhung** • geringe Erhöhung EVT 100 und EVT 1000 • leichte Verminderung Temperatur-empfindlichkeit
Polymer[1, 4)]	→ **Erhöhung** • Verringerung Pen • Erhöhung EP RuK u. BP • Duktilität abhängig von Polymer - gleich oder verringert	→ abhängig von verwendetem Polymer → **meist Verringerung** • Verschiebung in höheren Temperaturbereich	→ abhängig von verwendetem Polymer → **Erhöhung bis starke Erhöhung** • Erhöhung EVT 100 und EVT 1000 • Verminderung Temperatur-empfindlichkeit
FT-Paraffin[6, 7, 8)]	→ **Erhöhung** • Verringerung Pen • Erhöhung EP RuK • keine Veränderung BP, Duktilität	→ **Erhöhung**	→ bis 110 °C Erhöhung → **ab 130 °C Verringerung** • Verringerung EVT 100 und EVT 1000
Montanwachs[6, 7, 8)]	→ **Erhöhung** • Verringerung Pen • Erhöhung EP RuK • keine Veränderung BP, Duktilität	→ **Erhöhung**	→ **ab 120 °C Verringerung** • Verringerung EVT 100 und EVT 1000
F 1	→ **Erhöhung** • Verringerung Pen, BP, Duktilität • Erhöhung EP RuK	→ **Erhöhung** • nach unten und oben vergrößert	→ **bei Zugabe 2 % Erhöhung** • Verringerung EVT 100 und EVT 1000 • Verminderung Temperatur-empfindlichkeit → bei Zugabe 5 % n. b.
F 2	→ **starke Erhöhung** • Verringerung Pen, BP, Duktilität • Erhöhung EP RuK	→ **Erhöhung** • nach unten und oben vergrößert	→ **bei Zugabe 2 % Erhöhung** • Verringerung EVT 100 und EVT 1000 • Verminderung Temperatur-empfindlichkeit → bei Zugabe 5 % n. b.
N 1	→ **starke Erhöhung** • Verringerung Pen, BP • Erhöhung EP RuK • keine Veränderung Duktilität	→ **Erhöhung** • nach unten und oben vergrößert	→ **Erhöhung** • Erhöhung EVT 100 und EVT 1000 • Verminderung Temperatur-empfindlichkeit
N 2	→ **Erhöhung** • Verringerung Pen, BP • Erhöhung EP RuK • leichte Verringerung Duktilität	→ **Erhöhung** • nach unten und oben vergrößert	→ **Erhöhung** • Erhöhung EVT 100 und EVT 1000 • Verminderung Temperatur-empfindlichkeit
Alle Bewertungen bezogen auf die jeweiligen Referenzproben. n. b. - nicht bestimmbar		1) SUSS 1993 2) EULITZ 1998 3) RUWENSTROTH 2003	4) PAULMANN 1985 5) ARAND 2006 6) BUTZ 2003	7) DAMM 2002a, DAMM 2002b 8) HEILING 2003

Auffällig ist, dass F 1, F 2, N 1 sowie N 2 im Gegensatz zu den herkömmlichen Additiven eine Verringerung der Brechpunkte bewirkten. Aus diesem Grund vergrößerten sich die Plastizitätsspannen der Bitumen mit diesen Additiven nach oben und nach unten auf der Temperaturskala. Das steht im Gegensatz zu den herkömmlichen stabilisierenden Zusätzen. Hier war nur bei den Mineralfasern eine Erhöhung der Plastizitätsspanne festzustellen, mit gleichzeitiger Verschiebung in einen höheren Temperaturbereich. Bei den anderen stabilisierende Zusätzen verschoben sich die Plastizitätsspannen ebenfalls in höhere Temperaturbereiche, was aber mit einer Verringerung der Spannen einherging. [SUSS 1993]
Auch bei den viskositätssenkenden Additiven war laut *BUTZ 2003, DAMM 2002a* und *HEILING 2003* ein Anstieg der Konsistenzen zu verzeichnen. Da bei ihnen die Brechpunkte keine Veränderung erfuhren, erhöhte sich die Plastizitätsspanne. Die Ursache dafür liegt in der Eigenschaft dieser Additive, bei Temperaturen unter ihrem Schmelzpunkt »…mikroskopisch feine, gleichmäßig verteilte Feststoffpartikel…« auszubilden. [BUTZ 2003]

In Bezug auf die Viskosität zeigten alle hier aufgeführten stabilisierenden Additive eine Erhöhung, die bei Bitumen mit den Zusätzen Cellulose- und Mineralfasern am stärksten ausgeprägt war. Damit einher gingen Erhöhungen der Äquiviskositätstemperaturen, also der Herstellungs- und Einbautemperatur für Asphalt unter Verwendung des jeweiligen Bitumens sowie Verringerungen der Temperaturempfindlichkeit. [SUSS 1993, PAULMANN 1985]
Auch die im Zusammenhang mit dieser Arbeit untersuchten Additive zeigten Viskositätserhöhungen, verbunden mit dem Anstieg der Äquiviskositätstemperaturen und Verminderungen der Temperaturempfindlichkeit. Hier lag die stärkste Ausprägung bei dem Zusatz N1-5%. Dazu ist anzumerken, dass eine Durchführung der Viskositätsbestimmung für die Fasern F 1 und F 2 mit einer Zugabemenge von 5 Gew.-% nicht möglich war. Die für diese Zugabe ermittelten Ergebnisse der Konsistenz und Plastizitätsspannen sowie der Bezug auf die Wirkungen von herkömmlichen Cellulose- und Mineralfasern lassen den Rückschluss zu, dass durch eine Zugabemenge von 5 Gew.-% F 1 oder F 2 zu Bitumen die Viskosität so stark erhöht wurde, dass eine Ermittlung nicht möglich war.
Für die viskositätssenkenden Additive war, wie der Name schon anzeigt, eine Verringerung der Viskositäten ab einem Temperaturbereich, der über dem Schmelzpunkt

(um die 100 °C) dieser Additive liegt, zu verzeichnen, also bei ca. 120 °C - 130 °C. Damit gingen, wie angestrebt, Senkungen der Äquiviskositätstemperaturen einher. [DAMM 2002a]

Tab. 5.2: Vergleich der Asphaltkennwerte

Gegenüberstellung von Bitumenkennwerten herkömmlicher und untersuchter Additive im Vergleich zur jeweiligen Referenzprobe				
Additiv	**Affinität**	**Ablauftest**	**Verdichtbarkeit**	**Spurbildungstest**
Cellulosefasern[1)]	k. A.	→ stark **verbessert**	→ **keine Veränderung**[*)]	→ **kleinster** Verformungswiderstand[*)]
Mineralfasern[1)]	k. A.	→ stark **verbessert**	k. A.	k. A.
Kalkhydrat[1, 2)]	→ **Erhöhung**	→ gering **verbessert**	k. A.	k. A.
Kieselsäure[1, 3)]	k. A.	→ gering **verbessert**	→ **keine Veränderung**[*)]	→ **größter** Verformungswiderstand[*)]
Polymer[1, 4)]	k. A.	→ gering **verbessert**	→ **schwerer** verdichtbar	→ **Erhöhung** Verformungswiderstand
Naturasphalt[5)]	→ **Erhöhung**	k. A.	→ **leichter** verdichtbar • M.-Stabilität höher	k. A.
FT-Paraffin[6, 7, 8)]	→ geringe **Erhöhung**	k. A.	→ **leichter** verdichtbar • M.-Stabilität höher	→ **Erhöhung** Verformungswiderstand
Montanwachs[6, 7, 8)]	→ geringe **Erhöhung**	k. A.	→ **leichter** verdichtbar • M.-Stabilität höher	→ **Erhöhung** Verformungswiderstand
F 1	→ geringe **Erhöhung**	→ **keine Veränderung**	→ **schwerer** verdichtbar • M.-Stabilität geringer	→ **Erhöhung** Verformungswiderstand
F 2	→ geringe **Erhöhung**	→ **keine Veränderung**	→ **schwerer** verdichtbar • M.-Stabilität geringer	→ **Erhöhung** Verformungswiderstand
Alle Bewertungen bezogen auf die jeweiligen Referenzproben., außer *) Vergleich untereinander, ohne Bezug auf Referenzprobe k. A. - keine Angaben			1) SUSS 1993 2) EULITZ 1998 3) RUWENSTROTH 2003	4) PAULMANN 1985 5) ARAND 2006 6) BUTZ 2003	7) DAMM 2002a, DAMM 2002b 8) HEILING 2003

In dieser Arbeit erfolgten die Asphaltuntersuchungen nur an Gemischen, denen die Fasern F 1 und F2 zugesetzt wurden. Die Ergebnisse sollen im Folgenden mit Prüfungen von mit herkömmlichen Additiven hergestellten Asphalten verglichen werden. In Tab. 5.2 werden in Kap. 2 vorgestellte Additive den in dieser Arbeit untersuchten Fasern F 1 und F 2 hinsichtlich der erzielten Asphaltkennwerte gegenüber gestellt. Bezug wird dabei auf die jeweiligen Referenzproben ohne Zusätze genommen. Ausgenommen davon sind bezüglich der Verdichtbarkeit die Zusätze Cellulosefasern und Kieselsäure. Sie werden untereinander verglichen.

Hinsichtlich der Untersuchungen der Affinität von Bitumen zum Mineralstoff können für stabilisierende Zusätze nur Angaben zu den Wirkungen von Kalkhydrat und Naturasphalt gemacht werden. Beide Zusätze führten zu einer Erhöhung der Affinität. [EULITZ 1998, ARAND 2006]
Für die Fasern F 1 und F 2 war, ähnlich den viskositätssenkenden Additiven, nur eine geringe Erhöhung der Affinität festzustellen.

Das Ablaufverhalten des Bindemittels konnte nach *SUSS 1993* besonders stark durch den Zusatz von Cellulose- und Mineralfasern und noch leicht durch Zugabe von Kalkhydrat, Kieselsäure oder Polymeren verbessert werden.
Für F 1 und F 2 war keine Veränderung im Ablaufverhalten im Vergleich zur Referenzprobe festzustellen. Dazu muss aber angemerkt werden, dass schon bei der Referenzprobe das Ablaufen des Bindemittels so gering war, das eine Verbesserung kaum möglich war.

Die Verdichtbarkeiten von Asphalten mit Cellulosefasern und Kieselsäure wurden von *SUSS 1993* untereinander verglichen, ohne Bezug auf eine Referenzprobe. Im Ergebnis konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Additiven festgestellt werden. *PAULMANN 1985* führt an, dass mit Polymeren modifizierte Asphalte schwerer zu verdichten sind, als Asphalte ohne Zusätze. Naturasphalt dagegen war laut *ARAND 2006* leichter verdichtbar, bei erhöhter Marshall-Stabilität.
Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zeigten unter Zugabe von F 1 und F 2 eine geringere Verdichtung sowie verminderte Marshall-Stabilitäten im Vergleich mit der Referenzprobe. Als Ursache dafür können die erhöhten Viskositäten in Betracht gezogen werden.
Als Ergebnis der verminderten Viskositäten waren für die Gemische mit viskositätssenkenden Additiven eine leichtere Verdichtbarkeit und höhere Marshall-Stabilitäten zu verzeichnen. [DAMM 2002b]
Allerdings ist anzumerken, dass bei der Verwendung viskositätssenkender Additive in der Praxis Probleme hinsichtlich der Herstellung von Verdichtungsgrad und Schichtenverbund auftraten. [SCHÜNEMANN 2006]

Auch in Hinsicht auf die Verformbarkeit unter Wärmeeinfluss wurden von *SUSS 1993* Cellulosefasern und Kieselsäure untereinander, ohne Bezugnahme auf eine Refe-

renzprobe bewertet. Im Ergebnis zeigten die Asphaltgemische mit Kieselsäurezusatz deutlich größere Verformungswiderstände als die Gemische mit Cellulosefasern. Aussagen zu einem Asphalt ohne Zusätze wurden nicht gemacht.
Spurbildungsuntersuchungen von *PAULMANN 1985* zeigten eine Erhöhung des Verformungswiderstandes bei Zugabe von Polymeren zum Asphalt.
Durch den Zusatz der Fasern F 1 und F 2 zu Asphaltgemischen wurden ebenfalls Erhöhungen des Verformungswiderstandes bei Spurbildungstests erreicht.
Das gilt auch für Gemische mit viskositätssenkenden Additiven. [DAMM 2002b]

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit sollte untersucht werden, welchen Einfluss Additive im Submikro- und Nanobereich auf die Eigenschaften von Bitumen und Asphalt haben. Um Einblick in die Wirkungsmechanismen von Materialien in Nanogröße zu erhalten, wurde im Vorfeld ein Überblick über Nanotechnologien gegeben. Dabei erfolgten die Aufführung bereits realisierter Anwendungen sowie eine kurze Zusammenstellung von Einsatzmöglichkeiten, die sich noch in der Entwicklung befinden.

Der Einfluss der neuen Additive wurde anhand einer Reihe von Bitumen- und Asphaltprüfungen untersucht. Verwendet wurden dafür zwei Fasersorten (F 1 und F 2) aus mineralstoffmodifizierter Cellulose sowie zwei verschiedene Nanoschichtsilikate (N 1 und N 2). Die Fasern können bezogen auf ihre Abmessungen dem Mikro- bis Submikrobereich zugeordnet werden, die Nanoschichtsilikate dem Submikro- bis Nanobereich. Die Zugabe für die Bitumenuntersuchungen erfolgte für jedes der Additive mit 2 Gew.-% und 5 Gew.-% bezogen auf die Bitumenmenge.

Die Asphaltuntersuchungen wurden nur mit den Faseradditiven (F 1, F 2) durchgeführt. Hier betrug die Zugabemenge der Fasern in Bezug auf das Bindemittel 2 Gew.-%. Zwei Varianten der Zugabereihenfolge bei Asphaltmischungen wurden untersucht, die Zugabe der Additive zum Bitumen vor dem Asphaltmischvorgang und die direkte Zugabe der Additive in den Asphaltmischer. Die Methode des Bitumenmodifizierens vor dem Asphaltmischvorgang stellte sich als unpraktikabel heraus. Schon bevor das modifizierte Bitumen dem Asphaltmischer zugegeben werden konnte, kam es zu Entmischungserscheinungen, die Fasern setzten sich am Boden des Gefäßes ab. Die Variante der Faserzugabe direkt in den Asphaltmischer ist vorzuziehen.

Um die ermittelten Kennwerte der mit Additiven modifizierten Bitumen und Asphalte bewerten zu können, wurden sie nicht modifizierten Referenzproben gegenübergestellt.

