



DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Untersuchungen der Feldalterung auf das rheologische Verhalten von Bitumen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Ronald Blab
Univ.Ass.Dipl.-Ing.Dr.techn. Bernhard Hofko
Univ.Ass.Dipl.-Ing. Markus Hospodka
und
Univ.Doiz.Dipl.-Ing.Dr.techn. Vesela Filipova

E230/3
Institut für Verkehrswissenschaften
Straßenwesen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Marina Stoyanova

1129522

„Georgi Terter“ 30
2500 Kyustendil, Bulgarien

Kurzfassung

Infolge steigender Ansprüche an Verkehrssicherheit, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit werden an die Straßeninfrastruktur zunehmende Anforderungen gestellt. Neben der steigenden Verkehrsbelastung ist die Alterung von Bitumen der entscheidende Grund für Straßenschäden. Einerseits muss das Bitumen bei hohen Sommer-Temperaturen genügend steif und tragfähig sein, andererseits aber bei tiefen Winter-Temperaturen genügend verformungs- und relaxationsfähig sein, um eine geringe thermische Rissanfälligkeit und eine hohe Ermüdungsfestigkeit zu gewährleisten. Das bessere Alterungsverhalten von Bitumen könnte auch zu einer zuverlässigen Diagnose über den Zustand von Bitumen in Altasphalt führen, was wichtig für die modernen, ressourcenschonenden Recycling-Bauweisen ist.

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Beschreibung der Auswirkung von 12 Monaten Feldalterung auf das Bitumenverhalten und ist eine Fortsetzung des Projekts „Probefeld“ am IVWS der TU Wien. Beobachtet wird das Verhalten von zwei Bitumensorten: Straßenbaubitumen 70/100 und einem polymermodifizierten Bitumen PmB 45/80-65 (Polymer: SBS) nicht nur im Laufe der Zeit, sondern auch mit der Einbautiefe. Es werden neben einer Literaturrecherche zu Bitumen (Herkunft, Herstellung, Zusammensetzung, Eigenschaften, Arten und Alterung), auch die labortechnischen Aspekte des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen und die Erstellung einer Master Curve für DSR Messungen und Modellierung.

Die rückgewonnenen 12 Monate gealterten Bitumen werden sowohl mit konventionellen als auch mit gebrauchungsverhaltensorientierten Prüfmethode untersucht (siehe Kapitel 4.2 und 4.3). Die erhaltenen Resultate werden mit der vorhandenen Datenbasis (Ergebnisse von Labor- und Feldalterung nach 0, 3 und 6 Monaten) in verschiedenen Grafiken dargestellt und verglichen, um eine Aussage über die Alterung auf das Bitumenverhalten treffen zu können (siehe Kapitel 5). Es wird auch Winterdienst (mit Streusalz) auf einem Teil der Asphaltplatten simuliert und analysiert, ob es einen Einfluss auf das Bitumenverhalten gibt.

Abstract

This master's thesis is about a description of the effect of 12 months field aging on bitumen behavior and is a continuation of project „Test field“ at the Institute of Transportation of the Vienna University of Technology. It follows the behavior of two types of bitumen: bitumen 70/100 and polymer modified bitumen PmB 45/80-65 (polymer: SBS), not only in time but also in depth too. There is a literature review regarding bitumen (origin, manufacture, composition, properties, types and aging), laboratory technical aspects of the low-temperature behavior of bitumen, master curve modeling.

The recovered 12-month aged bitumen has been studied with conventional and performance related testing methods (see chapter 4.2 and 4.3). The results are presented with already existing data (results of laboratory and field aging after 0, 3 and 6 months) in various graphics and compared in order to make a statement about the aging of the bitumen behavior (see chapter 5). Winter road maintenance (thawing salt) is also been simulated to a defined part of the asphalt plates and analyzed whether this treatment exerts an influence on the bitumen behavior or not.

Резюме

Увеличаващите се изисквания към пътната безопасност, необходимостта от съвместимост с околната среда и дълготрайност на пътната настилка предполагат да се обръща по-голямо внимание на качеството на пътната инфраструктура. Паралелно с нарастващото натоварване на пътя, стареенето на битумите е една от основните причини за повредите по пътищата. От една страна битумът трябва да бъде достатъчно твърд и способен да поема натоварване при високи летни температури, но от друга страна трябва да се осигури достатъчна еластичност и способност за релаксация при ниски зимни температури, за да се гарантира устойчивост на образуване на термични пукнатини и висока устойчивост на умора. Оптималното „поведение“ на битумите към стареенето би могло да доведе и до една надеждна диагноза за тяхното състояние в асфалтовите пластове при експлоатация, което е от значение за модерното и щадящо ресурсите рециклирано строителство с рециклирани материали.

Настоящата дипломна работа разглежда въздействието на 12 месечното полево стареене върху характеристиките на битумите и е продължение на проекта „Опитно поле“ към IVWS на ТУ Виена. Проследява се поведението на два вида битуми: пътен битум 70/100 и полимермодифициран битум 45/80-65 (полимер: SBS), не само с течение на времето, но и в дълбочина. Едновременно с прегледа на литературния обзор за битумите (произход, получаване, състав, свойства, видове и стареене) е обърнато внимание и на лабораторно-техническите аспекти, свързани с поведението на битумите при ниски температури, моделирана е мастер крива за измерванията от Реометъра на динамично срязване.

Възстановените, старели 12 месеца битуми, са изследвани както с конвенционални методи, така и с методи, насочени към определяне на експлоатационните им характеристики (виж Раздел 4.2 и 4.3). Получените резултати, заедно с наличната база данни (резултатите от лабораторното и полево стареене след 0, 3 и 6 месеца) са представени и сравнени в различни графики, за да може да се направи извод за стареенето върху характеристиките на битумите (виж Раздел 5). Върху една част от асфалтовите плочи е симулирано зимно поддържане (със сол за разпръскване) и са направени анализи, как това оказва влияние върху характеристиките на битумите.

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit wurde am Institut für Verkehrswissenschaften an der Technischen Universität Wien im Rahmen eines Doppel-Diplom Studiums zwischen der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie Sofia und der TU Wien verfasst. Diese Diplomarbeit bildet den Abschluss meines Bauingenieurstudiums.

Vor allem möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab für die Möglichkeit meine Diplomarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften zu verfassen bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko für das interessante Thema meiner Diplomarbeit und seiner Hilfsbereitschaft in jedem Moment.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Markus Hospodka bedanken, der mich an den Laborgeräten eingeschult hat, während der Erarbeitung meiner Diplomarbeit mit viel Geduld begleitet hat und stets mit Verbesserungsvorschlägen und Formulierungshilfen zur Stelle war.

Außerdem möchte ich noch herzlich dem ganzen Laborteam, besonders Herrn Thomas Riedmayer, der mir auch bei der Einschulung an den Laborgeräten geholfen hat, für nette und kollegiale Atmosphäre danken.

An dieser Stelle möchte ich meinen herzlichen Dank an meinen Eltern äußern, die mir das Studium ermöglicht haben. Sie sind immer zur Verfügung gestanden und haben mich in schwierigen Situationen unterstützt. Ich danke ihnen für die zahlreichen gegebenen Ratschläge.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei der Fakultät für Straßenbau an der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie Sofia, sowie bei meinen Studienkollegen und Freunden für die Unterstützung während meines Studiums bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabestellung	8
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Definition von Bitumen	9
2.2	Vorkommen von Bitumen	11
2.3	Gewinnung von Bitumen.....	12
2.4	Bitumen-Zusammensetzung und Struktur	13
2.5	Eigenschaften von Bitumen.....	15
2.5.1	Thermo-viskoses Verhalten	16
2.5.2	Visko-elastisches Verhalten	16
2.5.3	Relaxationsvermögen	17
2.6	Bitumenarten	18
2.6.1	Straßenbaubitumen.....	18
2.6.2	Modifiziertes Bitumen	19
2.7	Bitumenalterung.....	23
2.7.1	Alterungsmechanismen.....	23
2.7.2	Alterungsstufen	26
2.7.3	Labor- und Feldalterung	27
2.8	Literaturstudie zu labortechn. Aspekten des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen	28
2.9	Modellierung einer DSR Master-Curve	34
2.10	Bitumenextraktion und –rückgewinnung	38
2.10.1	Extraktion.....	38
2.10.2	Rückgewinnung.....	38
2.10.3	Lösungsmittel.....	39
2.11	Bitumen in Bulgarien	41
3	Materialien	43
3.1	Abschnitte und Probenursprung	43
3.2	Probenbezeichnung.....	44
4	Angewandte Prüfmethode	46
4.1	Extraktion und Rückgewinnung.....	46
4.1.1	Asphaltanalysator	46
4.1.2	Rotationsverdampfer (EN 12697-3).....	47

4.2	Konventionelle Prüfmethoden	50
4.2.1	Erweichungspunkt Ring & Kugel (EN 1427)	50
4.2.2	Nadelpenetration (EN 1426)	52
4.2.3	Brechpunkt nach Fraaß (EN 12593)	53
4.2.4	Elastische Rückstellung (EN 13398)	55
4.3	Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethoden	58
4.3.1	Rotational Viscometer RV (EN 13302)	58
4.3.2	Dynamic Shear Rheometer DSR (EN 14770)	61
4.3.3	Bending Beam Rheometer BBR (EN 14771)	67
5	Ergebnisse und Interpretation	70
5.1	Unterschiede zwischen Straßenbaubitumen und PmB	70
5.2	Veränderungen im Laufe der Zeit	74
5.3	Veränderungen in den Schichten	80
5.4	Auswirkungen von Streusalz (Winterdienst)	84
6	Zusammenfassung und Ausblick	87
II.	Abbildungsverzeichnis	93
III.	Tabellenverzeichnis	96
IV.	Anhang	97

Häufig verwendete Abkürzungen

EN	Europäische N orm
IUPAC	International U nion of P ure and A ppplied C hemistry
SHRP	S trategic H ighway R esearch P rogram (US Straßenforschungsprogramm 1987 bis 1993)
SUPERPAVE	S Uperior P ERforming Asphalt P AVEments (Bezeichnung für die im Rahmen des SHRP-Programms entwickelte Methodik der Bindemittelbewertung und der Mischgutprüfung aber auch für das zugehörige EDV-Programm)
RV	R otational V iscometer (Rotationsviskosimeter)
DSR	D ynamic S hear R heometer (Dynamisches Scherrheometer)
BBR	B ending B eam R heometer (Biegebalkenrheometer)
RTFOT	R olling T hin F ilm O ven T est (Rollierender Dünnsfilm Ofen Test)
PAV	P ressure A ging V essel (Druckalterungskessel)
SBS	S tyren- B utadien- S tyren (Kunststoff)
PG	P erformance G rade (Gebrauchsklasse für Bitumen)
PmB	P olymer m odifiziertes B itumen

1 Einleitung und Aufgabestellung

Der Asphalt ist sowohl eine natürliche als auch eine technisch hergestellte Mischung aus Gesteinskörnungen und Bitumen - ein Bindemittel, das die Gesteinskörnungen zusammenhält. Das Bitumen entsteht als klebrige Masse aus Erdöl, das eine nicht erneuerbare Ressource ist.

Die Alterungserscheinungen beim Bitumen führen zu einer Versprödung und Verhärtung des Bindemittels. Das Hauptziel dieser Diplomarbeit ist eine vertiefende Untersuchung der Auswirkungen der Feldalterung auf das Bitumenverhalten nach 12 Monaten. Zu diesem Zweck werden insgesamt 16 Extraktionen und 16 Destillationen von Straßenbaubitumen 70/100 und PmB 45/80-65 durchgeführt. Damit die Eigenschaften von Bitumen nach 12 Monaten bestimmt werden können, werden die Bitumenproben mit folgenden Prüfungen untersucht: Nadelpenetration, Erweichungspunkt Ring & Kugel, Elastische Rückstellung, Rotational Viscometer, Dynamische Shear Rheometer und Bending Beam Rheometer. Im Rahmen dieser Arbeit werden insgesamt 68 Versuche durchgeführt.

In vorliegender Diplomarbeit wird beschrieben und analysiert, ob und wie die Alterung eine Veränderung der Bindemittleigenschaften bewirkt. Daneben wird auch die Alterung in der Einbautiefe, in vier verschiedenen Schichten verfolgt. Es wird auch untersucht, ob sich das Bitumen unter der Einwirkung von Streusalz (Winterdienst) verändert.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Definition von Bitumen

Das Wort Bitumen stammt aus dem Lateinischen und hat übersetzt die Bedeutung von „Erdpech“. Es ist das älteste bekannte Mineralölprodukt und hat eine lange Verwendungsgeschichte. Seine Verwendung für Straßen in der Neuzeit setzte in der Mitte des 19. Jahrhunderts ein. Pech wurde noch im Altertum bei dem Aufbau von Babylon eingesetzt. Auch in der Bibel wurde erwähnt, dass Pech beim Bau der Arche Noah verwendet wurde. Bitumen hat Steinkohlenteerpech (auch Teer genannt) gänzlich ersetzt. Der aus der Verkokung von Steinkohle gewonnene Teer enthält im erheblichen Umfang polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die im menschlichen Körper cancerogen wirken. Der Einsatz von Steinkohlenteerpech ist aus diesem Grund nicht mehr zulässig.

Bitumen ist ein schwerflüchtiges, dunkelfarbiges Gemisch aus verschiedenen organischen Substanzen, das als Rückstand bei der Vakuumdestillation aus Erdöl gewonnen wird. Es ist geruchlos und wasserundurchlässig. Einerseits ist das Bitumen gegen viele Chemikalien unlöslich, andererseits ist es gegen Erdölfraktionen anfällig („Gleiches löst Gleiches“). Von technischer Bedeutung ist die Beständigkeit gegen Tausalzlösung (Winterdienst), Harnstoff (schnell wirkendes Enteisungsmittel für Flugbetriebsflächen) und Jauche (ländlicher Wegebau). Allgemein lässt sich sagen, dass je weicher das Bitumen ist, desto geringer ist seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Chemikalien. [1]

In der EN 12597 [2] wird die Terminologie von Bitumen und Asphalt beschrieben. In nachfolgender Tabelle 1 sind die wichtigsten Begriffe angegeben:

Tabelle 1: Begriffe aus EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel –Terminologie [2]

Begriff	Definition
Bitumen (Abbildung 1 rechts und links)	Nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol (IUPAC: Methylbenzen) vollständig oder nahezu vollständig löslich ist. Bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos oder nahezu fest.
Bitumenhaltiges Bindemittel	Bindemittel, das Bitumen enthält ANMERKUNG: Ein bitumenhaltiges Bindemittel kann in folgenden Formen vorliegen: rein; modifiziert; oxidiert; verschnitten; gefluxt; emulgiert. Zur Klarstellung ist möglichst immer der Begriff zu verwenden, der das betreffende Bindemittel genau beschreibt.
Straßenbaubitumen	Bitumen zur Herstellung von Asphalt für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen ANMERKUNG: In Europa werden die am häufigsten

	verwendeten Sorten von Straßenbaubitumen durch ihre Nadelpenetration bei 25 °C bis zu einem Höchstwert von 900 × 0,1 mm definiert.
Modifiziertes Bitumen	Bitumen, dessen rheologische Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung chemischer Zusätze modifiziert worden ist ANMERKUNG: In diesem Zusammenhang umfassen die „chemischen Zusätze“ Naturkautschuk, synthetische Polymere, Schwefel und bestimmte Organometallverbindungen, aber nicht Sauerstoff oder Oxydations„katalysatoren“, wie z. B. Eisen (III)-chlorid, Phosphorsäure und Phosphorpentoxid. Fasern und anorganische Pulver („Füller“) werden nicht als Bitumenmodifizierungsmittel angesehen. Modifizierte Bitumen können als solche oder verschnitten, emulgiert oder gemischt mit z. B. Naturasphalt verwendet werden.
Polymermodifiziertes Bitumen (PmB)	Mit einem oder mehreren organischen Polymeren modifiziertes Bitumen
Asphalt ¹	Mischung von Gesteinskörnung mit einem bitumenhaltigen Bindemittel
Naturasphalt (Abbildung 1 in der Mitte)	Relativ hartes, in natürlichen Lagerstätten vorkommendes Bitumen, das häufig mit feinen oder sehr feinen Mineralstoffanteilen gemischt ist und welches bei 25 °C praktisch fest, bei 175 °C jedoch eine viskose Flüssigkeit ist.

Der Anwendungsbereich von Bitumen umfasst:

- (1) Straßenbeläge, Dichtungsbeläge, Sperrschichten im Gleisbau, „feste Fahrbahn“ im Eisenbahnbau (Schotterersatz), Bodenbeläge und Industrieböden (gegossen oder als Asphaltplatten), Bodenverfestigung
- (2) Bitumenbahnen: Flachdach, Brückenabdicht, Unterterrain-Abdichtung, Tagbautunnels, Gleitschichten, Bodenabdichtungen von Deponien, Pumpspeicherbecken, Deichen und Dämmen von Staubecken
- (3) Geneigte Dächer: Unterdachbahnen, Dachschindeln, Wellplatten
- (4) Fugen: Fugenvergussmassen, Dichtungsbänder, Fahrbahnübergänge von Brücken, Spachtelmassen und Kitte zum Füllen und Ausgleichen von Unebenheiten und Hohlräumen sowie zum Abdichten von Fugen
- (5) Heiss oder kalt aufgetragene lösemittelhaltige Anstriche, Emulsionen zum Bautenschutz
- (6) Klebung: Binde- und Klebemittel für Schall- und Wärmeisolation [3]

¹ **Asphalt:** abgeleitet vom altgriechischen ἄσφαλτος *ásphaltos* „Asphalt“, „Erdharz“ [52]



Abbildung 1: links und rechts: Bitumen [4], [5], in der Mitte: Naturasphalt [6]

2.2 Vorkommen von Bitumen

Bitumen kommt in einigen Sedimentgesteinen und in Naturasphalt vor, ebenfalls ist es ein Bestandteil von Erdöl, das sich in Jahrtausenden aus organischen Ablagerungen des Meeres gebildet hat. Es wird auch aus Ölsanden gewonnen, deren Lagerungsstätte in relativ geringer Tiefe (weniger als 100 m) ist oder sie stehen oft direkt an der Erdoberfläche an. An oder sehr nahe der Erdoberfläche befindliche Ölsande werden im Tagebau abgebaut. Aus tiefer lagernden Ölsanden kann Bitumen mit sogenannten in-situ-Methoden (z. B. durch die Injektion von Wasserdampf in die Lagerstätte) gewonnen werden. Ölsandlagerstätten gibt es weltweit, aber die bedeutendsten Ölsandvorkommen befinden sich in Kanada und Venezuela. Die Ölsandvorräte könnten rund zwei Drittel der weltweiten Öl-Reserven ausmachen. [7], [8]

Die Prognose des Zeitpunktes und der Höhe eines globalen Ölproduktionsmaximums ist aus mehreren Gründen mit großen Unsicherheiten behaftet. In neueren Analysen werden häufig neben konventionellem Öl (Rohöl + Flüssiggas) auch „unkonventionelles Öl“ wie Schweröl (nicht von selbst fließfähiges Öl) und Öl aus Teersandstein sowie sonstige ölähnliche Flüssigkeiten (synthetisches Öl aus Gas und Kohle, Biokraftstoffe) einbezogen. Je nachdem, welche Flüssigkeiten betrachtet werden, gelangt man zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich eines Förder- oder Produktionsmaximums. Im Zuge steigender Ölpreise und des technischen Fortschrittes wird die Gewinnung von synthetischem Rohöl aus Ölsand immer rentabler. Die Regierung Kanadas fördert die Ausbeutung von Ölsanden und sieht hierin einen wichtigen, zukunftssichernden Wirtschaftsfaktor. [9]

Etwa ein Drittel der weltweiten Ölsandvorkommen lagern im Orinoco-Schwerölgürtel in Venezuela. Experten des US Geological Survey schätzen die Gesamtvorkommen („in-place“, d. h. einschließlich des nicht wirtschaftlich abbaubaren Volumens) auf 1,3 Billionen Barrel ($\approx 207 \text{ km}^3$) Bitumen oder Schweröl. Die technisch förderbaren Reserven im Orinoco-Schwerölgürtel werden auf 513 Milliarden Barrel geschätzt. Andere Quellen gehen aktuell (Stand Mai 2013) von 298 Milliarden Barrel wirtschaftlich förderbarem Bitumen bzw. Schweröl aus. Zählte man Ölsand-Bitumen und Schwerölvorkommen zu den Erdölreserven

eines Landes hinzu, wäre Venezuela damit das ölreichste Land der Erde, noch vor Saudi-Arabien. [8]

Ein weiteres Drittel mit 1,8 Billionen Barrel Bitumen ($\approx 286 \text{ km}^3$) „in-place“ lagert in einem Areal von über 140.000 km^2 in Kanadas westlichster Prärieprovinz Alberta, unter anderem die sogenannten Athabasca-Ölsande. Davon gelten gegenwärtig (Stand Februar 2013) etwa 169 Milliarden Barrel als wirtschaftlich gewinnbar. Zählte man Ölsand-Bitumen und Schwerölvorkommen zu den Erdölreserven eines Landes hinzu, nähme Kanada damit Platz drei der ölreichsten Länder der Erde ein. [8]

Weitere Lagerstätten befinden sich in Saudi-Arabien und anderen Ländern des Nahen Ostens. In den USA sind die Utah-Ölsande mit 32 Milliarden Barrel bedeutend. In Deutschland sind bei Wietze, im Süden der Lüneburger Heide, von 1920 bis 1963 Ölsande des „Wealden“ (Unterkreide) bergmännisch in 220 bis 250 m Tiefe abgebaut worden. Auch bei Pechelbronn im Elsass wurde Ölsand im Schachtbetrieb gewonnen. [8]