Für die Bitumenuntersuchungen kamen die gängigen Prüfverfahren, wie Bestimmung der Nadelpenetration, des Erweichungspunktes Ring und Kugel, des Brechpunktes

nach Fraaß sowie der Duktilität zum Einsatz. Weiterhin wurden die Viskositäten und auch die elastische Rückstellung bestimmt.

Bei allen untersuchten Proben war durch die Zugabe der Additive eine Zunahme der Konsistenz des Bitumens zu verzeichnen. Mit ansteigender Zugabemenge konnte auch eine weitere Steigerung der Konsistenz beobachtet werden. Deutlich wurde das durch die Verringerung der Penetrationstiefen und die Zunahme der Erweichungspunkte. In diesem Zusammenhang bewirkten die Nanoschichtsilikate eine stärkere Verringerung der Penetrationstiefen, insbesondere N 1. Die Faserzugabe verursachte vor allem eine Erhöhung der EP RuK, was auf eine armierende Wirkung schließen lässt.
Auffällig war im Gegensatz zu der „Verhärtung“ bei allen modifizierten Bitumen die Verringerung der Brechpunkte. Hierbei wiesen die Proben mit Nanoschichtsilikaten die tiefsten Brechpunkte auf. Die Brechpunkte der Fasern oder der Nanoschichtsilikate untereinander zeigten keine Unterschiede.
Auf Grund der „Verhärtung“ sowie der Senkung der Brechpunkte konnte für alle modifizierten Bitumen eine Vergrößerung der Plastizitätsspanne, die den Gebrauchstemperaturbereich definiert, im Vergleich zur Referenzprobe festgestellt werden. F 2 wies, gefolgt von N 1 die stärkste Temperaturempfindlichkeitsmindernde Wirkung auf.

Auch bei der Bestimmung des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens zeigt sich eine Bindemittelversteifung durch die Zugabe der Additive. Bei den untersuchten Bindemitteln wies erwartungsgemäß das nicht modifizierte Bitumen die geringste Viskosität auf. Die höchste Viskosität und zugleich auch die geringste Temperaturempfindlichkeit zeigte die Probe N1-5%. Hervorzuheben ist, dass Untersuchungen unter der Zugabe von 5 Gew.-% Fasern versuchstechnisch nicht durchzuführen waren. Unter Berücksichtigung der Plastizitätsspannen ließe sich schlussfolgern, dass diese Zugaben noch höhere Viskositäten verursachen als N1-5%.
Entsprechend der Vergrößerung der Viskosität stiegen auch die Äquiviskositätstemperaturen EVT 100 und EVT 1000. Das hat zur Folge, dass für die Herstellung und den Einbau von modifiziertem Asphalt höhere Temperaturen notwendig werden.

Im Zusammenhang mit den Mischgutuntersuchungen erfolgten die Bestimmung der Affinität, die Durchführung von Ablauftests, Untersuchungen zu temperaturabhängigen Verdichtungen, die Bestimmung von Marshall-Stabilitäten und -Fließwerten sowie Spurbildungsversuche.

Die Untersuchungen zur Affinität zeigten für die Probe mit F 2 die stärkste Umhüllung der Mineralstoffkörner. Da aber zwischen den einzelnen Proben keine gravierenden Unterschiede sichtbar wurden, ist ein Einfluss der Fasern nicht deutlich erkennbar.

Die Notwendigkeit des Einsatzes von Additiven zur Verbesserung des Ablaufverhaltens konnte mit den durchgeführten Ablauftests nicht nachgewiesen werden, da alle erfassten Rückstände, auch die der Referenzprobe, deutlich unter 0,1 Gew.-% lagen.

Wie auf Grund der Ergebnisse der Viskositätsuntersuchungen zu erwarten war, zeigte die Referenzprobe bei den Verdichtungstemperaturen 115 °C, 125 °C und 135 °C die höchsten Raumdichten, die niedrigsten Hohlraumgehalte und somit die größten Verdichtungen. Bei einer Verdichtungstemperatur von 145 °C wurde die stärkste Verdichtung bei den Proben mit F 1 festgestellt. Es zeigten sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den Zugaben F 1 und F 2.
Die Marshall-Stabilitäten der modifizierten Asphalte blieben bis auf wenige Ausnahmen unter denen der Referenzprobe. Die Ursache dafür liegt in der geringeren erreichten Verdichtung. In den Fällen, wo die Marshall-Stabilitäten der modifizierten Asphalte höher waren, wäre es möglich, dass die erhöhten Viskositäten die fehlende Verdichtung kompensierten. Direkte Aussagen über die Wirkung der Bindemittel können hier anhand der Marshall-Stabilität nicht getroffen werden.

Anders als bei den Marshall-Untersuchungen kann bei den Spurbildungsuntersuchungen auf Grund der Herstellungsart davon ausgegangen werden, dass der Verdichtungsgrad für alle Probekörper gleich ist. Somit sind Änderungen in der Spurrinnentiefe auf den Einfluss der eingesetzten Bindemittel zurückzuführen.
Bei den Untersuchungen zeigten die Probeplatten mit modifiziertem Asphalt höhere Widerstände gegen Verformungen als die Referenzprobe. Allerdings war kein deutlicher Unterschied zwischen den Wirkungen der beiden Fasertypen zu erkennen, eine Differenzierung somit nicht möglich.

Die ermittelten Messergebnisse der Untersuchungen sollten den Wirkungen herkömmlicher Additive gegenübergestellt werden. Zurückführend auf die dabei zur Anwendung gekommenen unterschiedlichen Untersuchungsmethoden und Materialien war ein Vergleich nur qualitativ möglich.

Bezüglich ihrer Wirkung entsprechen die in dieser Arbeit untersuchten Additive am ehesten den herkömmlichen stabilisierenden Zusätzen. Beachtenswert ist, dass durch ihren Einsatz ein Absenken der Brechpunkte erreicht wurde.

Die durchgeführten Versuche bestätigen die schwerere Verdichtbarkeit von Asphalt bei der Zugabe von stabilisierenden Zusätzen sowie den erhöhten Widerstand gegen Verformungen

Die Fasern F 1, F 2 und die Nanoschichtsilikate N 1 und N 2 haben deutlich keine viskositätssenkende Wirkung.

7 Ausblick

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit der untersuchten Additive werden weitere Versuche notwenig. Die hier ermittelten Ergebnisse sollten durch erweiterte Prüfungen untermauert werden. Vor allem der Einfluss von Nanoschichtsilikaten in Asphalt bedarf weiterer Untersuchungen.
Zudem erscheint es sinnvoll, weitere Nano-Additive, wie z. B. Fasern in Nanogröße, hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in Asphalt zu überprüfen.
Weiterhin ist über eine Kombination mehrerer Additive nachzudenken.

Als ergänzende Untersuchung ist die Bestimmung der Produkteigenschaften der Zusätze empfehlenswert. Neben der Ermittlung der Korngrößenverteilung mittels Luftstrahlsiebung oder Schlämmanalyse wären auch Untersuchungen zu Wassergehalt, Glühverlust und Dichte sinnvoll.

Bezüglich der Mischgutuntersuchungen empfiehlt es sich, eine Eignungsprüfung je Zusatz durchzuführen, mit dem Ziel, für jeden Zusatz Probekörper mit konstantem Hohlraumgehalt für die anschließenden Asphaltprüfungen herzustellen. Dazu sind Variationen von Bindemittel- und Zusatzgehalt nötig.

Sinnvoll wäre weiterhin auch eine Anhebung der Herstellungs- und Verdichtungstemperaturen von Asphalt entsprechend den Äquiviskositätstemperaturen der jeweiligen modifizierten Bitumen.

Um feststellen zu können, inwieweit die Verwendung verschiedener Zusätze die Verdichtbarkeit von Walzasphalt beeinflusst, sollten Bestimmungen der Verdichtbarkeit über die Dichteänderung oder die Dickenänderung in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit erfolgen.
Um einen quantitativen Vergleich zu ermöglichen, wären parallel stattfindende Versuche mit herkömmlichen Additiven zu empfehlen.

Literaturverzeichnis

ARAND 2000	ARAND, Wolfgang; ZANDER, Ulf; RENKEN, Peter; et. al.: Einfluss des Bindemittelgehaltes auf das mechanische Verhalten von Splittmastixasphalten mit unterschiedlichen stabilisierenden Zusätzen. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 794 (2000), Bonn: Bundesministerium für Verkehr, 2000.
ARAND 2006	ARAND, Wolfgang: *Asphaltstraßenbau - Asphaltdecken mit Naturasphalt.* URL: http://www.trinidad-lake-asphalt.com/site/PDF/TRINIDAD_01.PDF Aktualisierungsdatum: 08.03.2006
BMBF 2006a	NanoforLife - Nanotechnologien für die Gesundheit. URL: http://www.bmbf.de/de/5063.php Aktualisierungsdatum: 13.03.2006
BMBF 2006b	NanoMobil. URL: http://www.bmbf.de/de/1846.php Aktualisierungsdatum: 13.03.2006
BOTANIK 2006	*Lotus-Effekt*. URL: http://www.botanik.uni-bonn.de/system/lotus/de/lotus_effect_multimedia.html Aktualisierungsdatum: 13.03.2006
BUTZ 2003	BUTZ, Thorsten: Viskositätssenkende Additive im Asphaltstraßenbau. In: *Gestrata Journal* Jg. 25 (2003), Folge 10, S. 21 - 30. URL:http://www.asphalt.or.at/publikationen/Journal101.pdf Aktualisierungsdatum: 07.03.2006
DAMM 2002a	DAMM, Klaus-Werner; ABRAHAM, Jörn; BUTZ, Thorsten; et. al.: Asphaltverflüssiger als „intelligenter Füller“ für den Heißeinbau - ein neues Kapitel in der Asphaltbauweise - Teil 1. In: *Bitumen* Jg. 64 (2002), Heft 1, S. 19 - 24.
DAMM 2002b	DAMM, Klaus-Werner; ABRAHAM, Jörn; BUTZ, Thorsten; et. al.: Asphaltverflüssiger als „intelligenter Füller“ für den Heißeinbau - ein neues Kapitel in der Asphaltbauweise - Teil 2. In: *Bitumen* Jg. 65 (2002), Heft 2, S. 55 - 61.

DIABAS 2006	*Diabas* URL: http://www.geodienst.de/diabas.htm, Aktualisierungsdatum: 22.02.2006
ENZYKLOPÄDIE 2006a	URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Nanoteilchen Aktualisierungsdatum: 12.03.2006
ENZYKLOPÄDIE 2006b	URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffnanoröhre Aktualisierungsdatum: 13.03.2006
ENZYKLOPÄDIE 2006c	URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Additiv Aktualisierungsdatum: 07.03.2006
ENZYKLOPÄDIE 2006d	URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Trinidad-Naturasphalt Aktualisierungsdatum: 10.03.2006
EULITZ 1998	EULITZ, H.-J.; SCHELLENBERG, K.; RITTER, H.-J.; et al.: *Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat.* URL: http://www.fg-kalk-moertel.de/d/AiF_Projekt_10565N.pdf Aktualisierungsdatum: 10.03.2006
FGSV 1998	*Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt*. Ausgabe 1998. Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. Köln, 1998.
GAUER 1995	GAUER, P.-K.: Bindermittelträger - Stabilisierende Zusätze. In: *Asphaltstraßentagung 1995 - Vorträge*. Heft 32, Bonn, Kirschbaum Verlag, 1995.
GIELER 2006	GIELER, Rolf; DIMMIG-OSBURG, Andrea: *Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung: Der Baustoff als Werkstoff.* Berlin: Birkenhäuser Verlag, 2006.
HEILING 2003	HEILING, Günther; KRENDLINGER, Ernst: Gut gewachst rollt es besser. In: *asphalt* Jg. 2003, Heft 4, S. 12- 15.
HIESE 1988	HIESE, W.; KNOBLAUCH, H.: *Baustoffprüfungen. Versuche - Erläuterungen - Beispiele.* Düsseldorf: Werner-Verlag, 1988.
HILLEMEIER 2001	HILLEMEIER, Bernd: *Neue Baustoffe - Innovationen aus der Mikrowelt*. URL: www.akademieunion.de/_files/akademiejournal/2001-1/AKJ_2001-1-S-24-28_hillemeyer.pdf

HUTSCHENREUTHER 1998 — HUTSCHENREUTHER, Jürgen; WÖRNER, Thomas: *Asphalt im Straßenbau – Aus der Praxis des Verkehrsbaus.* Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998.

KÖRNER 1982 — KÖRNER, Manfred; GREIM, Günther: *Ein Beitrag zur Verbesserung von Gebrauchswerteigenschaften bituminöser Bindemittel und Gemische für Deckschichten im Straßenbau durch Zusatz ausgewählter Polyolefine zu Bitumen*. Dissertation, Technische Hochschule Leipzig, 1982.

LAJAIN 2001 — LAJAIN, A.: Untersuchung des Kraft-Verformungsverhaltens von faser- und paraffinmodifizierten Bindemitteln mit dem Kraftduktilometer. In: *Bitumen* Erscheinungsjahr 2001, Seite 146. URL: http://www.bitumen-magazin.de/ Aktualisierungsdatum: 08.03.2006

LOTUSAN 2006 — URL: http://www.lotusan.de/lotusan/_02_wissen/index.jsp Aktualisierungsdatum: 13.03.2006

MOTZ 1985 — PAULMANN, Gerhard; MOTZ, Heribert: Weiterführung und Erprobung von Untersuchungsverfahren zur Ermittlung der Einflüsse auf den Verformungswiderstand bituminöser Massen. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 441 (1985), Bonn: Bundesministerium für Verkehr, 1985.

MÜLLER 2005 — MÜLLER, Matthias: *Schallimpulszerkleinerung von Asphalten*. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2005.

NANOTECH 2006 — *Konventionelle Polymere leitfähig ausrüsten durch Zusatz von Kohlenstoff-Nanoröhren*. URL: http://www.nano-technology.de/ger/s02-news/s02-news-03.html Aktualisierungsdatum: 13.03.2006

PAULMANN 1985 — PAULMANN, Gerhard; KOLB, Karl Heinz: Einfluss von Polymerzusätzen auf den Verformungswiderstand bituminöser Deckschichten. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 441 (1985), Bonn: Bundesministerium für Verkehr, 1985.

REITER 2005] REITER, Rolf: Polymerbitumen mit höherem Modifikationsgrad. In: *Gestrata Journal* Jg. 27 (2005), Folge 109, S. 3 - 15.