2.3 Gewinnung von Bitumen

Das Rohöl gelangt aus direkter Förderung oder Ölsanden durch Rohrleitungen zum Verschiffungshafen oder direkt in eine Erdölraffinerie, wo das Bitumen durch Einwirkung von Hitze und Druck in modernen zwei- oder mehrstufigen Anlagen gewonnen wird (siehe Abbildung 2). Zuerst wird das Erdöl in einem ersten Röhrenofen auf $350 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $400 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt und unter atmosphärischem Druck mittels Destillationskolonne unter Ausnutzung der unterschiedlichen Siedetemperaturen von seinen hochwertigen Bestandteilen wie Treibstoffe (Methan-, Ethan-, Butan-, Propan-Gase, Leichtbenzin, Kerosin, Petroleum) sowie leichtere und schwere Öle befreit. Die Destillationskolonne enthält mehrere Etagenböden mit sog. Glocken, woran die Destillationsprodukte in die Wannen der Etagenböden abtropfen können. In der zweiten Stufe, die Vakuumdestillation, wird das verbleibende Gasöl bei einem verminderten Druck von etwa 50 mbar in weiteren Produkten (Gas-, Schmieröle) aufgetrennt. Danach verbleibt Bitumen als nicht mehr wirtschaftlich weiter aufbereiter Destillationsrückstand. In weiteren Prozessen kann dieses Bitumen zu Oxidationsbitumen (Einblasen von Luft), Fluxbitumen (Zugabe von Lösungsmitteln), Polymerbitumen (Zugabe von Kunststoffen) oder Bitumenemulsion (Zugabe von Wasser und Emulgator) weiterverarbeitet werden. [1], [3]

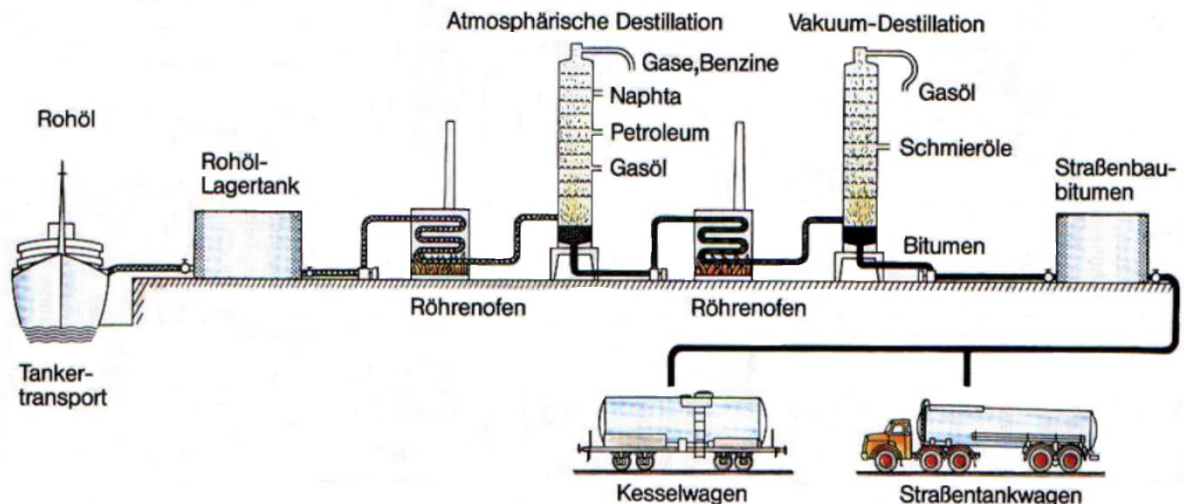


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bitumenherstellung [10]

2.4 Bitumen-Zusammensetzung und Struktur

Bitumen bestehen aus einer sehr großen Anzahl verschiedener Kohlenwasserstoffe und Kohlenwasserstoffderivate. Je nach geographischer Herkunft des Rohöls können Bitumen nach Art und Menge der Substanzen sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein (siehe Abbildung 3). Wegen der großen Anzahl der sie aufbauenden Stoffe haben sie aber dennoch nahezu gleiche Gebrauchseigenschaften. Diese hängen viel mehr von der Struktur als von der chemischen Zusammensetzung ab. [1]

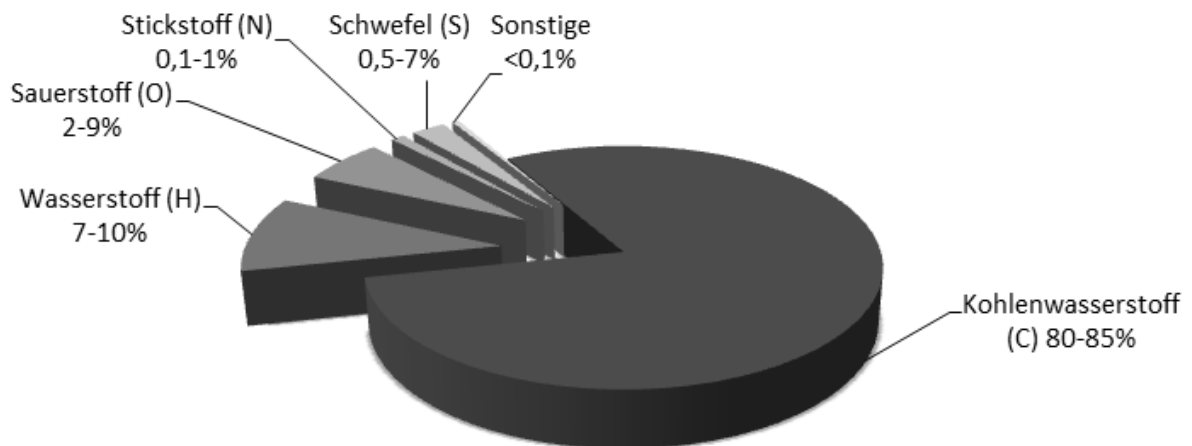


Abbildung 3: Hauptbestandteile von Bitumen [1]



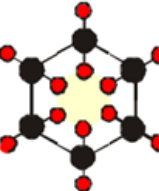
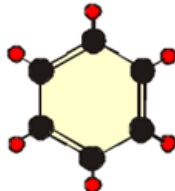
Das Bitumen enthält Kohlenwasserstoffe, die auf folgende Weise unterschieden werden können (siehe Tabelle 2):

- (1) Ungesättigte Kohlenwasserstoffe
 - Aromatische Verbindungen (ungesättigte ringförmige Kohlenwasserstoffe)

- Alkene (Olefine)
- (2) Gesättigte Kohlenwasserstoffe
 - Alicyclische oder naphthenartige Verbindungen (gesättigte ringförmige Kohlenwasserstoffe)
 - Aliphatische oder paraffinartige Verbindungen (gesättigte Kohlenwasserstoffe, gerad- und verzweigtkettig)

Gesättigte Verbindungen sind reaktionsträge während die ungesättigten Verbindungen wegen der Doppelbindung im Molekül als reaktionsfreudig zu bezeichnen sind. [3]

Tabelle 2: Systematik der Kohlenwasserstoffe in Bitumen [3]

	Gesättigt	Ungesättigt
Kettenmoleküle	Hexan C ₆ H ₁₄ 	Hexan C ₆ H ₁₂ 
Ringmoleküle	Zyklohexan C ₆ H ₁₂ 	Benzol C ₆ H ₆ 

Bitumen wird als Kolloidsystem² aus höhermolekularen Partikeln (Asphaltene) in einem niedermolekularen Gel (Maltene) in der EN 12597 [2] definiert (siehe Abbildung 4). Die Kolloidstruktur bewirkt die rheologischen Eigenschaften. Mit Hilfe geeigneter Trennverfahren kann es in folgende Hauptbestandteile aufgetrennt werden:

- (1) Dispersionsmittel: weichmachende, flüssige ölige Phase; aromatisch, leicht, in n-Heptan löslich; Molekulargewicht: 500 bis 1000 g/mol
 - (2) Erdölharze: schmelzbar, löslich, rotbraun, mit besonders guter Klebfähigkeit; Molekulargewicht: 1000-1500 g/mol; Teilchendurchmesser: 1-5 nm
 - (3) **Asphaltene**: formbestimmende, feste russartige Phase; schwer, unlöslich, schwarzbraun, unschmelzbar; Molekulargewicht: 5 000-9000 g/mol; Teilchendurchmesser: 5-10 nm [3]
- } = **Maltene**

² **Kolloide**: kolloid gr. κόλλα, κόλλα = leimartig; Gemisch aus höhermolekularen festen Nano- bis Mikropartikel, dispergiert in niedermolekularem Gel. Wegen geringer Partikelgröße sind kolloide Systeme Gemische aus reiner Lösung und einer Emulsion (größere Partikel). [3]

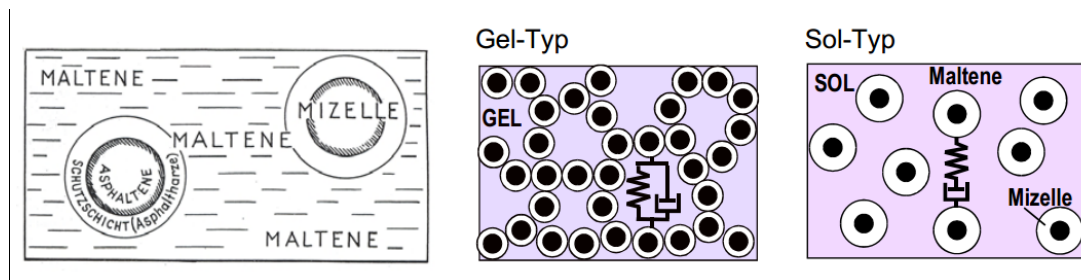


Abbildung 4: Klassische vereinfachte Modellvorstellung zum Aufbau von Bitumen [3]

Der Begriff Maltene umfasst die Fraktionen Aromate, Harze und Paraffine. Die Asphaltene und die Erdölharze sind stabil in der öligen Phase, dem Dispersionsmittel, kolloidal dispergiert. Jedes dispergierte Kolloidteilchen besteht aus mehreren, meist verschiedenen niedermolekularen Bestandteilen. Diese kugelförmigen oder nahezu kugelförmigen Assoziateteilchen bezeichnet man als Mizellen (siehe Abbildung 5). Normalerweise sind diese Kolloidsysteme niederviskos, d. h. das System erscheint wie eine viskose Flüssigkeit: ein Sol. Mit steigendem Asphaltengehalt treten deutlich ausgeprägte elastische Eigenschaften auf: es liegt also nicht mehr ein Sol, sondern ein Gel vor. [1]

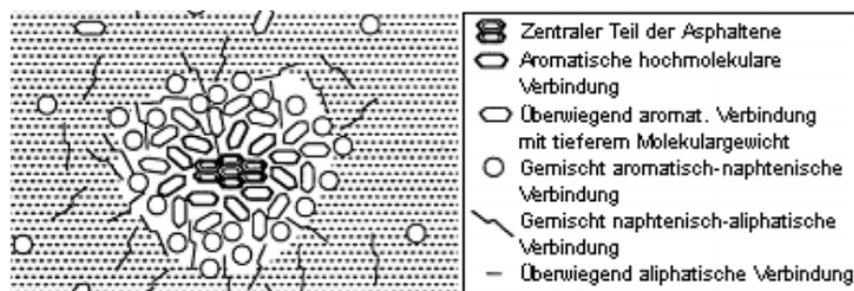


Abbildung 5: Modell der Mizellen im Bitumen [3]

2.5 Eigenschaften von Bitumen

Die Eigenschaften von Bitumen sind von dem kolloiden System und der chemischen Zusammensetzung von Bitumen beeinflusst. Besonders bei der Festigkeit, Verformbarkeit und Temperaturbeständigkeit spielt das Verhältnis Maltene/Asphaltene eine entscheidende Rolle. Noch wichtiger bei Bitumen ist die Temperatur, denn es hat keinen ausgeprägten Schmelzpunkt, sondern einen Erweichungspunkt. Unterhalb der Temperatur, bei der die Erweichung eintritt, verhält sich Bitumen relativ spröde, oberhalb dieser Temperatur ist es gut verformbar und zeigt viskose Eigenschaften. Diese Viskositätseigenschaft (Fließfähigkeit) von Bitumen hat entsprechende Bedeutung für den Einsatz als Bindemittel im Straßenbau. [11]

Die Konsistenz von Bitumen ist eine seiner wichtigsten Eigenschaften. Sie bestimmt zum einen die Randbedingungen bei der Verarbeitung, zum anderen das Verhalten des Baustoffs nach dem Einbau unter den vorherrschenden Umgebungsbedingungen. Bei

Tieftemperaturen erscheint Bitumen äußerlich spröde und hart. Beim Erwärmen wird Bitumen langsam weicher, bis es schließlich zwischen 150 °C und 200 °C flüssig wird. Diese Erscheinung ist reversibel und verleiht dem Bitumen den Charakter eines thermoplastischen Werkstoffes. [11]

2.5.1 Thermo-viskoses Verhalten

Das thermoviskose Verhalten von Bitumen ist die Grundlage seiner Verarbeitung. Dabei hat jeder Arbeitsvorgang (Pumpen, Spritzen, Mischen, Einbauen, Verdichten) seinen bestimmten Viskositätsbereich. Die zugehörigen Verarbeitungstemperaturen sind von der Bitumensorte abhängig: Härtere Sorten müssen heißer verarbeitet werden als weiche. Nach Abkühlen auf normale Tagestemperaturen hat das Bitumen die für die Belastbarkeit erforderliche Konsistenz erreicht. [1]

2.5.2 Visko-elastisches Verhalten

Die Steifigkeit eines Bitumens hängt in erster Linie von seiner Härte, also von seiner Viskosität, die sich in der Bitumensorte ausdrückt und grundsätzlich temperaturabhängig ist, ab. Der Verformungswiderstand von Bitumen ändert sich aber auch in Abhängigkeit von der Zeitdauer einer Belastung. Das Bitumen folgt einer spontanen Belastung sowohl durch reversible elastische als auch irreversible plastische Verformungsanteile. Bei sehr kurzen Belastungszeiten überwiegt dabei der elastische Anteil, das heißt, die aufgezwungene Verformung federt nach der Entlastung vollständig zurück. Je länger die Belastungszeit jedoch ist, desto größer wird der zeitabhängige viskose Anteil, welcher selbst wiederum aus elastischen und plastischen Anteilen besteht. Der Verlauf von Deformation und Rückformung ist in Abbildung 6 dargestellt. [12]

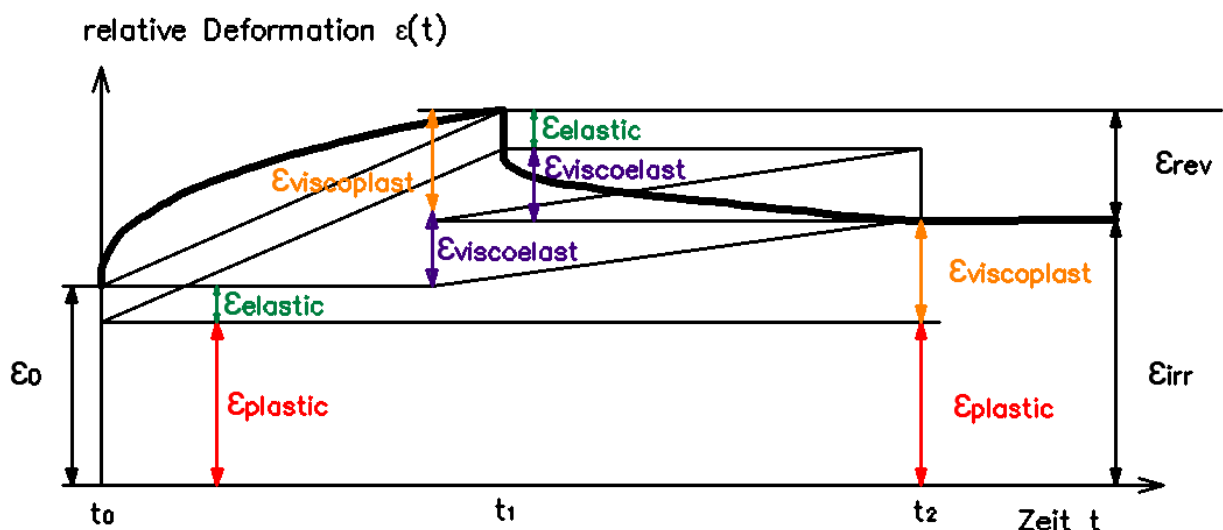


Abbildung 6: Deformation und Rückformung bei visko-elastischem Materialverhalten [12]

Dabei ist:

- (1) ϵ_0 die spontane, zeitunabhängige Deformation zum Belastungsbeginn t_0 bestehend aus einem reversiblen elastischen ($\epsilon_{\text{elastic}}$) und einem irreversiblen plastischen Anteil ($\epsilon_{\text{plastic}}$),
- (2) $\epsilon_{\text{viscoelast}}$ und $\epsilon_{\text{viscoplast}}$ sind die zeitabhängigen reversiblen elastischen und irreversiblen plastischen Verformungsanteile während der Belastungsdauer t_0 bis t_1 .
- (3) Nach erfolgter Entlastung zum Zeitpunkt t_1 federt der spontan elastische Anteil sofort und der visko-elastische Anteil zeitabhängig zurück. Die beiden elastischen Anteile sind dabei als ϵ_{rev} und die beiden plastischen Anteile als ϵ_{irr} zusammengefasst dargestellt. [12]

Diese Verformungseigenschaften von Bitumen werden als „rheologische³ Eigenschaften von Bitumen“ bezeichnet. Die Rheologie beschäftigt sich mit der Lehre von Deformationen und vom Fließen der Substanzen. Die maßgebenden Messgrößen der Rheologie stammen aus der Mechanik und umfassen Kräfte, Auslenkungen und Geschwindigkeiten. Die Rheometrie beschreibt dabei die Messmethoden und Messgeräte, die zur Erfassung rheologischer Daten erforderlich sind. Die Messgeräte, mit denen das rheologische Verhalten einer Substanz bestimmt wird, werden Viskosimeter (nur Viskositätsmessung möglich) oder Rheometer genannt. [1], [13]

2.5.3 Relaxationsvermögen

Relaxation ist das Vermögen eines Werkstoffes, sich aufgrund seines visko-elastischen Verhaltens einer aufgezwungenen Beanspruchung durch viskose Verformung zu entziehen. Der Spannungsabbau erfolgt dabei nicht spontan, sondern zeitabhängig. Die Geschwindigkeit, mit der die Beanspruchungen abklingen, hängt von der Viskosität des Bitumens ab. Je weicher das Bitumen, desto schneller erfolgt der Spannungsabbau. Das Relaxationsvermögen von Bitumen ermöglicht es in der Baupraxis, dass daraus erstellte Bauteile beispielsweise bei starker Abkühlung in Verbindung mit thermischer Verkürzung nicht reißen. Die dabei entstehenden Zugspannungen im Bauteil können durch Relaxationsverformungen abgebaut werden, solange die Spannungen nicht zu groß werden und die Temperaturen nicht zu tief sinken. Somit können beispielsweise Asphaltstraßen im Gegensatz zu Betonstraßen ohne Fugen hergestellt werden. [1]

³ **Rheologie:** abgeleitet aus dem Griechischen; „Rheos“ - der Fluss, das Fließen, das Strömen

2.6 Bitumenarten

Bitumenhaltige Bindemittel gehören zu den Kohlenwasserstoff-Bindemitteln. Je nach Art und Anzahl der bei der Bitumenherstellung durchlaufenen Verfahrensschritte werden viskose bis spröde Produkte erhalten. Anhand der Herstellungsverfahren, der Anwendungsgebiete sowie der Konsistenzdaten werden sie für eine breite industrielle Nutzung in verschiedene Sorten und Arten unterteilt (siehe Abbildung 7). Die Zusammenhänge der einzelnen Bitumenbezeichnungen bzw. Zubereitungen aus Bitumen sind in der EN 12597-1 [2] definiert. [11], [13]

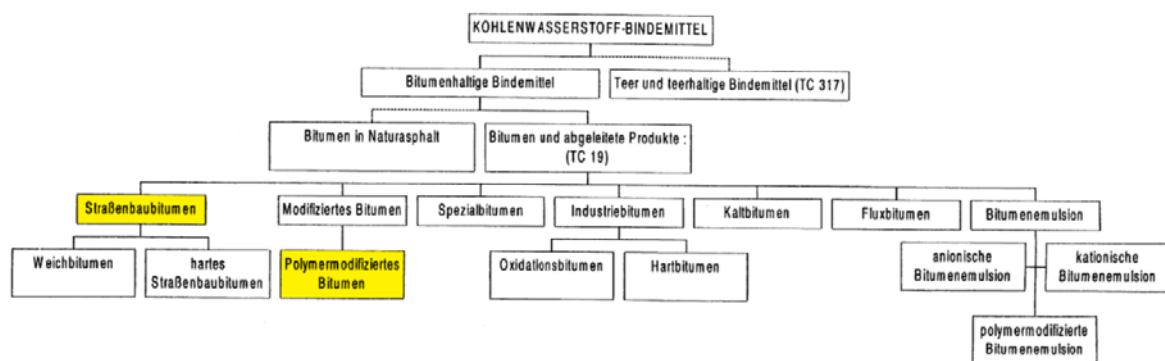


Abbildung 7: Terminologie der Kohlenwasserstoff-Bindemittel nach EN 12597 [2]

In Rahmen dieser Diplomarbeit werden ein Straßenbaubitumen und ein polymermodifiziertes Bitumen behandelt, deswegen wird nur auf diese beiden Arten näher eingegangen.