RUWENSTROTH 2003 RUWENSTROTH, Hans-Friedrich: *Auswirkungen von wieder verwendeten Fräsasphalten mit polymermodifiziertem Bitumen und stabilisierenden Zusätzen auf Asphalteigenschaften*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2003.

SCHELLENBERG 1986 SCHELLENBERG, K.; VON DER WEPPEN, W.: Verfahren zur Bestimmung der Homogenitäts-Stabilität von Splittmastixasphalt. In: *Bitumen* Jg. 1986, Heft 1, S. 13-14.

SCHNEPPAT 2006 SCHNEPPAT, J. O.: *Funktionsweise der Nano-Versiegelung.* URL: http://nano-products.info/nanotechnologie-funktionsweise.php
Aktualisierungsdatum: 13.03.2006

SCHÖNEBURG 2006 Nach einer Email von Dr. Thomas Schöneburg, Werkstoffsysteme GmbH. 07.01.2006.

SCHÜNEMANN 2006 Nach einer Email von Marco Schünemann, KEMNABAU. 14.03.2006.

SHELL 1994 BEECKEN, G.; HÖPPEL, H.E.; et al.: *Shell Bitumen für den Straßenbau und andere Anwendungsgebiete*. Hamburg: Deutsche Shell AG, 1994.

STARK 2000 STARK, Jochen: Zement und Kalk: *Der Baustoff als Werkstoff.* Berlin; Birkhäuser Verlag, 2000.

SUSS 1993 SUSS, Georg; HINTERWÄLLER, Udo: Eigenschaften und Wirkungen von stabilisierenden Zusätzen in Splittmastixasphalten. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 659 (1993), Bonn: Bundesministerium für Verkehr, 1993.

TP A-STB 1997 *Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil: Spurbildungsversuch - Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad.* Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. Köln, 1997.

WERRA WHISK M0	Produkt - Qualität - Datenblatt werra whisk^{R} M0
WERRA WHISK F	Produkt - Qualität - Datenblatt werra whisk^{R} F0.8-0.9
ZTV-ASPHALT-STB 01	*Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt: ZTV-Asphalt-StB 01*. Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. Köln, 2001.

Zitierte Normen:

DIN 1996-4	Prüfung von Asphalt; Herstellung von Probekörpern aus Mischgut. 11/1984
DIN 1996-7	Prüfung von Asphalt; Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad. 12/1992
DIN 1996-11	Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete; Bestimmung von Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert. 07/1981
DIN 1996-20	Prüfung von Asphalt; Herstellung von Asphaltmischgut im Laboratorium. 12/1992
DIN 52007-1	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel; Bestimmung der Viskosität - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Auswertung. 09/2005
DIN 52007-2	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel; Bestimmung der Viskosität - Teil 2: Messungen mit dem Kugelzieh-Viskosimeter. 09/2005
DIN 52013	Prüfung von Bitumen; Bestimmung der Duktilität. 07/1985
DIN EN 1426	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel; Bestimmung der Nadelpenetration. 12/1999
DIN EN 1427	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel; Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren. 12/1999
DIN EN 12591	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Anforderungen an Straßenbaubitumen. 04/2000
DIN EN 12593	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel; Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß. 04/2000

DIN EN 12697-11 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 11; Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen. 03/2004

DIN EN 13398 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel; Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen. 12/2003

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Schematische Darstellung einer Kohlenstoffnanoröhre [ENZYKLOPÄDIE 2006b] 8
Abb. 1.2: Fassadenbeschichtungen mit *Lotus-Effekt* [LOTUSAN 2006] 10
Abb. 3.1: Sieblinienverlauf Asphaltbeton 0/11 S 18
Abb. 3.2: Faser 1 (F1) und Faser 2 (F2) 19
Abb. 3.3: v.l.n.r. Faser 1 in 32facher und in 66facher Vergrößerung 19
Abb. 3.4: v.l.n.r. Faser 2 in 32facher und in 66facher Vergrößerung 20
Abb. 3.5: Nanoschichtsilikat 1 (N1) und Nanoschichtsilikat 2 (N2) 20
Abb. 3.6: Dispersionsgerät zum Mischen von Bitumen und Fasern 21
Abb. 3.7: Labormischer 22
Abb. 3.8: Kugelzieh-Viskosimeter 25
Abb. 3.9: v.l.n.r. Marshall-Probekörper, Marshall-Verdichtungsgerät [MÜLLER 2005] 27
Abb. 3.10: v.l.n.r. Spurbildungstest-Probeplatten, Gerät zur Herstellung Probeplatten 28
Abb. 3.11: Prüfgerät Marshall-Stabilität und -Fließwert 30
Abb. 3.12: Spurbildungsgerät 31
Abb. 4.1: Plastizitätsspannen 34
Abb. 4.2: Viskositäts-Temperatur-Verhalten der modifizierten Bitumen (nach DIN 52007-1) 36
Abb. 4.3: v.l.n.r. Affinität bei M 0, MF1 und MF2 40
Abb. 4.4: Raumdichten in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur 42
Abb. 4.5: Hohlraumgehalte in Abhängigkeit von der Verdichtungstemperatur 43
Abb. 4.6: Marshall-Stabilität 44
Abb. 4.7: Marshall-Fließwert 45
Abb. 4.8: „Stripping“ an Probekörper M 0 bei Versuchstemp. 50 °C 46
Abb. 4.9: Vergleich Spurrinnentiefe 46
Abb. 4.10: v.l.n.r. Spurbildungstest M0 (40 °C), MF1B 47

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Gruppen stabilisierender Zusätze [SUSS 1993] 13
Tab. 2.2: Viskositätssenkende Additive [BUTZ 2003] 14
Tab. 3.1: Anforderungen an Straßenbaubitumen B 50/70 nach DIN EN 12591 16
Tab. 3.2: Charakteristische Kennwerte von Diabas [DIABAS 2006] 17
Tab. 3.3: Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches für Asphaltbeton 0/11 S 17
Tab. 3.4: Teilchengrößenverteilung (Gew.-%) nach DIN 53734 für F 1 [WERRA WHISK M0] .. 19
Tab. 3.5: Teilchengrößenverteilung (Gew.-%) nach DIN 53734 für F 2 [WERRA WHISK F] 20
Tab. 3.6: Bezeichnung und Zugabemenge der Additive für Bitumenprüfungen 21
Tab. 3.7: Bezeichnung und Zugabemenge der Additive für Asphaltprüfungen 23
Tab. 4.1: Kennwerte des modifizierten Bitumens 32
Tab. 4.2: Ermittlung Plastizitätsspannen 33
Tab. 4.3: Ergebnisse Bestimmung Viskosität 35
Tab. 4.4: Äquiviskositätstemperaturen 37
Tab. 4.5: Ergebnisse Duktilität und Elastische Rückstellung 39
Tab. 4.6: Ergebnisse Affinitätsuntersuchung 40
Tab. 4.7: Ergebnisse Ablauftest 41
Tab. 4.8: Ergebnisse Raumdichte 41
Tab. 4.9: Ergebnisse Hohlraumgehalt 42
Tab. 4.10: Ergebnisse Marshall-Stabilität 44
Tab. 4.11: Ergebnisse Marshall-Fließwert 45
Tab. 4.12: Spurrinnentiefen 47
Tab. 5.1: Vergleich der Bitumenkennwerte 49
Tab. 5.2: Vergleich der Asphaltkennwerte 51

Anhang

I Eignungsprüfung für Asphalt-Mischgut

II Bitumenkennwerte

III Viskositätsmessung nach DIN 52007 Teil 2 (mit Kugelzieh-Viskosimeter)

IV Affinität

V Bindemittelablauftest nach Schellenberg/von der Weppen

VI Asphaltuntersuchungen

VII Spurbildungstest

I Eignungsprüfung für Asphalt-Mischgut

Art des Mischgutes: Asphaltbeton 0/11 S

Bindemittel: B 50/70

Grundlagen: ZTV Asphalt-StB 01

I.1 Art und Herkunft der Mineralstoffe

Nr.	Mineralstoffart	Herkunft/Lieferant
1	Diabas, Edelsplitt 8/11 mm	Nesselgrund
2	Diabas, Edelsplitt 5/8 mm	Nesselgrund
3	Diabas, Edelsplitt 2/5 mm	Nesselgrund
4	Diabas, Edelbrechsand 0/2 mm	Nesselgrund
5	Natursand 0/2 mm	Schwabhausen
6	Kalkstein, Füller	Meiningen/Herpf

I.2 Art und Herkunft der Mineralstoffe

Kornklasse mm	Mineralstoffe in Gew.-%					
	1	2	3	4	5	6
31,5						
22,4 - 31,5						
16,0- 22,4						
11,2 - 16,0	9.6					
8,0 - 11,2	81.6	5.8				
5,0 - 8,0	8.1	84.3	6.8		0.1	
2,0 - 5,0		9.1	88.2	5.8	10.6	
0,71 - 2,0		0.1	3.3	31.4	51.9	0.8
0,25 - 0,71	0.1	0.1	0.7	28.5	31.5	1.4
0,09 - 0,25	0.2	0.2	0.4	17.5	5.4	10.5
0 - 0,09	0.4	0.4	0.6	16.8	0.5	87.3
Summe	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

I.3 Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches

Nr.	Gew.-%	Mineralstoffart
1	24.0	Diabas, Edelsplitt 8/11 mm
2	14.0	Diabas, Edelsplitt 5/8 mm
3	15.0	Diabas, Edelsplitt 2/5 mm
4	25.0	Diabas, Edelbrechsand 0/2 mm
5	17.0	Natursand 0/2 mm
6	5.0	Kalkstein, Füller
7		
8		
9		
	100.0	Mineralmasse

Brechsand-Natursand-Verhältnis: 1 : 0.8

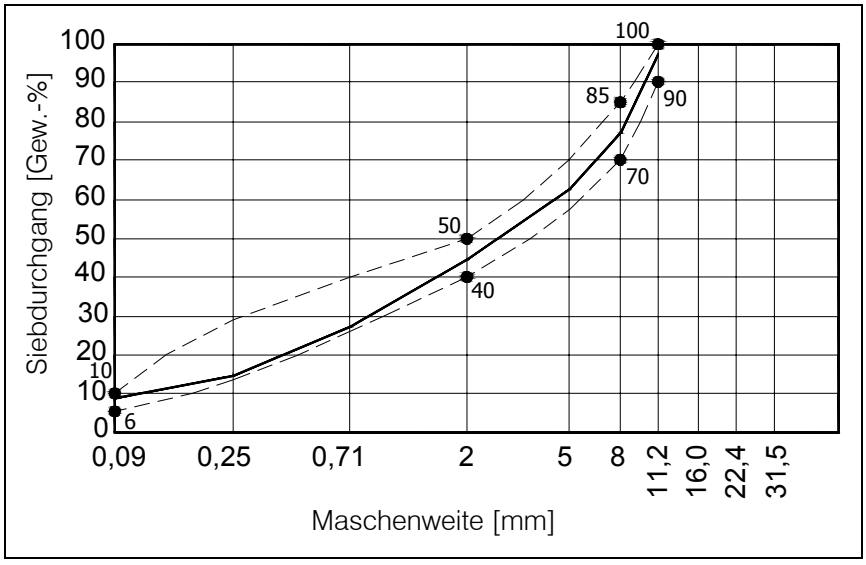
I.4 Kornverteilung des Mineralstoffgemisches

Kornklasse	Anteile	Gew.-%	Gew.-%	Grenzwerte
> 31,5			Splitt (Kies)	
22,4 - 31,5				
16,0- 22,4				
11,2 - 16,0	2.3	100.0	2.3	≤ 10.0
8,0 - 11,2	20.4	97.7	22.7	15.0 - 30.0
5,0 - 8,0	14.8	77.3		
2,0 - 5,0	17.7	62.5	55.2	50.0 - 60.0
0,71 - 2,0	17.3	44.8	Sand	
0,25 - 0,71	12.7	27.5	35.9	
0,09 - 0,25	5.9	14.8		
0 - 0,09	8.9	8.9	Füller 8.9	6.0 - 10.0

I.5 Eigenschaften des Mischgutes

Mischung Nr.		1	2	3	Grenzwerte
Bindemittelsorte **Bitumen 50/70**					
Bindemittelgehalt	Gew.-%	5.5	5.9	6.3	
Art/Menge der Zugabe	Gew.-%				
Gesamtbindemittelgehalt	Gew.-%	5.5	5.9	6.3	5.9 - 7.2
Bindemittelgehalt	Vol.-%	13.0	14.0	15.0	
Rohdichte (Mineralstoffmischung)	g/cm³	2.787	2.787	2.787	
Rohdichte (Asphaltmischung)	g/cm³	2.546	2.530	2.515	
Raumdichte	g/cm³	2.432	2.437	2.437	
Hohlraumgehalt (berechnet)	Vol.-%	4.5	3.2	2.7	3.0 - 5.0
Hohlraumgehalt (Mineral)	Vol.-%	17.5	17.2	17.7	
Hohlraumfüllungsgrad	%	74.3	81.4	84.7	
Stabilität nach Marshall	kN	16.0	14.0	13.0	
Vorgeschlagene Mischung			**xxxx**		

I.6 Graphische Darstellung des Sieblinienverlaufs Asphaltbeton 0/11 S



II Bitumenkennwerte

II.1 Kennwerte der modifizierten Bitumen

Additiv	**Nadel-penetration** 25 °C	**EP RuK**	**BP nach Fraaß**	**Plastizitätsspanne**	**Duk** 25 °C, 51,4 mm/min	**Elastische Rückstellung**
	[0,1 mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[cm]	[%]
B0	48	49,8	-5	54,8	> 100	12
F1-2 %	47	51,4	-8	59,4	33	10
F1-5 %	46	52,8	-7	59,8	17	15
F2-2 %	45	53,4	-7	60,4	20	13
F2-5 %	43	59,4	-8	67,4	17	19
N1-2 %	43	51,2	-7	58,2	> 100	8
N1-5 %	38	54,0	-11	65,0	> 100	9
N2-2 %	44	50,6	-8	58,6	> 100	13
N2-5 %	41	52,8	-11	63,8	93	13

III Viskositätsmessung nach DIN 52007 Teil 2 (mit Kugelzieh-Viskosimeter)