2.6.1 Straßenbaubitumen

Als Straßenbaubitumen bezeichnet man die Bitumensorten, die zur Herstellung von Asphalt für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen und im Wasserbau eingesetzt werden. Sie werden als Bitumen vom Soltyp eingestuft. Das Straßenbaubitumen entsteht in der Raffinerie als Produkt der zweiten Destillationsstufe und wird deswegen auch Destillationsbitumen genannt. Die Werte von **Standard-Straßenbaubitumen** für die Nadelpenetration (siehe Kapitel 4.2.2) liegen zwischen 20 Zehntelmillimeter (1/10 mm) bis 330 1/10 mm. Diese Werte geben Information über die Härte des verwendeten Bitumens. Die Zahlenwerte in der Bezeichnung eines Bitumens (z.B. Bitumen 50/70) geben den Bereich an, in dem die Eindringtiefe der Nadel liegen darf. In Europa werden die am häufigsten verwendeten Sorten von Straßenbaubitumen durch ihre Nadelpenetration bei 25 °C bis zu einem Höchstwert von 900 1/10 mm definiert. Die Temperaturspanne zwischen Erweichen und Verspröden, die so genannte „Plastizitätsspanne“, liegt um etwa 70 K. Sie verschiebt sich bei den härteren Sorten in höhere Temperaturbereiche. **Weichbitumen** sind die bei der gewöhnlichen Destillation des Erdöls unter geringem Vakuum gewonnenen weichen Sorten mit Penetrationswerten zwischen 250 1/10 mm bis 900 1/10 mm oder mit kinematischen

Viskositäten bei 60 °C von 1000 mm²/s bis 16000 mm²/s. **Hartes Straßenbaubitumen** weisen Penetrationswerte von 10 1/10 mm bis 30 1/10 mm auf. Sie sind daher steif und spröde. Wegen des relativ hoch liegenden Brechpunktes (Brechpunkt nach Fraaß siehe Kapitel 4.2.3) finden sie vor allem dort Verwendung, wo ihr Sprödverhalten nicht zur Wirkung kommen kann. Sie werden im Bauwesen bevorzugt für Gussasphalte in Innenräumen (z.B. Lagerhallen) eingesetzt, da sie eine hohe Standfestigkeit haben. In Österreich werden im Straßenbau hauptsächlich mittelharte Bitumen (50/70, 70/100) eingesetzt. [1], [12]

2.6.2 Modifiziertes Bitumen

Die rheologischen Eigenschaften von modifizierten Bitumen sind bei der Herstellung durch Verwendung eines oder mehrerer chemischer Zusätze modifiziert worden. Die chemischen Zusätze umfassen Naturkautschuk, synthetische Polymere, Schwefel und bestimmte Organometallverbindungen, aber nicht Sauerstoff (→ **Oxidationsbitumen**) oder Oxidationskatalysatoren. Fasern und anorganische Pulver (z.B. Füller) werden nicht als Bitumenmodifizierungsmittel angesehen. Modifizierte Bitumen können als solche oder verschnitten, emulgiert oder gemischt mit z.B. Naturasphalt verwendet werden. [12]

Es gibt zwei Verfahren für die Modifizierung von Bitumen: Nassverfahren und Trockenverfahren. Das erste findet im Anschluss der Raffination statt und das zweite im Asphaltmischwerk im Zuge der Mischung mit Gestein. [12]

Einen Sonderfall ist das **polymermodifizierte Bitumen (PmB)**, welches typischerweise mit 3 bis 8 M.-% eines organischen Polymers modifiziert ist. Die Polymere bilden ähnlich den Asphaltene netzwerkartige Strukturen aus und beeinflussen das thermoviskose und elastoviskose Verhalten von Bitumen. [12]

Die Hauptziele der Polymermodifizierung liegen bei der Verbesserung der Bitumeneigenschaften, nämlich:

- (1) höhere Kohäsion
- (2) größere Dehnbarkeit (Duktilität)
- (3) höhere Adhäsion (Haftung) an Gesteinskörnungen
- (4) größere Plastizitätsspanne: höhere Wärmestandfestigkeit bei gleichzeitig verbessertem Kälteverhalten
- (5) große elastische Rückverformung nach Entlastung [7]

Es gibt eine Vielzahl von Polymeren die unterschiedliche Einflüsse auf das Bitumenverhalten haben. Es handelt sich um Polymere aus der Gruppe der Thermoplaste und Elastomere. Die wichtigsten Polymergruppen zur PmB-Herstellung sind in nachfolgender Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Übersicht: Polymergruppen [12]

PE	Polyethylen
APP	Ataktisches Polypropylen
SBR / SBS	Styren-Butadien-Kautschuk / Styren-Butadien-Styren
EPDM	Ethylen - Propylen - Dien - Terpolymer
EVA	Ethylen - Venylacetat - Copolymer
ACM	Ethylen - Acrylester – Copolymer

Die Wirkungsweise polymermodifizierter Bindemittel ist wesentlich durch ihren strukturellen Aufbau sowie durch das mikro- und nanostrukturelle Zusammenwirken zwischen Polymer und Bitumen bestimmt. Für Straßenbeläge und Abdichtungen wird typischerweise das Elastomer SBS (**S**tyrol-**B**utadien-**S**tyrol-Blockpolymer) beigegeben, welches eine sehr positive Wirkung auf die Elastizität ausübt, jedoch den Nachteil besitzt, dass es relativ oxidations- und temperaturempfindlich ist. Bei Beimengung von SBS ist es notwendig, entweder sehr feine SBS Pulver zu verarbeiten oder das SBS vorab in Öl zu quellen, damit es nicht zur Ausbildung von größeren Agglomerationen und zu einer Phasentrennung kommt. Von geringerer Bedeutung sind EVA (**E**thylen-**V**inyl-**A**cetate-Copolymer) und EPDM (**E**thylen-**P**ropylen-**D**ien-**T**erpolymer). Im Straßenbau werden zum Bitumen etwa 3-8 M.-% SBS Polymer und bei Dichtungsmassen (z.B. bei Dichtungsbahnen) etwa 10-15 M.-% SBS zugegeben. Die Mischbarkeit spielt auf die Bindemittel-Eigenschaften eine große Rolle. Das Plastomer APP (**A**taktisches **P**olypropylen) ist besonders wichtig für den Abdichtungssektor. Während Polymerbitumendichtungsbahnen mit SBS allgemein bei kalter Witterung wegen ihres guten Kältebiegeverhaltens leichter zu applizieren sind als APP-Produkte, erweisen sich APP-Produkte als widerstandsfähiger in heißem Klima, da APP bei hohen Temperaturen weniger oxidationsempfindlich ist. [3]

In Abbildung 8 wird die strukturelle Wirkungsweise von SBS und APP schematisch gezeigt:

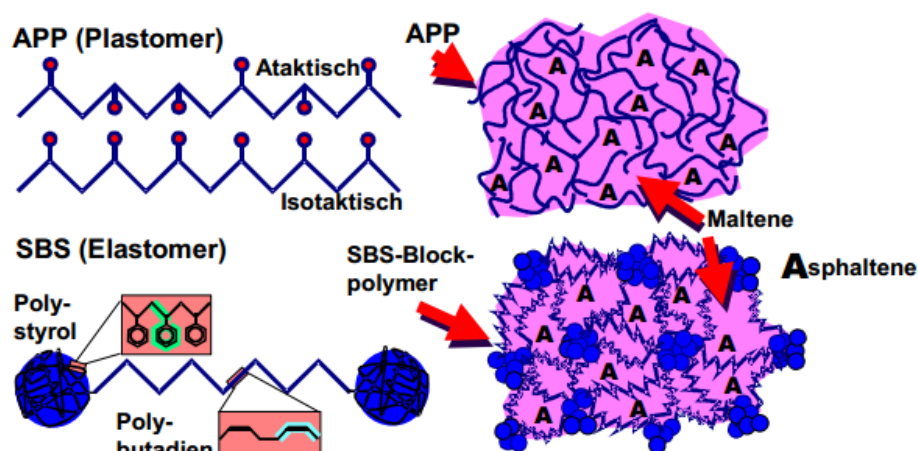


Abbildung 8: Modell der Struktur von APP und SBS [3]

Ebenso zeigen Bitumen unterschiedlicher geographischer Herkunft nicht die gleiche Polymer-Kompatibilität. Vorhersagen über die Kompatibilität bestimmter Bitumen-Polymer-Kombinationen sind derzeit noch kaum möglich und bedürfen daher der empirischen Ermittlung mittels Laborversuche. [12]

Die Wirksamkeit der Polymere hängt von der Polymerart als auch vom Ursprung des Bitumens ab. Die Mischbarkeit des Polymers ist von großer Bedeutung, weil nur durch homogen hergestellte Mischungen eine Verbesserung der Eigenschaften gewährleistet ist (siehe Abbildung 9).

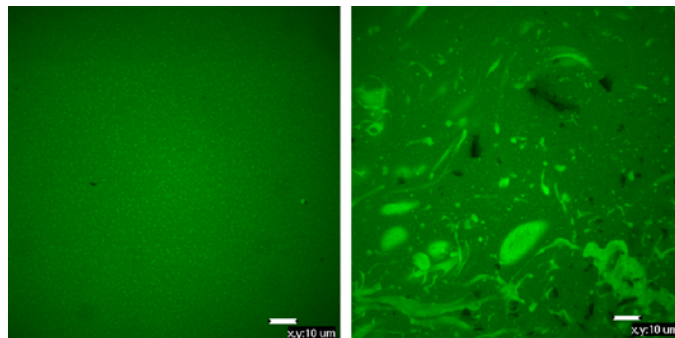


Abbildung 9: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen von Bitumen mit 4 M.-% SBS links: gut mischbar, rechts: schlecht mischbar [Institut für Materialchemie, TU Wien]

Das Elastomer SBS ist das derzeit am häufigsten verwendete Polymer zur Bitumenmodifizierung. Durch seine Polymerisation werden Styrol-Dreiblock-Copolymere hergestellt. Alternativ kann eine Doppelblockvorstufe durch aufeinanderfolgende Polymerisation von Styrol, ein Butadien Mittelblock-Monomer, gefolgt von einer Reaktion mit einem Kupplungsmittel, hergestellt werden. Auf diese Weise können nicht nur lineare Copolymere hergestellt werden, sondern auch multiarmige Copolymere (bekannt als sternförmige, radiale oder verzweigte Copolymere). Die Struktur eines SBS-Copolymer besteht aus Styrol-Butadien-Styrol-Dreiblock-Ketten. [14]

SBS-Copolymere leiten ihre Festigkeit und Elastizität von der physikalischen Vernetzung der Moleküle in ein dreidimensionales Netzwerk ab. Die Polystyrolendblöcke ergeben die Festigkeit des Polymers, während die Polybutadien gummiartigen Matrix-Mittelblöcke dem Material seine Elastizität verleihen. Der Effekt dieser Vernetzung nimmt rasch über die Glasübergangstemperatur von Polystyrol (etwa 100 °C) ab. [14]