III.1 Viskositätsmesswerte B0

Probe			B0								
Prüftemperatur	°C		101			124			151		
Stabkugelnr.			2			2			2		
Stabkugelkonstante K			3			3			3		
Gewicht m	g		50	55	60	15	10	20	8	6	4
Zeit t	s	1	30,9	28,4	25,9	19,3	29,4	14,4	10,5	14,1	21,9
		2	31,0	28,4	26,3	19,3	29,3	14,6	10,6	14,2	21,7
		3	31,2	28,7	26,7	19,5	29,6	14,6	10,5	14,3	21,8
Mittelwert	s		31,0	28,5	26,3	19,4	29,4	14,5	10,5	14,2	21,8
dyn. Viskosität	mPas		4654	4699	4731	871	882	872	252	255	261
Mittelwert			4694,6			875,1			256,2		
Dichte bei 25°C	g/cm³		1,025								
Dichte bei Prüftemp.	g/cm³		0,978			0,964			0,947		
kin. Viskosität	mm²/s		4800			908			271		
EVT 100	°C		175								
EVT 1000	°C		123								

III.2 Viskositätsmesswerte F1-2%

Probe			F1-2%								
Prüftemperatur	°C		101			124			151		
Stabkugelnr.			2			2			2		
Stabkugelkonstante K			3			3			3		
Gewicht m	g		50	55	65	20	15	10	10	8	5
Zeit t	s	1	37,6	33,1	28,3	22,4	24,1	34,2	12,0	14,3	19,2
		2	37,0	33,7	28,1	19,7	23,7	34,4	11,2	15,4	23,1
		3	36,8	35,5	31,5	18,4	22,7	34,9	12,7	14,1	19,0
Mittelwert	s		37,1	34,1	29,3	20,2	23,5	34,5	12,0	14,6	20,4
dyn. Viskosität	mPas		5570	5627	5714	1210	1058	1035	359	350	307
Mittelwert			5636,7			1100,8			338,6		
Dichte bei 25°C	g/cm³		1,025								
Dichte bei Prüftemp.	g/cm³		0,978			0,964			0,947		
kin. Viskosität	mm²/s		5763			1142			358		
EVT 100°C			181								
EVT 1000°C			126								

III.3 Viskositätsmesswerte F2-2%

Probe			F2-2%								
Prüftemperatur	°C		101			124			151		
Stabkugelnr.			2			2			2		
Stabkugelkonstante K			3			3			3		
Gewicht m	g		50	60	70	20	15	10	10	8	6
Zeit t	s	1	42,6	32,9	27,5	20,1	27,6	45,8	13,3	16,2	21,8
		2	40,6	32,6	28,0	21,4	27,3	42,0	12,7	16,8	21,8
		3	40,6	32,7	27,7	20,5	28,1	40,7	12,4	15,8	21,8
Mittelwert	s		41,3	32,7	27,7	20,7	27,7	42,8	12,8	16,3	21,8
dyn. Viskosität	mPas		6190	5892	5824	1240	1245	1285	384	390	392
Mittelwert			5968,7			1256,7			388,9		
Dichte bei 25°C	g/cm³		1,025								
Dichte bei Prüftemp.	g/cm³		0,978			0,964			0,947		
kin. Viskosität	mm²/s		6103			1304			411		
EVT 100°C			187								
EVT 1000°C			130								

III.4 Viskositätsmesswerte N1-2%

Probe			N1-2%								
Prüftemperatur	°C		101			124			151		
Stabkugelnr.			2			2			2		
Stabkugelkonstante K			3			3			3		
Gewicht m	g		50	55	60	20	15	10	9	7	5
Zeit t	s	1	39,0	35,2	32,0	17,9	23,9	36,6	11,3	15,0	21,2
		2	40,4	34,9	31,6	18,0	24,2	36,6	11,4	14,9	21,3
		3	39,9	34,9	31,8	17,9	24,1	36,5	11,3	14,8	21,2
Mittelwert	s		39,8	35,0	31,8	18,0	24,1	36,6	11,4	14,9	21,2
dyn. Viskosität	mPas		5967	5771	5726	1077	1083	1097	307	313	318
Mittelwert			5821,2			1085,4			312,5		
Dichte bei 25°C	g/cm³		1,025								
Dichte bei Prüftemp.	g/cm³		0,978			0,964			0,947		
kin. Viskosität	mm²/s		5952			1126			330		
EVT 100°C			182								
EVT 1000°C			127								

III.5 Viskositätsmesswerte N1-5%

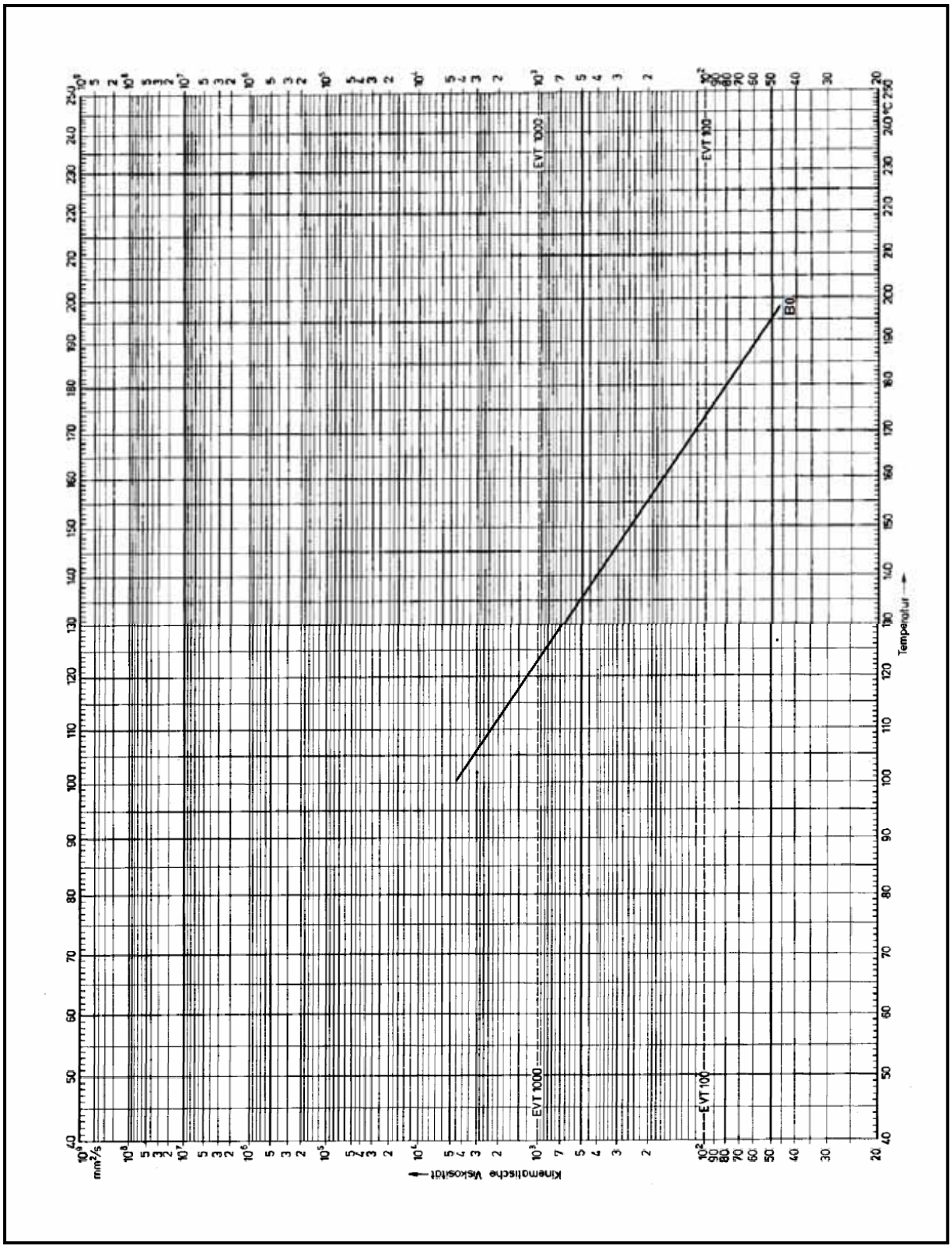
Probe			N1-5%								
Prüftemperatur	°C		119			124			151		
Stabkugelnr.			2			2			2		
Stabkugelkonstante K			3			3			3		
Gewicht m	g		50	55	45	20	25	30	10	8	5
Zeit t	s	1	19,4	17,7	21,9	27,6	21,9	18,1	19,0	22,2	37,2
		2	19,9	18,0	22,2	27,2	21,8	17,9	18,0	22,0	36,8
		3	19,8	17,9	21,9	27,3	21,8	18,0	17,9	22,7	36,5
Mittelwert	s		19,7	17,8	22,0	27,3	21,8	18,0	18,3	22,3	36,8
dyn. Viskosität	mPas		2952	2944	2970	1640	1638	1619	548	535	553
Mittelwert			2955,2			1632,4			545,4		
Dichte bei 25°C	g/cm³		1,025								
Dichte bei Prüftemp.	g/cm³		0,967			0,964			0,947		
kin. Viskosität	mm²/s		3056			1693			576		
EVT 100°C			199								
EVT 1000°C			139								

III.6 Viskositätsmesswerte N2-2%

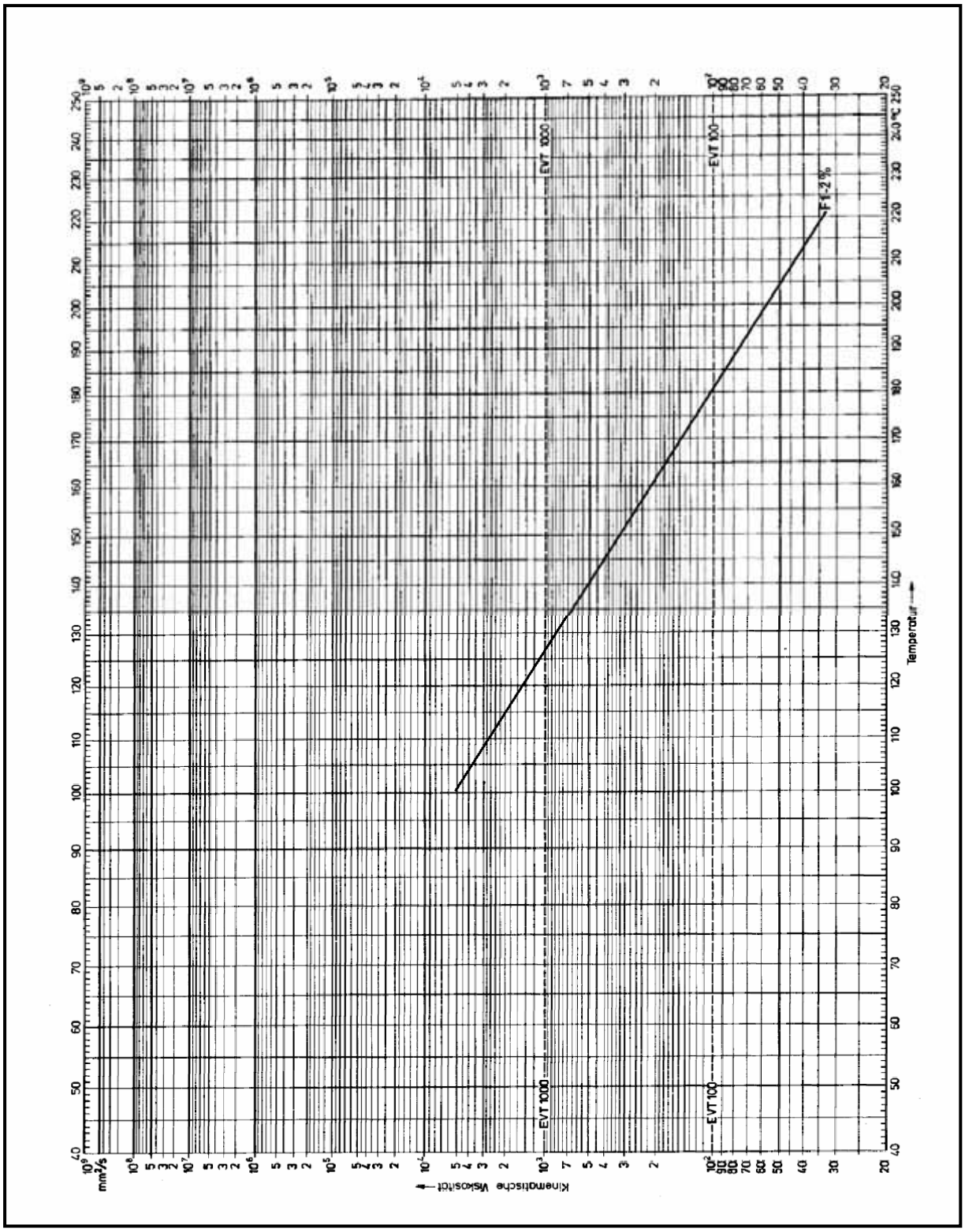
Probe			N2-2%								
Prüftemperatur	°C		101			124			151		
Stabkugelnr.			2			2			2		
Stabkugelkonstante K			3			3			3		
Gewicht m	g		50	60	70	20	15	10	5	7	6
Zeit t	s	1	37,2	31,0	26,2	17,3	23,3	35,2	21,2	14,8	17,2
		2	37,0	30,7	26,1	17,5	23,4	35,7	21,2	14,8	17,4
		3	37,0	30,7	26,4	17,5	23,4	35,2	21,2	14,9	17,3
Mittelwert	s		37,1	30,8	26,2	17,4	23,4	35,3	21,2	14,8	17,3
dyn. Viskosität	mPas		5562	5543	5508	1044	1053	1060	318	312	311
Mittelwert			5537,7			1052,4			313,5		
Dichte bei 25°C	g/cm³		1,025								
Dichte bei Prüftemp.	g/cm³		0,978			0,964			0,947		
kin. Viskosität	mm²/s		5662			1092			331		
EVT 100°C			179								
EVT 1000°C			127								

III.7 Viskositätsmesswerte N2-5%

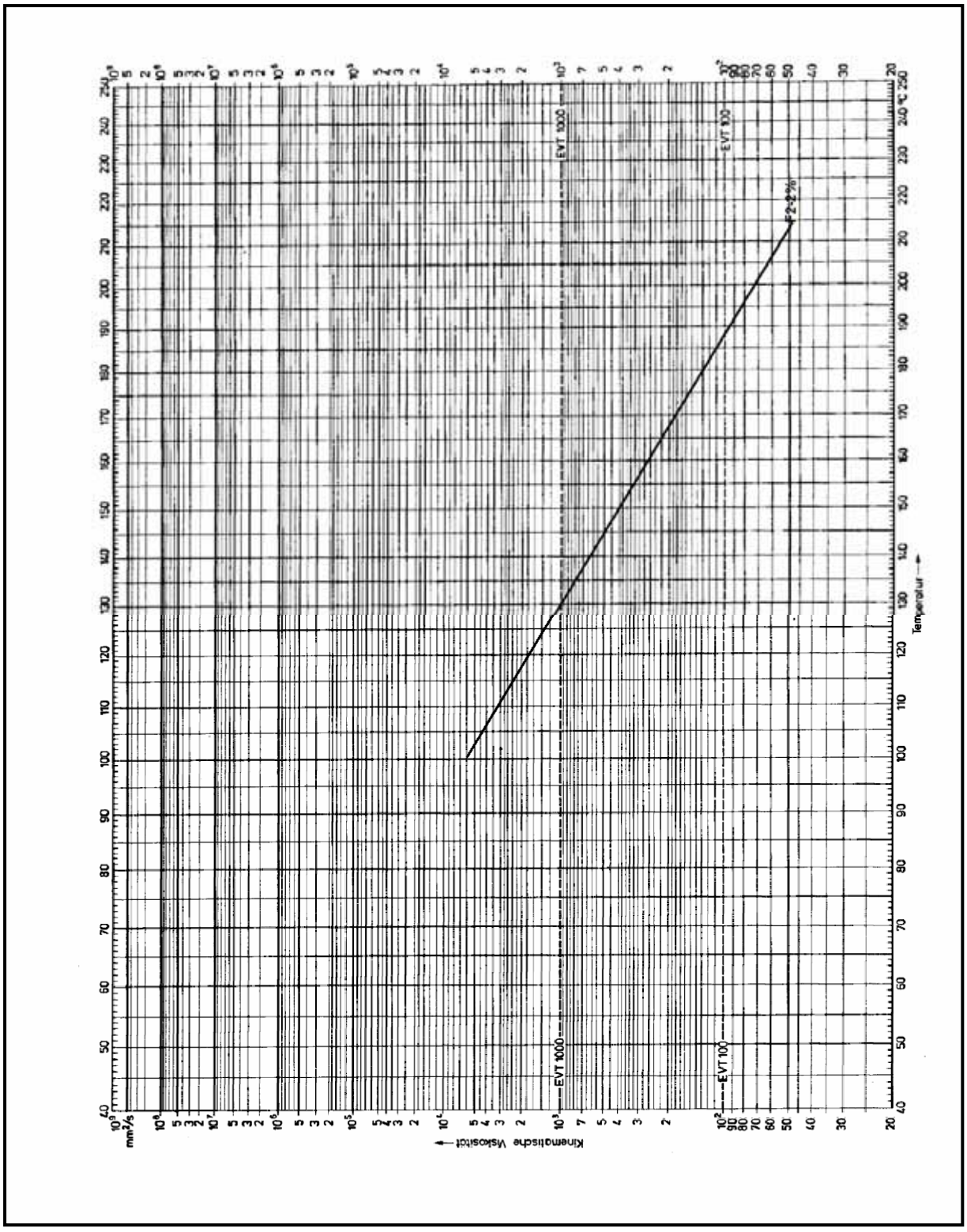
Probe			N2-5%								
Prüftemperatur	°C		101			124			151		
Stabkugelnr.			2			2			2		
Stabkugelkonstante K			3			3			3		
Gewicht m	g		60	70	80	20	15	25	10	8	5
Zeit t	s	1	40,9	35,4	30,7	24,7	32,6	18,9	15,6	18,6	31,0
		2	41,8	35,2	30,7	24,2	32,3	19,0	14,8	18,4	30,8
		3	41,5	36,9	30,7	24,2	32,2	19,1	14,5	18,3	31,0
Mittelwert	s		41,4	35,8	30,7	24,4	32,4	19,0	15,0	18,5	30,9
dyn. Viskosität	mPas		7449	7523	7373	1461	1457	1424	449	443	464
Mittelwert			7448,2			1447,4			452,1		
Dichte bei 25°C	g/cm³		1,025								
Dichte bei Prüftemp.	g/cm³		0,978			0,964			0,947		
kin. Viskosität	mm²/s		7616			1501			477		
EVT 100°C			194								
EVT 1000°C			134								



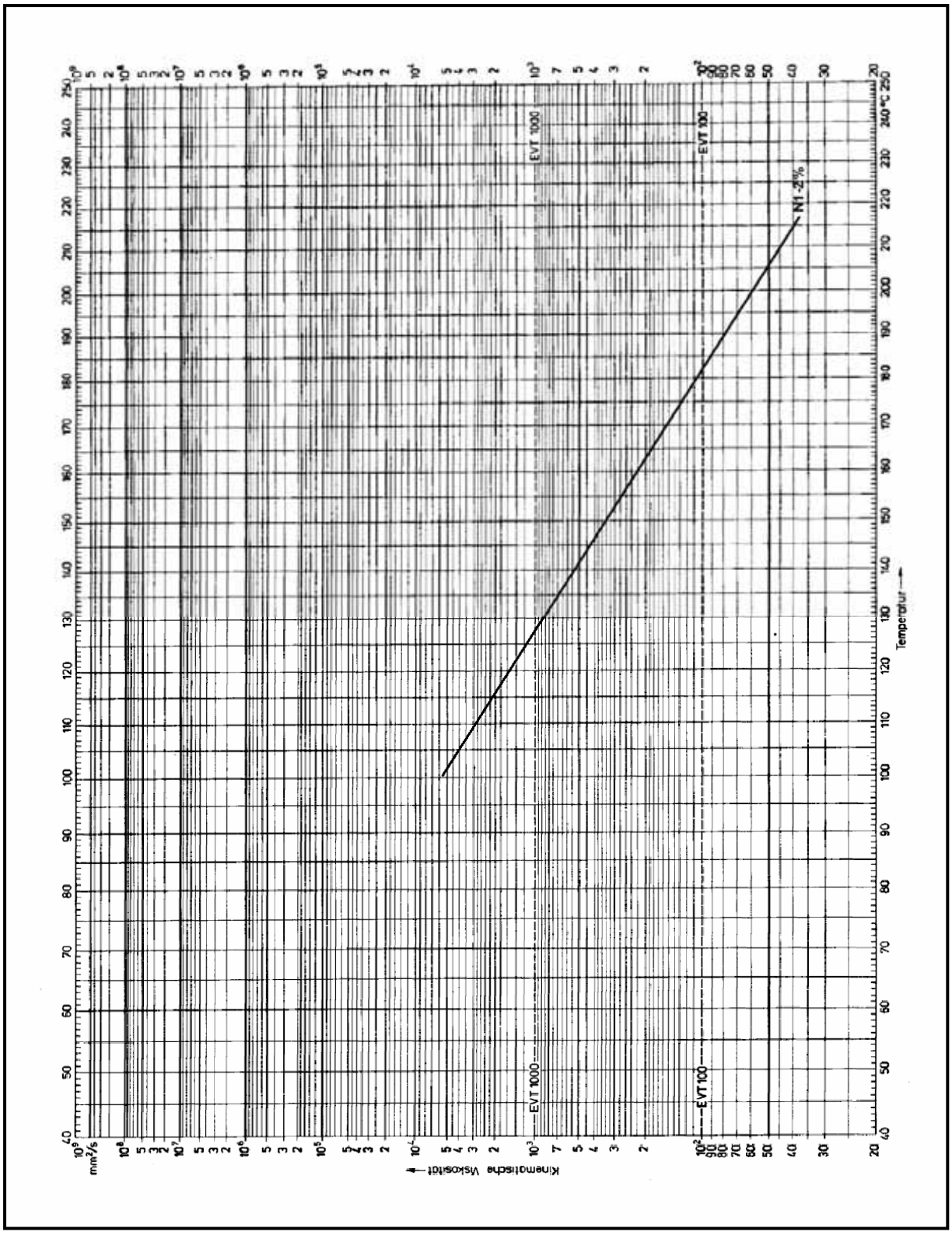
Viskositäts-Temperatur-Blatt B0 (nach DIN 52007-1)



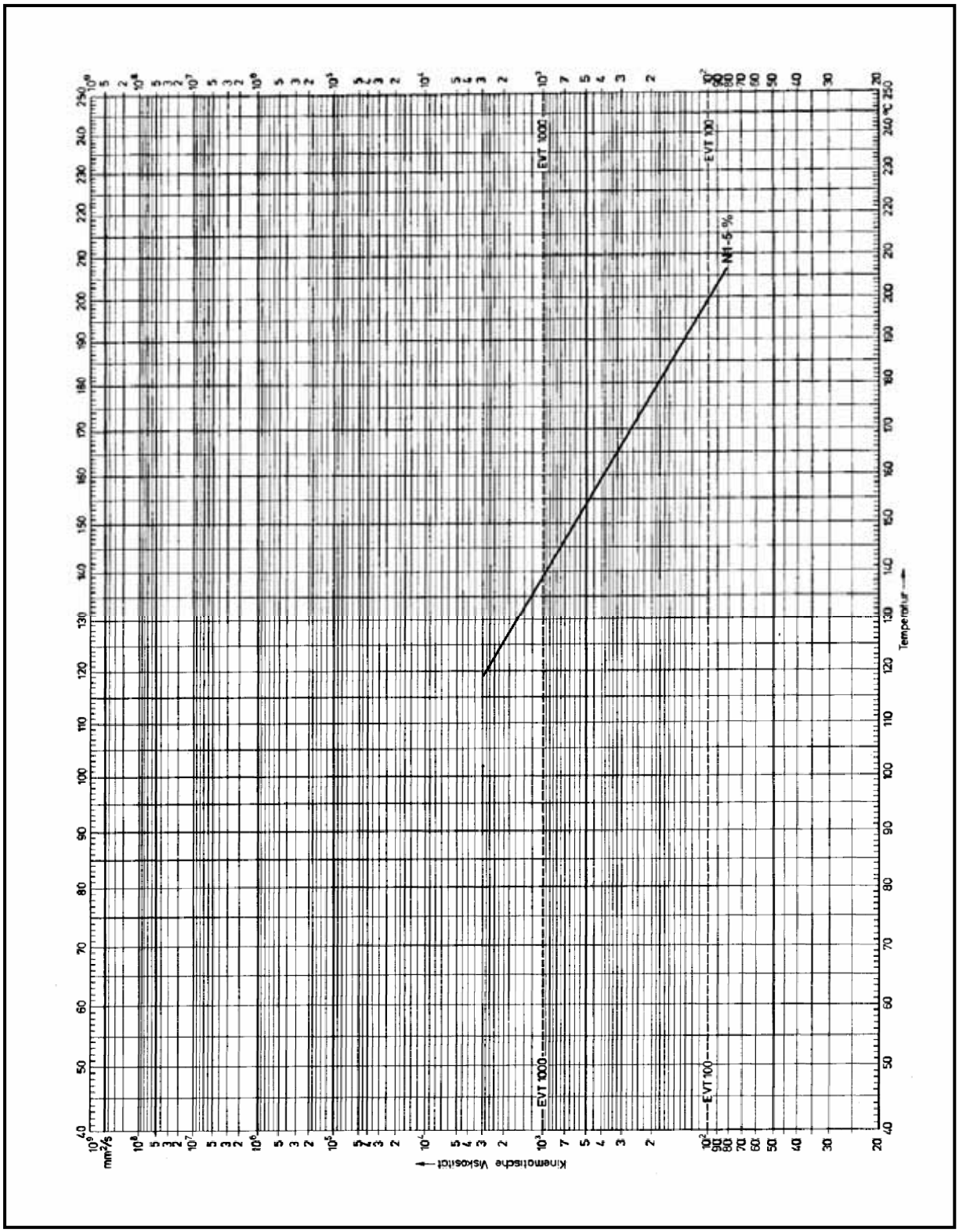
Viskositäts-Temperatur-Blatt F1-2% (nach DIN 52007-1)



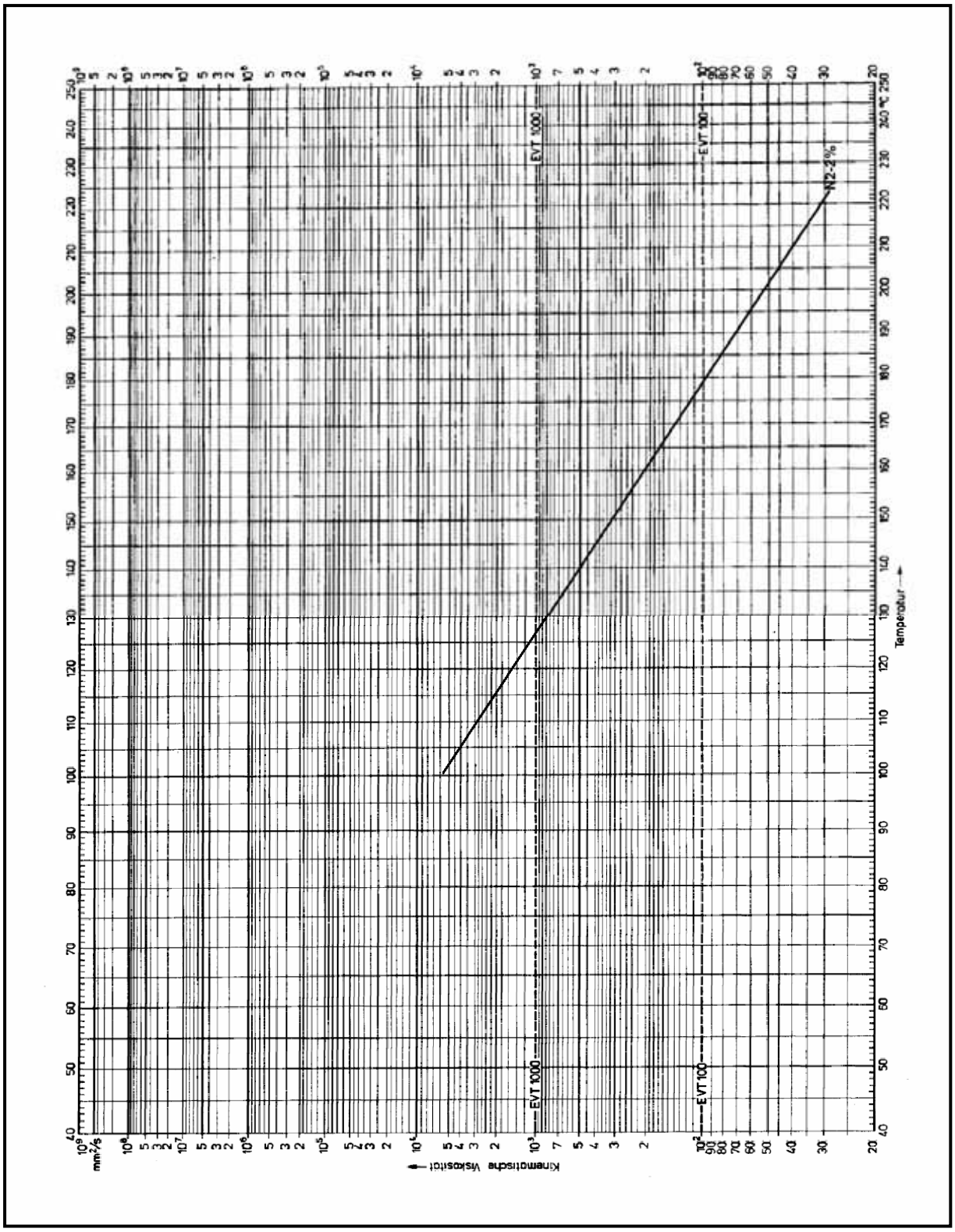
Viskositäts-Temperatur-Blatt F2-2% (nach DIN 52007-1)