Wenn SBS mit Bitumen vermischt wird, absorbiert die elastomere Phase des SBS-Copolymers die Maltene (ölige Komponenten) des Bitumens und vergrößert dabei ihr Ausgangsvolumen. Ein kontinuierliches Polymernetzwerk (Phase) wird in einem PmB durch geeignete SBS-Konzentrationen gebildet. Der thermoplastische Kautschuk hat ein Molekulargewicht, das ähnlich oder höher als jenes der Asphaltene ist. Es kann eine Phasentrennung auftreten, wenn nicht genügend Maltene zur Verfügung stehen. Diese Phasentrennung ist eine

Indikation der Unverträglichkeit des Basisbitumens mit dem Polymer. Die Vereinbarkeit der SBS-Bitumen-Mischung kann durch Zugabe von Aromaölen verbessert werden. Ist dieser Gehalt zu hoch, werden die Polystyrolblöcke aufgelöst und die Vorteile des SBS-Copolymer zerstört. [14]

Die konventionellen SBS-Polymere verbessern die Eigenschaften von Bitumen jedoch bei zu geringer Polymerbeimengung ist die dominante Phase immer noch das Bitumen selbst und damit dessen Eigenschaften (siehe Abbildung 10). Steigt der Polymergehalt, kehren sich die Phasen um, so dass sich das Bitumen jetzt viel mehr wie Kautschuk verhält. [15]

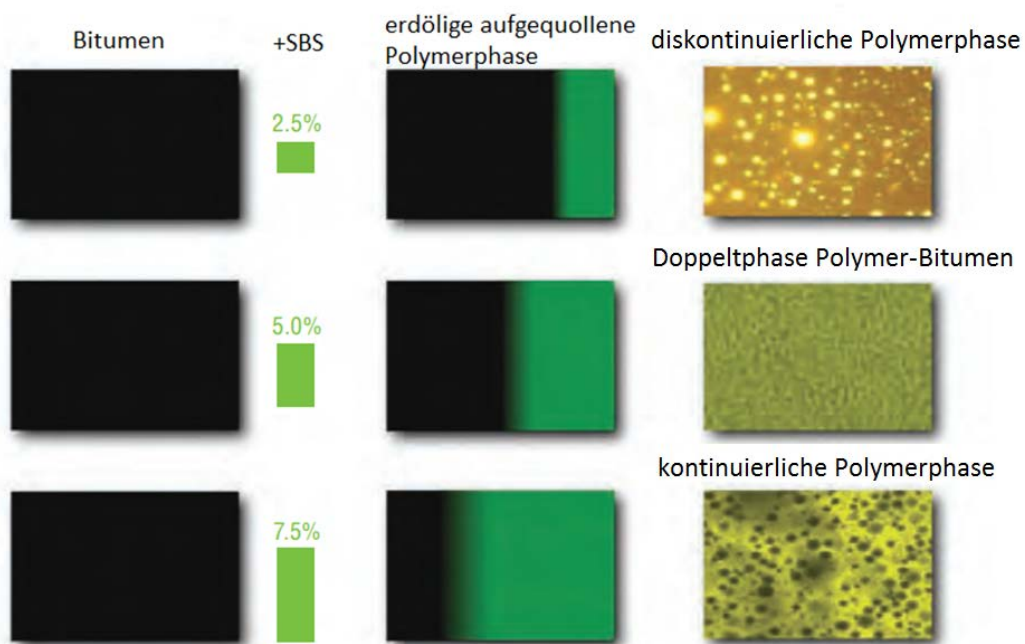


Abbildung 10: Die Wirkung vom zunehmenden SBS Polymergehalt auf die Bitumen-Polymer Morphologie [15]

Das SBS-Polymer hat auch tiefgreifende Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften. Wie in Abbildung 11 gezeigt, wird der Erweichungspunkt (siehe Kapitel 4.2.1) drastisch erhöht und der Widerstand gegen Verformung der Mischung steigt.

Entscheidend ist der richtige SBS-Behalt. Die Abbildung 11 soll dies anhand eines Beispielbitumens veranschaulichen. Wenn der SBS-Anteil bis 3 M.-% beträgt, tritt die diskontinuierliche polymerreiche Phase auf und es gibt nur einen kleinen Unterschied beim Erweichungspunkt (von 48 auf 53 °C). Bei einem Polymergehalt von 3 bis 6 M.-% (doppelt polymerreiche Phase) ist eine große Steigerung beim Erweichungspunkt (von 53 auf 84 °C) erkennbar. In der kontinuierlichen polymerreichen Phase (von 6 bis 8 M.-%) verändert eine weitere SBS-Zugabe nur sehr wenig (von 84 auf 90 °C). [15]

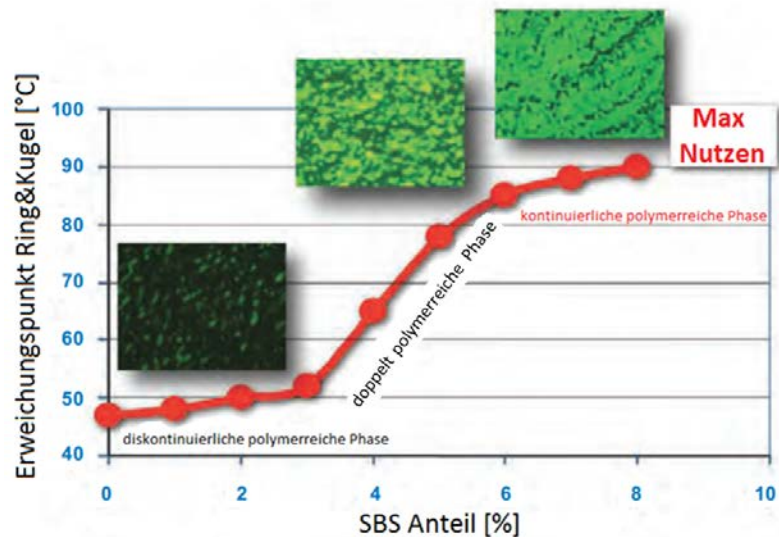


Abbildung 11: Die Wirkung vom zunehmenden SBS Polymergehalt auf den Erweichungspunkt Ring & Kugel [15]

2.7 Bitumenalterung

Der Begriff „Bitumenalterung“ umfasst alle Alterungsmechanismen, die auf das Bitumen im Laufe des gesamten Lebenszyklus wirken. Die wichtigsten Bitumen beeinflussenden Faktoren sind die Temperatur, der Luftsauerstoff, das Wasser, die Verkehrsbelastung (mechanische Belastung, als auch Schadstoffe) und die Sonneneinstrahlung. Bitumenalterung ist ein irreversibler Prozess, bei dem gealtertes Bitumen zu einer Verschlechterung des Gebrauchsverhaltens des Asphaltbelages führt und die mögliche Recyclingfähigkeit begrenzt. Wenn Bitumen altert, verändern sich seine chemischen, physikalischen und rheologischen Eigenschaften.

2.7.1 Alterungsmechanismen

Je nach Eindringtiefe in den Asphalt lassen sich 3 Schadstoffgruppen unterscheiden:

- (1) Auf die Oberfläche begrenzt: UV-Strahlung, Mineralstäube
- (2) Mehrere Zentimeter Eindringtiefe (abhängig vom Hohlraumgehalt): reaktive Gase
- (3) Vollständiges Durchdringen des Asphaltkörpers: gut wasserlösliche Gase [12]

Zu den reaktiven Gasen zählen bodennahes Ozon (O_3), Stickoxide (NO_x) und Schwefeldi- und -trioxid (SO_2/SO_3). Durch Stickoxide, bodennahes Ozon und UV-Strahlung kommt es zur Bildung von OH-Radikalen. Durch Niederschläge werden diese Gase aus der Atmosphäre gewaschen und es kommt zur Bildung verschiedenster Säuren. [12]

- (1) $NO_x \rightarrow$ Salpetrige Säure (HNO_2) und Salpetersäure (HNO_3)
- (2) $SO_2/SO_3 \rightarrow$ Schwefelige Säure (H_2SO_3) und Schwefelsäure (H_2SO_4)
- (3) $OH \rightarrow$ Wasserstoffperoxid (H_2O_2)

Die Herkunft der Schadstoffe ist unterschiedlich. Stickoxide stammen hauptsächlich vom Kfz-Verkehr, Schwefeldi- und -trioxid aus dem Hausbrand und Industrie. Die Bildung, der Ab- und Umbau der Schadstoffe laufen in der Atmosphäre parallel ab und müssen daher in ihrer Gesamtheit betrachtet werden. [12]

Die Bitumenalterung unterteilt sich in folgenden drei Hauptkategorien:

- (1) thermische/destillative Alterung
- (2) oxidative Alterung
- (3) strukturelle Alterung

Die erste Art, die **thermische oder destillative Alterung**, basiert auf dem Abdampfen flüchtiger Ölanteile aus dem Bitumen bei Temperaturen oberhalb des Siedepunktes dieser Stoffe. Diese hohe Temperatur tritt z.B. bei der Asphaltherstellung und –verarbeitung auf und kann eine anschließende weitergehende Alterung verursachen. Bei der destillativen Alterung haben die folgenden Faktoren große Bedeutung: Bitumensorte, Temperatur, spezifische Oberfläche. Je weicher das Bitumen ist, d.h. es enthält mehr niederviskose Ölanteile, desto leichter altert es. Mit steigender Temperatur erhöhen sich auch der Dampfdruck und die Menge der verdampfenden Ölanteile. [1]

Bei der zweiten Alterungsart, die **oxidative Alterung**, reagieren die Kohlenwasserstoffe (reagierende Bitumen-Komponente) mit Luftsauerstoff, Ozon, Radikalen und im Wasser gelöste Oxidationsmittel. Diese Alterung hängt von Luftzutrittsmöglichkeit, Temperatur und Licht ab. Bei unbehindertem Luftzutritt an die Bitumenoberfläche bleibt die Wirkung unvermindert anhaltend, weil immer neuer Sauerstoff nachgeliefert wird. Nur in luftdicht verschlossenen Behältern lässt sich die Oxidation eindämmen. Mit einem Anstieg der Temperatur verstärkt sich die Wirkung der oxidativen Alterung. Bereits eine Erhöhung um 10 °C verdoppelt die Reaktionsgeschwindigkeit. Während die Oxidation im Dunkeln sehr langsam abläuft, wird sie durch die Einwirkung von Licht beschleunigt. Die Einwirktiefe des Lichts beträgt jedoch lediglich 4 bis 5 µm. [1]

Bei der **Strukturalterung** von Kolloiden findet eine Vergrößerung der kolloidal dispergierten Teilchen statt. Bei dem Kolloidsystem Bitumen führt dies zu einer Vergrößerung der Mizellen innerhalb der öligen Phasen. Die dispergierten Teilchen koagulieren und treten zu größeren Aggregaten zusammen. Es vollzieht sich der folgende Alterungsprozess: Sol→strukturiertes Sol→Koagel→Gel. Mit dem Verlassen des kolloid-dispersen Systems wird die Strukturalterung beendet. [16]