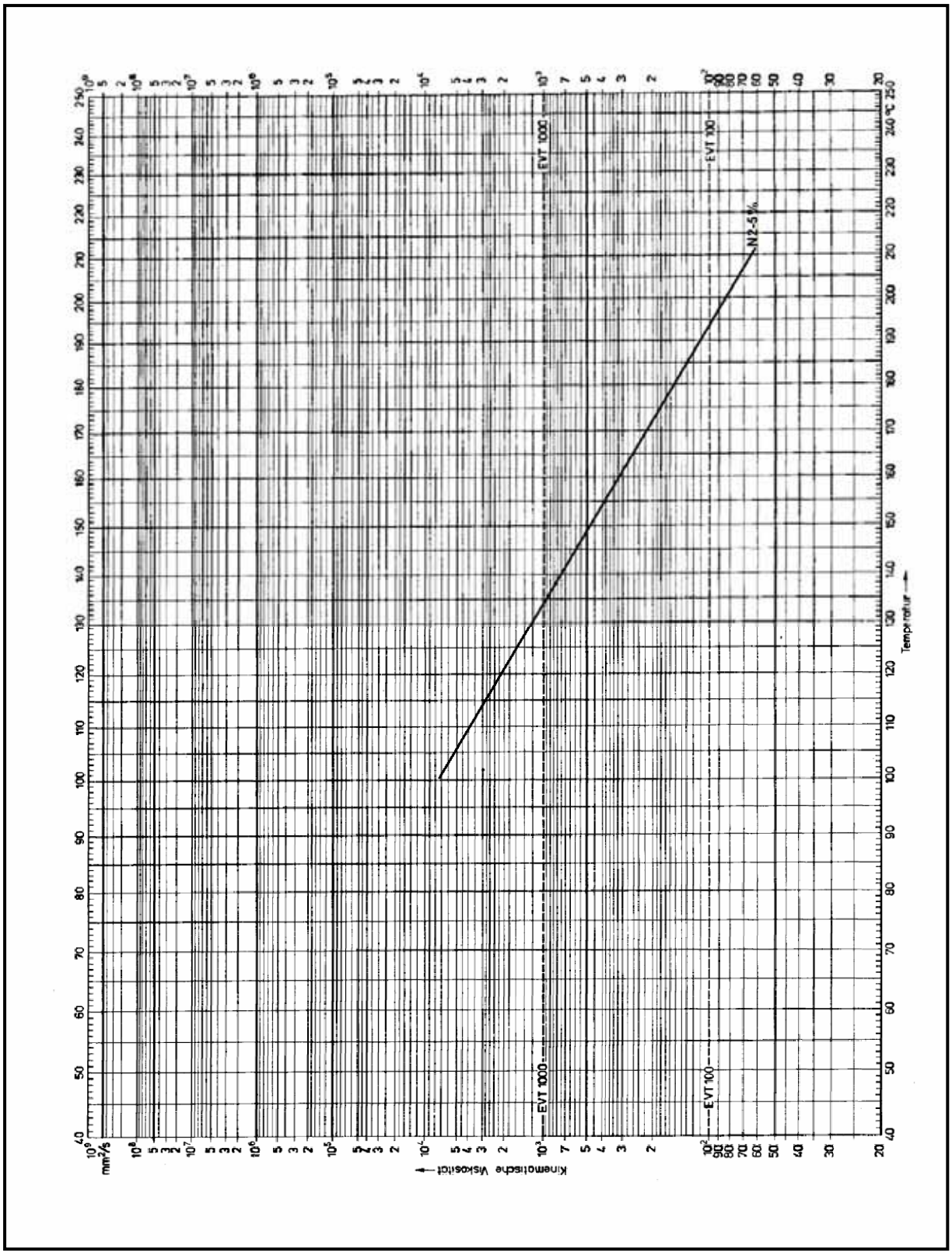
Viskositäts-Temperatur-Blatt N1-2% (nach DIN 52007-1)



Viskositäts-Temperatur-Blatt N1-5% (nach DIN 52007-1)



Viskositäts-Temperatur-Blatt N2-2% (nach DIN 52007-1)



Viskositäts-Temperatur-Blatt N2-5% (nach DIN 52007-1)

IV Affinität

Additiv	Umhüllte Oberfläche Prüfkörnung mit Bitumen
M0	85 %
	
MF1B	85 - 90 %
	
MF2B	90 %
	

V Bindemittelablauftest nach Schellenberg/von der Weppen

Datum		11.01.2006
Probenbezeichnung		M0
stab. Zusatz		-
Mischgutart		AB 0/11S
Bindemittel		B 50/70
Becherglas, Nr.		3
Becherglas, leer	g	261,8
Mischgut Einwaage	g	1055,7
Becherglas, voll	g	1317,5
Rückstand Becherglas	g	262,0
Rückstand Becherglas	%	**0,02**

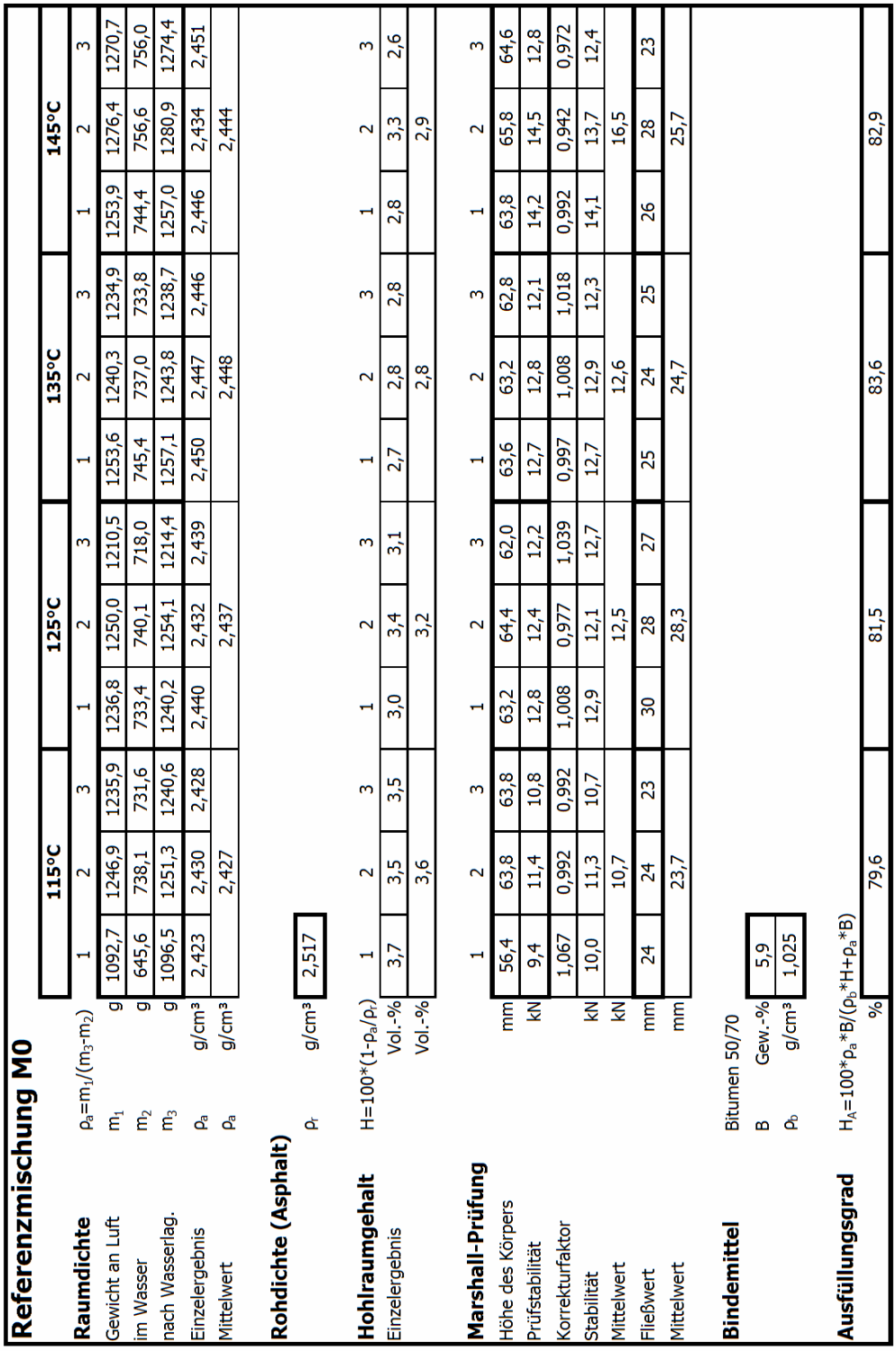
Datum		18.01.2006
Probenbezeichnung		MF1A
stab. Zusatz		Faser 1
Mischgutart		AB 0/11S
Bindemittel		B 50/70
Becherglas, Nr.		7
Becherglas, leer	g	206,0
Mischgut Einwaage	g	1090,7
Becherglas, voll	g	1296,6
Rückstand Becherglas	g	206,2
Rückstand Becherglas	%	**0,02**

Datum		23.01.2006
Probenbezeichnung		MF2A
stab. Zusatz		Faser 2
Mischgutart		AB 0/11S
Bindemittel		B 50/70
Becherglas, Nr.		7
Becherglas, leer	g	205,86
Mischgut Einwaage	g	1204,28
Becherglas, voll	g	1410,14
Rückstand Becherglas	g	206,1
Rückstand Becherglas	%	**0,02**

Datum		24.01.2006
Probenbezeichnung		MF1B
stab. Zusatz		Faser 1
Mischgutart		AB 0/11S
Bindemittel		B 50/70
Becherglas, Nr.		3
Becherglas, leer	g	261,4
Mischgut Einwaage	g	1058
Becherglas, voll	g	1319,6
Rückstand Becherglas	g	261,8
Rückstand Becherglas	%	**0,04**

Datum		25.01.2006
Probenbezeichnung		MF2B
stab. Zusatz		Faser 2
Mischgutart		AB 0/11S
Bindemittel		B 50/70
Becherglas, Nr.		7
Becherglas, leer	g	205,9
Mischgut Einwaage	g	1087
Becherglas, voll	g	1292,9
Rückstand Becherglas	g	206,2
Rückstand Becherglas	%	**0,03**

VI Asphaltuntersuchungen



Referenzmischung M0

			115°C			125°C			135°C			145°C		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Raumdichte	$\rho_a=m_1/(m_3-m_2)$													
Gewicht an Luft	m_1	g	1092,7	1246,9	1235,9	1236,8	1250,0	1210,5	1253,6	1240,3	1234,9	1253,9	1276,4	1270,7
im Wasser	m_2	g	645,6	738,1	731,6	733,4	740,1	718,0	745,4	737,0	733,8	744,4	756,6	756,0
nach Wasserlag.	m_3	g	1096,5	1251,3	1240,6	1240,2	1254,1	1214,4	1257,1	1243,8	1238,7	1257,0	1280,9	1274,4
Einzelergebnis	ρ_a	g/cm³	2,423	2,430	2,428	2,440	2,432	2,439	2,450	2,447	2,446	2,446	2,434	2,451
Mittelwert	ρ_a	g/cm³		2,427			2,437			2,448			2,444	
Rohdichte (Asphalt)														
	ρ_r	g/cm³	2,517											
Hohlraumgehalt	$H=100*(1-\rho_a/\rho_r)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Einzelergebnis		Vol.-%	3,7	3,5	3,5	3,0	3,4	3,1	2,7	2,8	2,8	2,8	3,3	2,6
		Vol.-%		3,6			3,2			2,8			2,9	
Marshall-Prüfung			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Höhe des Körpers		mm	56,4	63,8	63,8	63,2	64,4	62,0	63,6	63,2	62,8	63,8	65,8	64,6
Prüfstabilität		kN	9,4	11,4	10,8	12,8	12,4	12,2	12,7	12,8	12,1	14,2	14,5	12,8
Korrekturfaktor			1,067	0,992	0,992	1,008	0,977	1,039	0,997	1,008	1,018	0,992	0,942	0,972
Stabilität		kN	10,0	11,3	10,7	12,9	12,1	12,7	12,7	12,9	12,3	14,1	13,7	12,4
Mittelwert		kN		10,7			12,5			12,6			16,5	
Fließwert		mm	24	24	23	30	28	27	25	24	25	26	28	23
Mittelwert		mm		23,7			28,3			24,7			25,7	
Bindemittel	Bitumen 50/70													
	B	Gew.-%	5,9											
	ρ_b	g/cm³	1,025											
Ausfüllungsgrad	$H_A=100*\rho_a*B/(\rho_b*H+\rho_a*B)$													
		%		79,6			81,5			83,6			82,9	

Asphaltuntersuchung M0

Mischung Faser 1 in Bitumen

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Raumdichte	$\rho_a=m_1/(m_3-m_2)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Gewicht an Luft	m_1	g	1249,8	1247,4	1259,6	1328,7	1258,3	1314,4	1221,6	1197,0	1214,0	1266,9	1247,7	1225,5
im Wasser	m_2	g	737,9	737,1	740,9	783,3	743,8	773,6	722,9	707,5	717,5	751,5	741,9	727,9
nach Wasserlag.	m_3	g	1254,5	1252,0	1265,0	1332,9	1262,8	1319,4	1226,6	1200,8	1218,1	1270,2	1251,1	1229,9
Einzelergebnis	ρ_a	g/cm³	2,419	2,423	2,403	2,418	2,424	2,408	2,425	2,427	2,425	2,442	2,450	2,441
Mittelwert	ρ_a	g/cm³		2,415			2,417			2,426			2,445	

Rohdichte (Asphalt)

ρ_r	g/cm³	2,517

Hohlraumgehalt	$H=100*(1-\rho_a/\rho_r)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Einzelergebnis		Vol.-%	3,9	3,8	4,5	4,0	3,7	4,3	3,6	3,6	3,7	3,0	2,6	3,0
		Vol.-%		4,0			4,0			3,6			2,9	

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Marshall-Prüfung			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Höhe des Körpers		mm	64,4	64,2	65,6	68,2	64,4	68,0	62,8	61,6	62,4	64,6	63,6	63,0
Prüfstabilität		kN	10,8	10,8	10,7	14,3	11,8	13,4	11,8	11,1	11,9	15,2	13,8	13,7
Korrekturfaktor			0,977	0,982	0,947	0,938	0,977	0,938	1,018	1,049	1,028	0,972	0,997	1,013
Stabilität		kN	10,6	10,6	10,1	13,4	11,5	12,6	12,0	11,6	12,2	14,8	13,8	13,9
Mittelwert		kN		10,4			12,5			12,0			14,1	
Fließwert		mm	23	28	26	26	25	26	22	23	21	24	21	23
Mittelwert		mm		25,7			25,7			22,0			22,7	

Bindemittel Bitumen 50/70

B	Masse-%	5,9
ρ_b	g/cm³	1,025

Ausfüllungsgrad	$H_A=100*\rho_a*B/(\rho_b*H+\rho_a*B)$													
		%		77,4			77,7			79,4			83,0	

Mischung Faser 2 in Bitumen

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Raumdichte	$\rho_a=m_1/(m_3-m_2)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Gewicht an Luft	m_1	g	1206,5	1256,2	1238,8	1246,7	1267,4	1234,8	1273,0	1261,7	1262,9	1246,3	1240,4	1198,8
im Wasser	m_2	g	710,4	741,2	729,1	737,3	748,9	729,7	753,8	747,4	748,0	737,7	737,4	709,4
nach Wasserlag.	m_3	g	1210,6	1260,3	1243,4	1251,3	1273,7	1239,0	1277,4	1266,6	1267,3	1250,4	1244,4	1202,3
Einzelergebnis	ρ_a	g/cm³	2,412	2,420	2,409	2,425	2,415	2,425	2,431	2,430	2,432	2,431	2,447	2,432
Mittelwert	ρ_a	g/cm³		2,414			2,422			2,431			2,437	

Rohdichte (Asphalt)			
	ρ_r	g/cm³	2,517

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Hohlraumgehalt	$H=100*(1-\rho_a/\rho_r)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Einzelergebnis		Vol.-%	4,2	3,9	4,3	3,6	4,1	3,7	3,4	3,5	3,4	3,4	2,8	3,4
		Vol.-%		4,1			3,8			3,4			3,2	

		115°C			125°C			135°C			145°C		
Marshall-Prüfung		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Höhe des Körpers	mm	62,4	64,6	64,0	64,2	66,0	63,4	65,4	65,0	65,2	64,2	63,2	61,4
Prüfstabilität	kN	9,4	10,9	9,6	10,4	11,1	12,2	13,0	13,1	13,2	14,6	13,6	12,6
Korrekturfaktor		1,028	0,972	0,987	0,982	0,938	1,003	0,952	0,962	0,957	0,982	1,008	1,055
Stabilität	kN	9,7	10,6	9,5	10,2	10,4	12,2	12,4	12,6	12,6	14,3	13,7	13,3
Mittelwert	kN		9,9			11,0			12,5			13,8	
Fließwert	mm	21	23	24	22	25	25	26	24	27	25	22	24
Mittelwert	mm		22,7			24,0			25,7			23,7	

Bindemittel	Bitumen 50/70		
	B	Masse-%	5,9
	ρ_b	g/cm³	1,025

		115°C	125°C	135°C	145°C
Ausfüllungsgrad	$H_A=100*\rho_a*B/(\rho_b*H+\rho_a*B)$				
	%	77,2	78,6	80,4	81,4

Mischung Faser 1 in Asphalt

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Raumdichte	$\rho_a=m_1/(m_3-m_2)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Gewicht an Luft	m_1	g	1287,5	1260,6	1250,6	1248,1	1242,2	1231,5	1266,7	1212,8	1237,2	1282,2	1296,5	1287,9
im Wasser	m_2	g	763,3	745,8	738,3	737,7	736,4	727,5	751,9	717,0	734,4	762,0	772,5	763,6
nach Wasserlag.	m_3	g	1292,3	1264,9	1255,1	1251,9	1246,6	1235,5	1270,3	1216,9	1242,0	1285,9	1300,4	1291,3
Einzelergebnis	ρ_a	g/cm³	2,434	2,428	2,420	2,427	2,435	2,424	2,443	2,426	2,437	2,447	2,456	2,441
Mittelwert	ρ_a	g/cm³		2,427			2,429			2,436			2,448	

Rohdichte (Asphalt)

ρ_r	g/cm³	2,517

Hohlraumgehalt	$H=100*(1-\rho_a/\rho_r$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Einzelergebnis		Vol.-%	3,3	3,5	3,9	3,6	3,3	3,7	2,9	3,6	3,2	2,8	2,4	3,0
		Vol.-%		3,6			3,5			3,2			2,7	

Marshall-Prüfung			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Höhe des Körpers		mm	65,6	64,4	63,8	64,2	63,8	63,4	64,4	62,2	63,4	65,0	65,6	65,6
Prüfstabilität		kN	12,2	11,3	10,3	12,2	11,4	10,4	13,6	10,6	13,1	15,2	16,1	14,4
Korrekturfaktor			0,947	0,977	0,992	0,982	0,992	1,003	0,977	1,033	1,003	0,962	0,947	0,947
Stabilität		kN	11,6	11,0	10,2	12,0	11,3	10,4	13,3	10,9	13,1	14,6	15,2	13,6
Mittelwert		kN		10,9			11,2			12,5			14,5	
Fließwert		mm	26	26	26	29	25	25	25	25	26	26	26	25
Mittelwert		mm		26,0			26,3			25,3			25,7	

Bindemittel Bitumen 50/70

B	Masse-%	5,9
ρ_b	g/cm³	1,025

Ausfüllungsgrad	$H_A=100*\rho_a*B/(\rho_b*H+\rho_a*B)$													
		%		79,7			79,9			81,3			83,7	

Mischung Faser 2 in Asphalt

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Raumdichte	$\rho_a=m_1/(m_3-m_2)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Gewicht an Luft	m_1	g	1226,2	1262,6	1265,2	1284,3	1270,9	1259,6	1215,4	1228,3	1285,8	1255,1	1224,0	1256,9
im Wasser	m_2	g	724,8	745,9	746,1	761,5	752,0	746,0	721,1	729,2	762,9	744,8	724,2	743,8
nach Wasserlag.	m_3	g	1230,2	1266,7	1269,9	1289,2	1275,0	1264,2	1218,7	1231,6	1290,0	1258,5	1228,1	1260,5
Einzelergebnis	ρ_a	g/cm³	2,426	2,424	2,415	2,434	2,430	2,431	2,443	2,445	2,439	2,443	2,429	2,433
Mittelwert	ρ_a	g/cm³		2,422			2,432			2,442			2,435	

Rohdichte (Asphalt)			
	ρ_r	g/cm³	2,517

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Hohlraumgehalt	$H=100*(1-\rho_a/\rho_r)$		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Einzelergebnis		Vol.-%	3,6	3,7	4,0	3,3	3,5	3,4	3,0	2,9	3,1	2,9	3,5	3,4
		Vol.-%		3,8			3,4			3,0			3,3	

			115°C			125°C			135°C			145°C		
Marshall-Prüfung			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Höhe des Körpers		mm	63,0	64,8	65,4	65,6	65,2	64,6	61,8	62,6	65,6	64,0	62,6	64,6
Prüfstabilität		kN	11,0	11,3	11,4	12,8	11,4	11,6	12,7	13,2	14,8	12,7	11,8	13,6
Korrekturfaktor			1,013	0,967	0,952	0,947	0,957	0,972	1,044	1,023	0,947	0,987	1,023	0,972
Stabilität		kN	11,1	10,9	10,9	12,1	10,9	11,3	13,3	13,5	14,0	12,5	12,1	13,2
Mittelwert		kN		11,0			11,4			13,6			12,6	
Fließwert		mm	24	26	27	26	26	25	23	23	24	24	26	28
Mittelwert		mm		25,7			25,7			23,3			26,0	

Bindemittel	Bitumen 50/70		
	B	Masse-%	5,9
	ρ_b	g/cm³	1,025

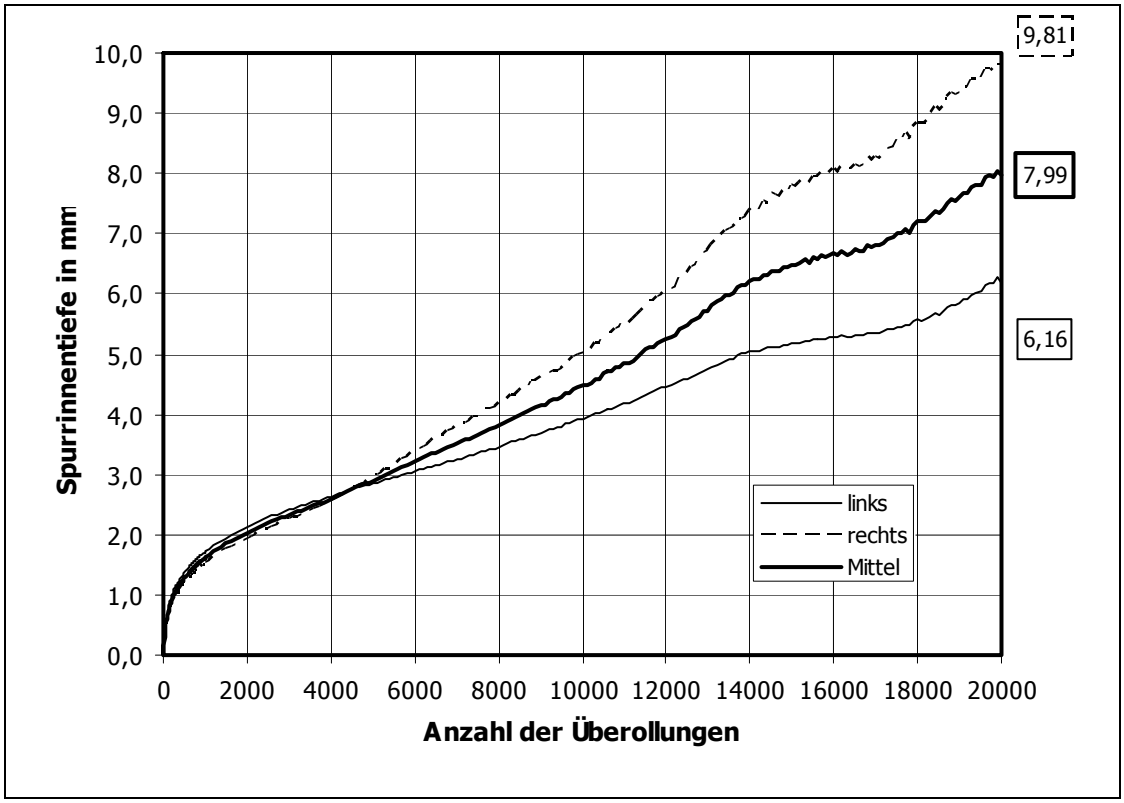
		115°C	125°C	135°C	145°C
Ausfüllungsgrad	$H_A=100*\rho_a*B/(\rho_b*H+\rho_a*B)$				
	%	78,7	80,5	82,6	81,1

VII Spurbildungstest

Proben-Nr.:	**M0 (50 °C)**
Mischgut:	AB 0/11 S
Bindemittel:	B 50/70
Probekörper:	Asphaltprobeplatten
Versuchsbedingungen:	Wasserbad 50°C
	Stahlrad





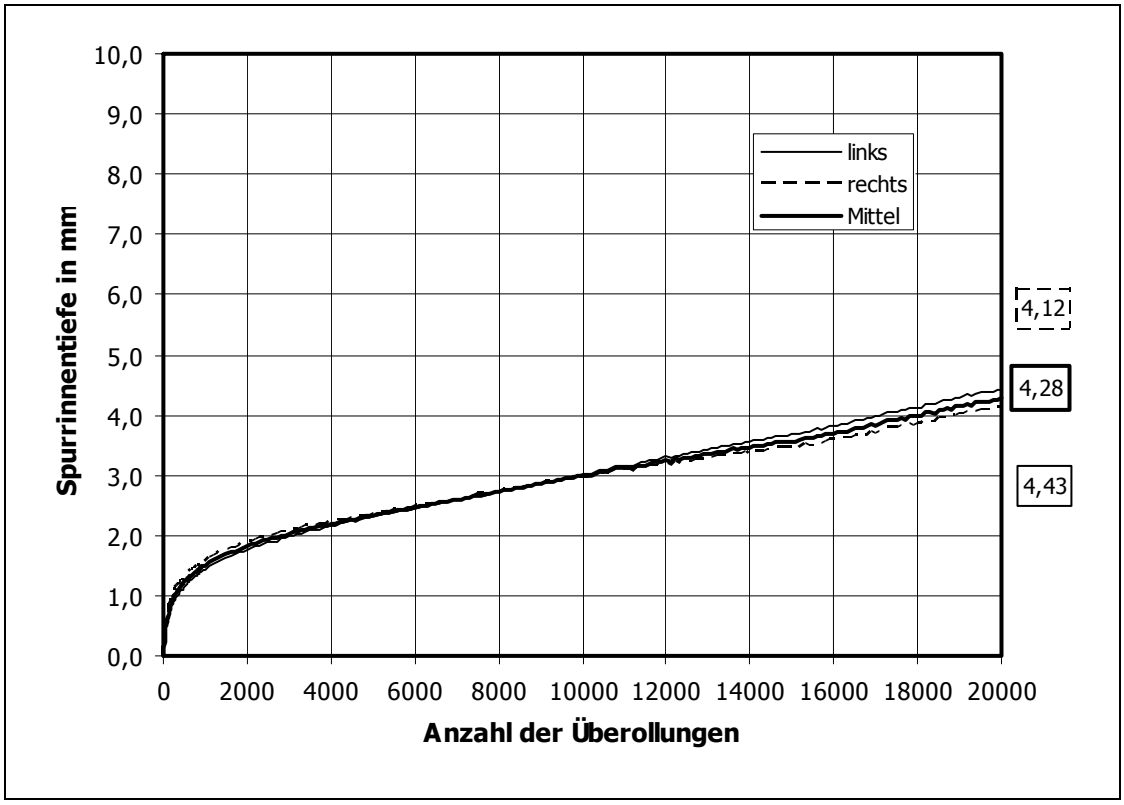


Spurbildungstest M0 (50 °C)