Allgemein gewinnt das Bitumen durch die Alterung an Härte und durch die fortschreitende Strukturierung an innere Festigkeit. Gleichzeitig verliert das Bitumen an Elastizität, während die Viskosität ansteigt. Je konzentrierter die Lösung der Asphaltene und Erdölharze auftritt,

desto stärker werden die Wechselwirkungen der Kolloidmizellen, die zur Bildung einer Strukturviskosität führen. [13]

Der Endzustand des Alterungsprozesses führt über den Gel-Zustand, womit ein Verlust an flüssiger Phase verbunden ist. Aufgrund des dichteren Zusammentretens der koagulierten Phasen kommt es infolge der Alterung zu einer dichteren Packung, die zu einem geringfügigen Verlust an Volumen und damit zur Rissbildung führen kann. [13]

Extrem gealterte Bitumen sind stark versprödet. Unter Volumenverminderung und Verfestigung wird vom Gel die ölige Phase freigesetzt. Dadurch erhöhen sich die Kontaktstellen zwischen den koagulierten Mizellen. Durch die Verminderung der Grenzflächen und einer wachsenden Strukturierung der Kolloidteilchen wird die Grenzflächenenergie reduziert. Das System verliert durch die Teilchenvergrößerung und die Strukturierung an freier Energie. Die Vergrößerung der Teilchen setzt sich so lange fort, bis diese den kolloid-dispersen Bereich verlassen haben und in den grob-dispersen münden. Bei einem Durchmesser der Teilchen von 1 μm wird der Übergang vom kolloid-dispersen System vollzogen. Gleichzeitig wird das Minimum an Grenzflächenenergie erreicht. [13], [16]

Allgemein lässt sich die Alterung von Bitumen mit den drei Begriffen charakterisieren:

- (1) Teilchenvergrößerung
- (2) Verringerung der spezifischen Oberfläche der dispersen Teilchen
- (3) Anwachsen der Strukturviskosität [16]

Bei polymermodifiziertem Bitumen ist zusätzlich die Degeneration der Molekülkolloide des verwendeten Polymers zu berücksichtigen. Die im Ursprungszustand langkettigen Polymere werden durch zunehmende Alterung zu immer kurzkettigeren Polymeren zerteilt und verlieren dadurch ihre vernetzenden Eigenschaften. Neben der Verkürzung der Polymerketten kann es in Folge chemischer Veränderungen auch zu Abstoßungsreaktionen zwischen Polymer und Bitumen und in weiterer Folge zu Verklumpungen kommen. Die genauen Alterungsmechanismen sind wissenschaftlich nicht geklärt und derzeit Gegenstand der Forschung. Die Polymeralterung, die jedoch irreversibel ist, kann der Strukturalterung des Bitumens zugeordnet werden. [12]

2.7.2 Alterungsstufen

Der Bitumenlebenszyklus umfasst die folgenden drei Alterungszustände:

(1) Stufe A „Ungealtert“:

Der ungealterte Zustand, in weiterer Folge auch als Frischbitumen bezeichnet, ist unverwendetes gebrauchsfertiges Bitumen aus der Raffinerie.

(2) Stufe B „Kurzzeitgealtert“:

Der kurzzeitgealterte Zustand soll den Bitumentransport zum Asphaltmischwerk, die Heißlagerung, Pumpvorgänge, das Mischen mit Mineralstoffen, den Asphalttransport zur Baustelle und den Mischguteinbau abbilden.

(3) Stufe C „Langzeitgealtert“:

Der langzeitgealterte Zustand vereint die Kurzzeitalterung mit einer langjährigen Liegedauer auf der Straße. Der langzeitgealterte Zustand ist nach 5 bis 10 Jahren Liegedauer erreicht. Eine genauere Angabe ist aufgrund der Abhängigkeit von den Umweltbedingungen nicht möglich. [12]

Die nachfolgende Abbildung 12 stellt den schematischen Verlauf der Alterung über die Zeit dar. Der genaue Alterungsverlauf in der Realität ist abhängig von der Bitumensorte, der Verarbeitung und der Umwelteinflüssen im eingebauten Zustand. [12]

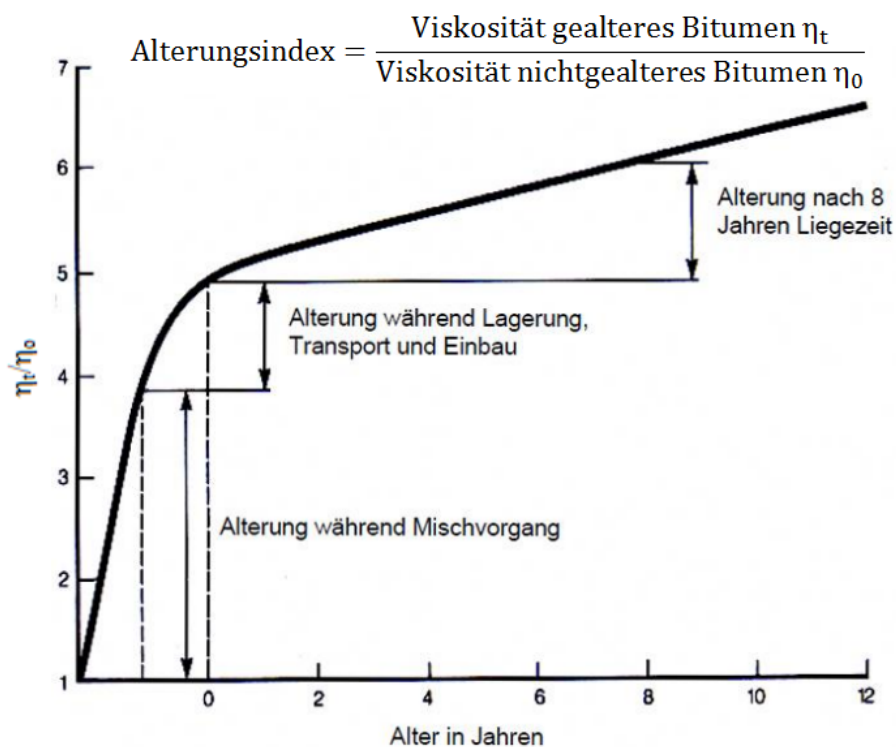


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Alterungsverlaufs [12]

2.7.3 Labor- und Feldalterung

Die **Feldalterung** bezeichnet die „natürliche“ Alterung von Bitumen in der Umwelt.

Unter **Laboralterung** versteht man die simulierte Alterung des Bitumens um die Eigenschaften nach Kurz- und Langzeitalterung durch weiterführende Prüfmethode abzubilden. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich die Eignung eines bestimmten Frischbitumens für ein geplantes Straßenbauprojekt feststellen. [12]

Für die Laboralterung kommen verschiedene Alterungsmethoden zum Einsatz:

(1) Kurzzeitalterung:

- Rolling Thin Film Oven Test - RTFOT
- Modified Rolling Thin Film Oven Test - MRTFOT
- Thin Film Oven Test - TFOT
- Rotating Flask Test - RFT

(2) Langzeitalterung:

- Pressure Aging Vessel - PAV
- Rotating Cylinder Aging Test - RCAT
- Long-Term Rotating Flask Test - LTRFT

Die in Österreich am häufigsten verwendeten Methoden sind RTFOT und PAV. [12]

2.8 Literaturstudie zu labortechn. Aspekten des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen

Beim Abkühlen einer Asphaltsschichte bauen sich infolge der teilweise behinderten Kontraktion Zugspannungen auf. Wenn infolge dieser Spannungen die Zugfestigkeit des Asphalts überschritten wird, entstehen sogenannte „Kälterisse“. Je steifer (spröder) der Asphalt ist, desto eher kommt es zu solchen Rissen. [17]

Asphalte sind Gemische aus gebrochenen Mineralstoffen und Bitumen als Bindemittel. Mineralstoffe verhalten sich bei Belastung als Einzelkorn elastisch und als Haufwerkplastisch. Das Bitumen reagiert thermo-visko-elastisch. Die Eigenschaften der Komponenten Mineralstoffe und Bitumen übertragen sich auf den Asphalt. Bei Druckbeanspruchungen zeigen Asphalte ein elastisch-plastisch-viskoses Verhalten. Bei Zugbeanspruchungen kann die plastische Komponente vernachlässigt werden, da im Haufwerk praktisch keine Reibungskräfte aktiviert werden. Der Asphalt zeigt daher bei einer Zugbeanspruchung ein rein visko-elastisches Stoffverhalten. Während bei sehr tiefen Temperaturen ein praktisch rein elastisches Verhalten vorliegt, treten bei höheren Temperaturen in zunehmendem Maße die viskosen Eigenschaften hervor. Asphaltbefestigungen erleiden bei Abkühlung einen thermischen Schrumpf, der aber infolge der Reibung auf der Unterlage behindert wird. Es entstehen sogenannte thermisch induzierte Zugspannungen im Asphalt, deren Aufbau der Asphalt bei höheren Temperaturen durch sein eigenes Relaxationsvermögen entgegenwirkt. [18]

Bei hohen Temperaturen erfolgt der Spannungsabfall innerhalb weniger Sekunden, bei Tieftemperaturen innerhalb von Stunden. Die Temperaturabhängigkeit des Relaxationsverhaltens ist eine Folge der thermo-visko-elastischen Eigenschaften des Bitumens. Bei Tieftemperaturen nimmt jedoch die Relaxationsfähigkeit des Asphaltes bei Abkühlungsprozessen infolge zunehmender Härte des Bitumens ständig ab. [18]

„*Physical hardening*“ (Physikalische Verhärtung) von Bitumen spielt eine wichtige Rolle bei der Rissbildung von flexiblen Fahrbahnen. Es kann als thermoreversibler Prozess, welcher bei Raumtemperatur zeitabhängig auftretende isotherme Änderungen in den rheologischen Eigenschaften des Bitumens erzeugt, definiert werden. Die Erhöhung der Steifigkeit und der Rückgang in der Relaxationsfähigkeit infolge physikalischer Verhärtung tragen zur Bildung von thermisch verursachter Schwindungsspannung in den Asphaltmischungen bei. [19]

Die physikalische Verhärtung ist keine neue Entdeckung, sondern ihre Auswirkungen auf die Tieftemperatureigenschaften von Bitumen werden seit sehr langer Zeit und insbesondere in den letzten Jahren untersucht. Die ersten umfassenden Studien über die physikalische Verhärtung im Bitumen sind von Traxler et al. in den 1930er Jahren und von Brown et al. in den 1950er Jahren durchgeführt worden. Bei ihren Untersuchungen betrachteten sie die Viskosität- und Zeitstand-Zugversuchsänderungen während der isothermen Bedingungen bei