Proben-Nr.:	**M0 (40 °C)**
Mischgut:	AB 0/11 S
Bindemittel:	B 50/70
Probekörper:	Asphaltprobeplatten
Versuchsbedingungen:	Wasserbad 40°C
	Stahlrad

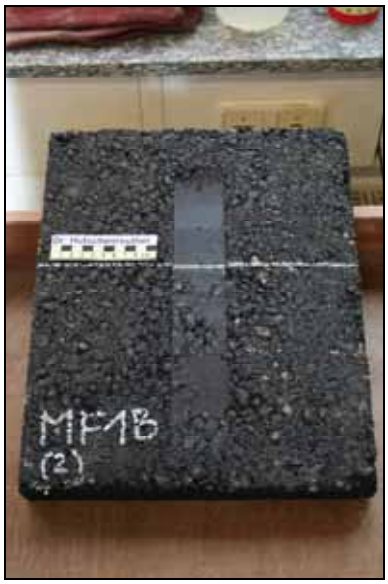




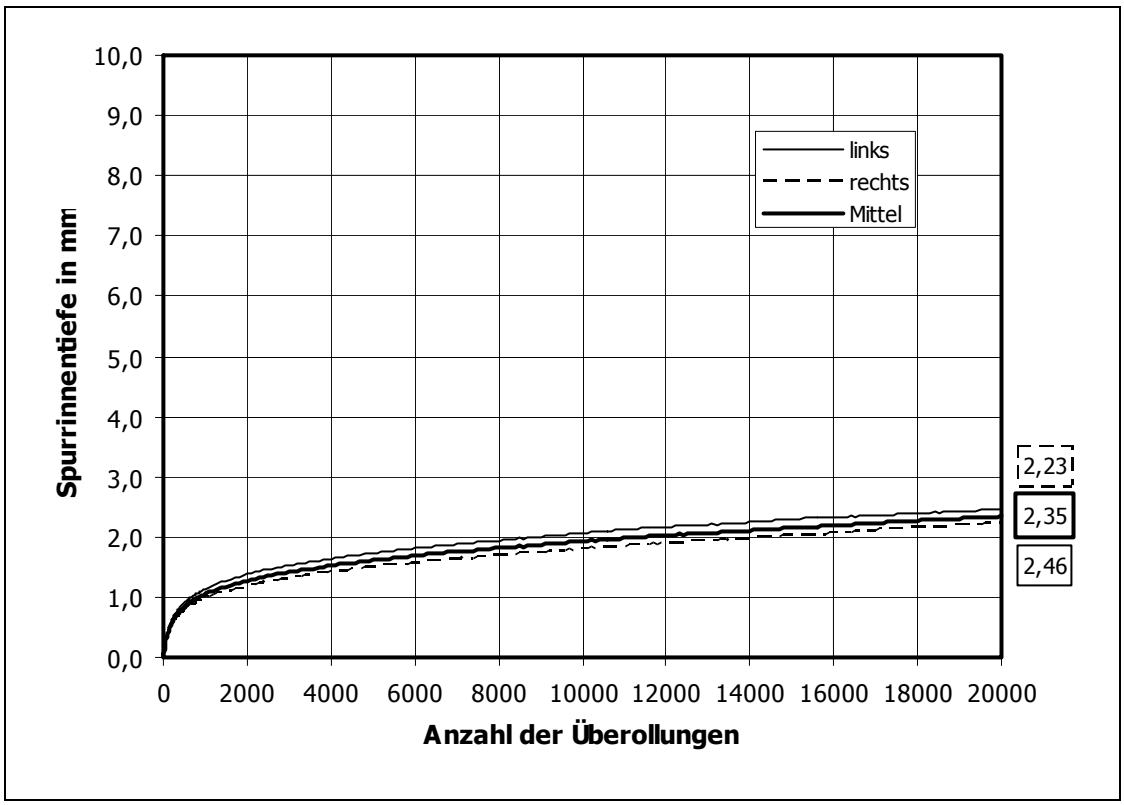


Spurbildungstest M0 (40 °C)

Proben-Nr.:	**MF1B**
Mischgut:	AB 0/11 S
Bindemittel:	B 50/70
Probekörper:	Asphaltprobeplatten
Versuchsbedingungen:	Wasserbad 40°C
	Stahlrad





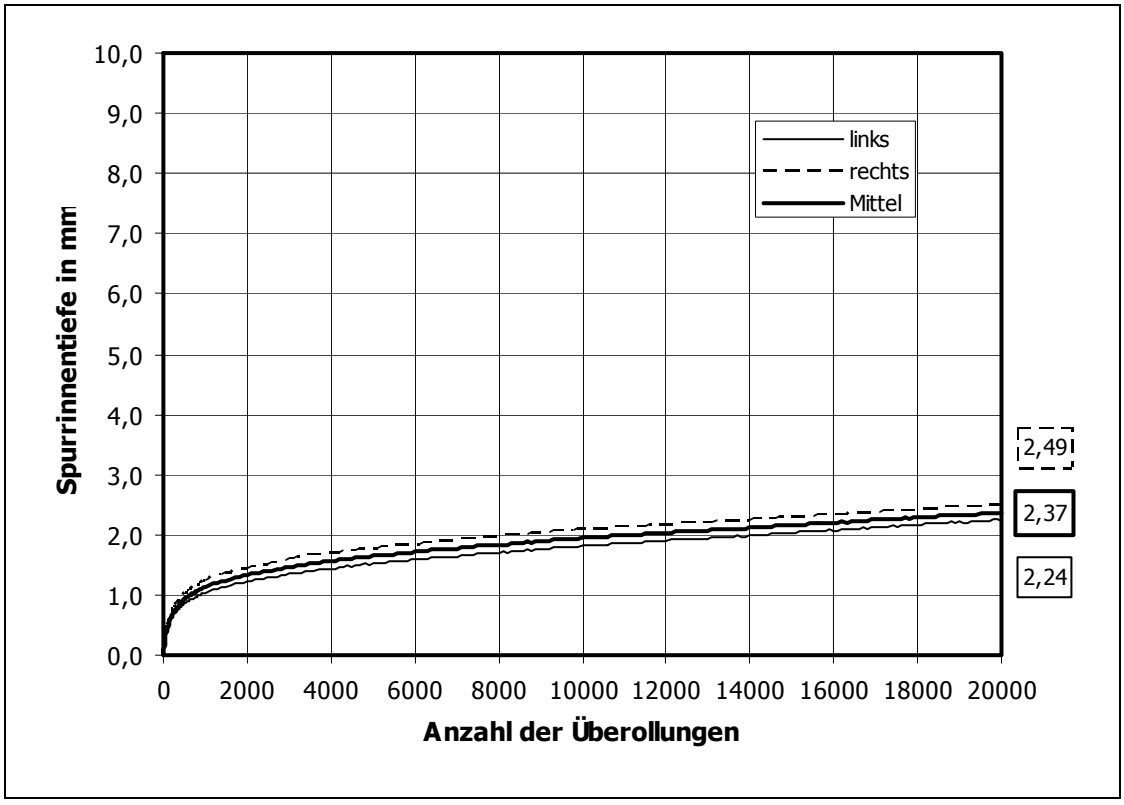


Spurbildungstest MF1B

Proben-Nr.:	**MF2B**
Mischgut:	AB 0/11 S
Bindemittel:	B 50/70
Probekörper:	Asphaltprobeplatten
Versuchsbedingungen:	Wasserbad 40°C
	Stahlrad

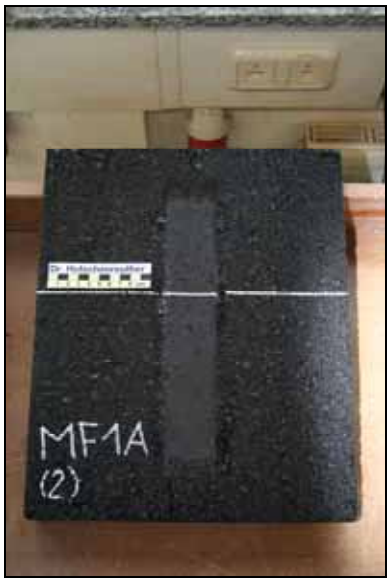




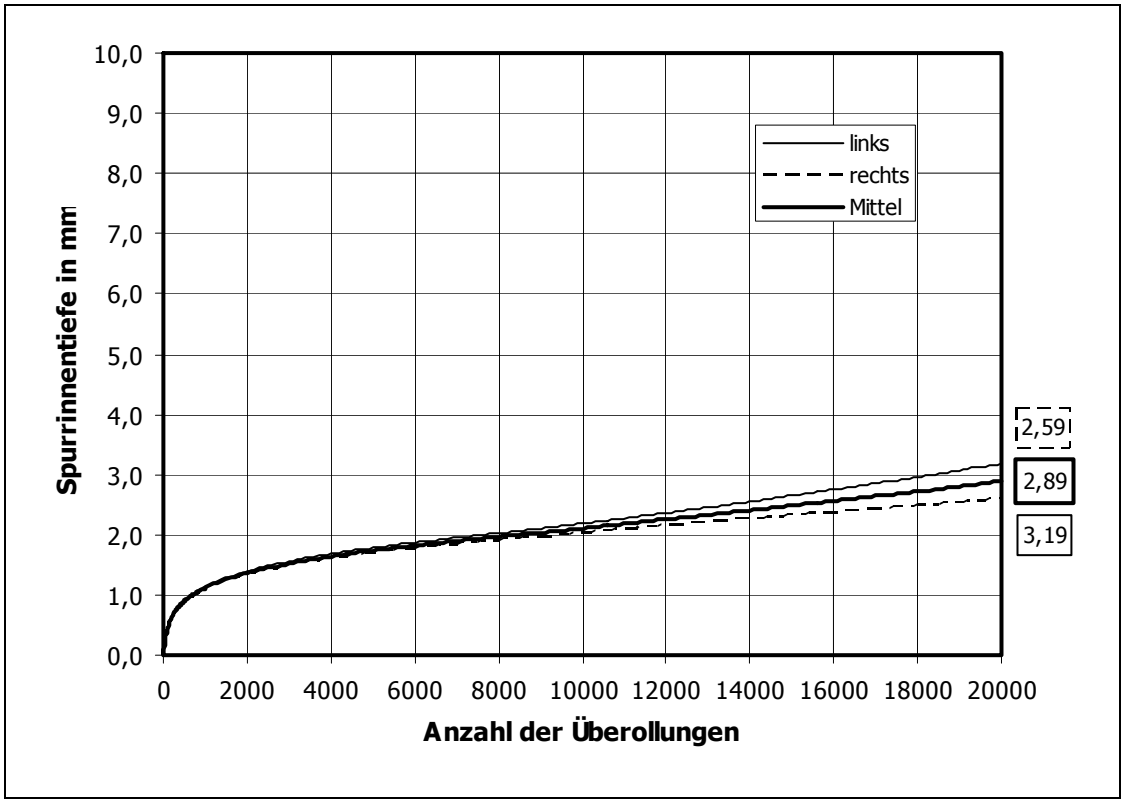


Spurbildungstest MF2B

Proben-Nr.:	**MF1A**
Mischgut:	AB 0/11 S
Bindemittel:	B 50/70
Probekörper:	Asphaltprobeplatten
Versuchsbedingungen:	Wasserbad 40°C
	Stahlrad





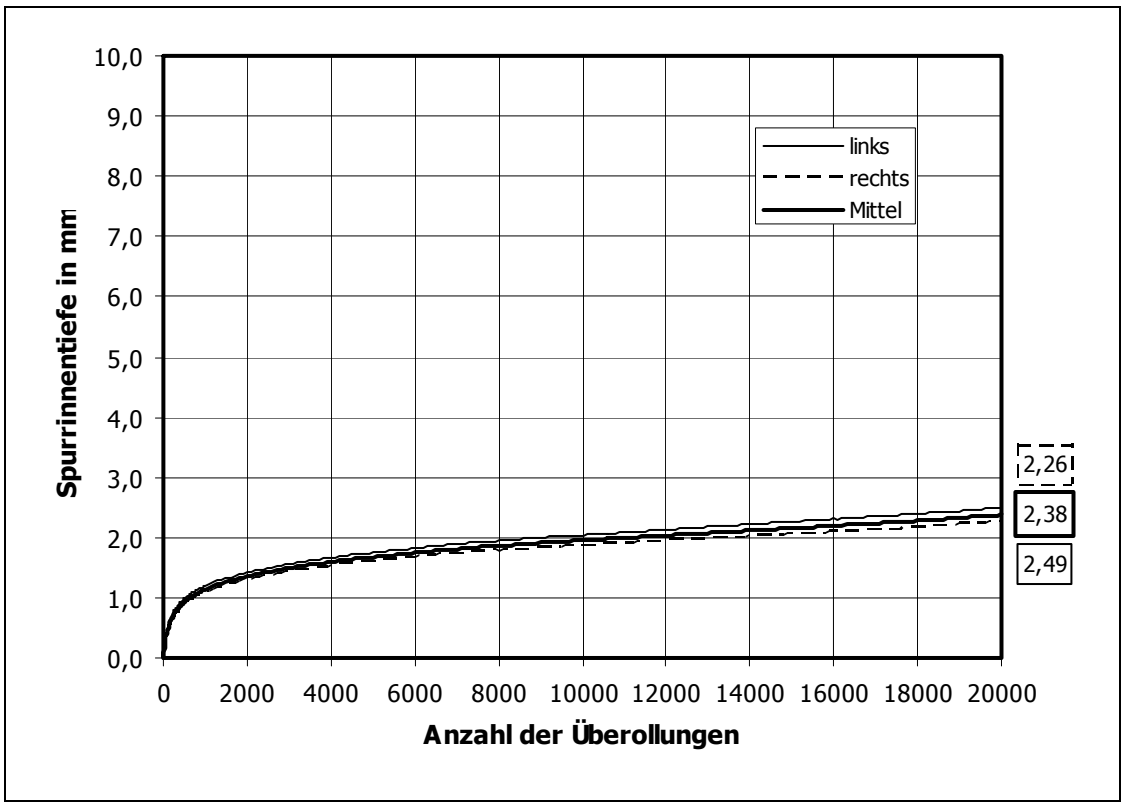


Spurbildungstest MF1A

Proben-Nr.:	**MF2A**
Mischgut:	AB 0/11 S
Bindemittel:	B 50/70
Probekörper:	Asphaltprobeplatten
Versuchsbedingungen:	Wasserbad 40°C
	Stahlrad







Spurbildungstest MF2A

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Weimar, den 20.03.2006

Bettina Müller