Raumtemperatur oder knapp über dem Gefrierpunkt. Sie haben festgestellt, dass die physikalische Verhärtung aufgrund der Anwesenheit einer thermisch instabilen Struktur in Asphalt nach seiner Herstellung hervorgerufen wird. Blokker und van Hoorn (1959) prägten den Begriff „Physikalische Verhärtung“, so wie er jetzt allgemein in der Asphaltliteratur bekannt ist. Es wird allgemein angenommen, dass die physikalische Verhärtung ein Resultat der Abkühlung von amorphen Stoffen von der Schmelztemperatur bis unterhalb der Glasmodul-Übergangstemperatur (T_g) ist, da unterhalb dieser Temperatur das Material vom thermodynamischen Gleichgewicht abzuweichen beginnt. In Asphaltbindemittel und auch in vielen amorphen Polymeren ist die physikalische Verhärtung, die bei Tieftemperaturen auftritt, ein reversibler Prozess - durch Erhitzung. [20]

Die physikalische Verhärtung wird durch die vorgeschlagene Theorie für freies Volumen von Struik und Ferry erklärt (siehe Abbildung 13). Die Glasmodul-Übergangstemperatur wird als die Temperatur am Schnittpunkt der beiden Asymptoten zu den linearen Bereichen auf der Volumen-Temperatur Kurve betrachtet. [20], [21]

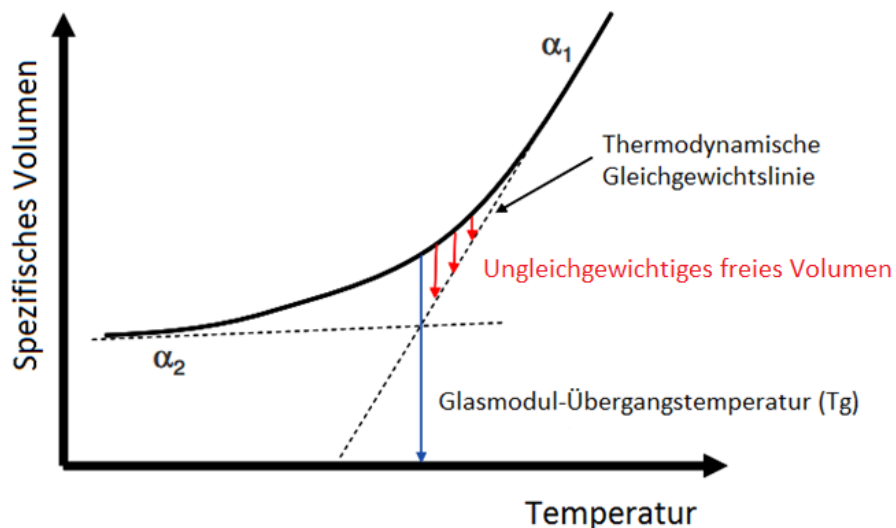


Abbildung 13: Physikalische Verhärtung und der Zusammenhang mit dem freien Volumen [22]

Während der Abkühlung von hohen Temperaturen sind die Volumenänderungen aufgrund Molekularanpassungen deutlich größer als Volumenveränderungen aufgrund von Schwingungsbewegung. Deswegen folgt der Zusammenbruch des freien Volumens einem linearen Trend mit der Temperatur. Wenn der Glasmodul-Übergangsbereich erreicht wird, verzögert sich die Geschwindigkeit der Molekularanpassungen. Das Bitumen befindet sich im Glasmodul-Übergangsbereich (siehe Abbildung 13) in einem metastabilen Zustand (das heißt, nicht im thermodynamischen Gleichgewicht) und die Eigenschaften erster Ordnung, wie Entropie bleiben stetig, aber Eigenschaften zweiter Ordnung, wie Koeffizienten der Wärmeausdehnung/Schwindung und Wärmekapazität, sind diskontinuierlich. [22]

Die Glasmodul-Übergangstemperatur des Bitumens wird durch die mathematische Formulierung von Bahia et al. (1991) ermittelt:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = C + \alpha_g(T - T_g) + \ln \left\{ \left[1 + e^{\frac{T-T_g}{R}} \right]^{R(\alpha_1 - \alpha_g)} \right\} \quad \text{Gleichung 1, [19]}$$

Dabei sind:

- $\frac{\Delta V}{V_0}$die relative Volumenänderung von Bitumen
- C.....ein Schnittpunkt ohne physikalische Bedeutung
- α_1 und α_gdie flüssartigen und glasartigen Koeffizienten der thermischen Kontraktion/Expansion
- R.....ein Parameter, der die Krümmung zwischen zwei linearen Asymptoten repräsentiert [19]

Im Vergleich zu Polymeren und anderen amorphen Materialien, für die die physikalische Verhärtung unterhalb T_g auftritt, kann man diesen Effekt bei Bitumen unterhalb und oberhalb T_g beobachten. Dieser Unterschied basiert auf dem Auskristallisieren der im Bitumen enthaltenen Paraffine und Paraffinähnlichen Bestandteile (<5 M.-%). Das Auskristallisieren ist ein langsamer Prozess, der Tage bis Jahre dauern kann. Dabei nimmt das Bitumen an Steifigkeit zu. Dieser Effekt tritt nicht nur wie weitreichend bekannt bei Temperaturen unter null, sondern bereits ab Temperaturen ab unter 90 °C auf. Der Kristallisationsvorgang ist ein exothermer Prozess. Die dabei frei werdende Energie kann mit Hilfe der **Differential Scanning Calorimetry (DSC)** gemessen werden. Dieser Prozess ist durch abermaliges Aufschmelzen reversibel. [12], [19]

Der physikalische Verhärtungsindex, S_{i60}/S_{o60} , gibt das Verhältnis von der Kriechsteifigkeit (S_{60}) nach Zeit t_i zu Anfangssteifigkeit nach Zeit t_0 nach isothermer Lagerung. Der bituminöse physikalische Verhärtungsgrad (bitumen **Physical Hardening Rate: PHR_B**) wird nach folgender Weise bestimmt:

$$\text{PHR}_B = \frac{d\left(\frac{S_{i60}}{S_{o60}}\right)}{d(\log t_i)} \quad \text{Gleichung 2, [19]}$$

PHR_B ist ein Maß für die Fähigkeit von Bitumen zu Verhärten und zum Aufbau einer thermisch induzierten Spannung unter isothermen Bedingungen. [19]

Die physikalische Verhärtung bei Tieftemperaturen kann durch das Bending Beam Rheometer beurteilt werden (siehe Abbildung 14).

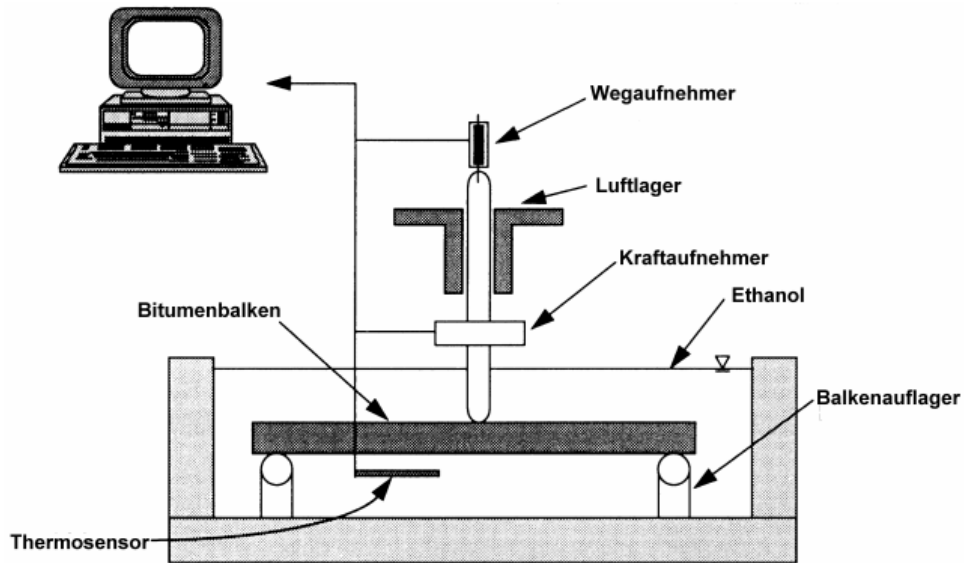


Abbildung 14: Schemaskizze des Bending Beam Rheometer [17]

Dieser Versuch wurde im Zuge des amerikanischen Strategic Highway Research Program (SHRP) entwickelt und wird auch in Europa verwendet. Dieser Versuch basiert auf einem Drei-Punkt-Biegeversuch (siehe Abbildung 15). Mit Hilfe eines Laststempels wird eine Biegezugspannung in einen Bitumenbalken eingebracht und die daraus resultierende Durchbiegung gemessen. Der Versuch gibt Information über die Kriechsteifigkeit eines Bitumen- bzw. Mastixbalkens nach 60 Sekunden (S_{60}) (siehe Abbildung 16).

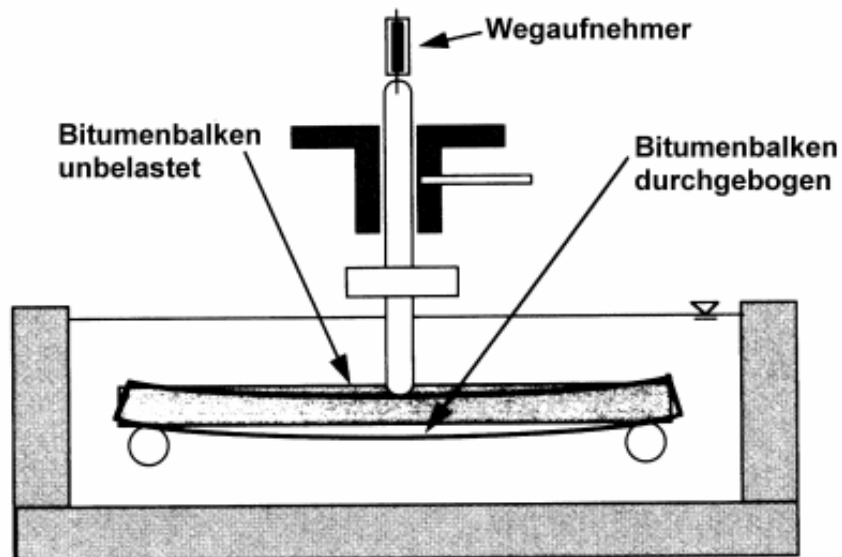


Abbildung 15: Messprinzip BBR [17]

Mit Hilfe der Balkentheorie kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Biegekriechsteifigkeit wie folgt berechnet werden:

$$S_m(t) = \frac{P \cdot L^3}{4bh^3\delta(t)} \quad \text{Gleichung 3, nach EN 14771 [23]}$$

Dabei ist:

- $S_m(t)$..die Biegekriechsteifigkeit zur Zeit t , [MPa]
- P Auflast, [N]
- L Abstand zwischen den Auflagern, [mm]
- b die Breite des Probekörpers, [mm]
- h die Höhe des Probekörpers, [mm]
- $\delta(t)$ die Durchbiegung des Probekörpers zur Zeit t , [mm]

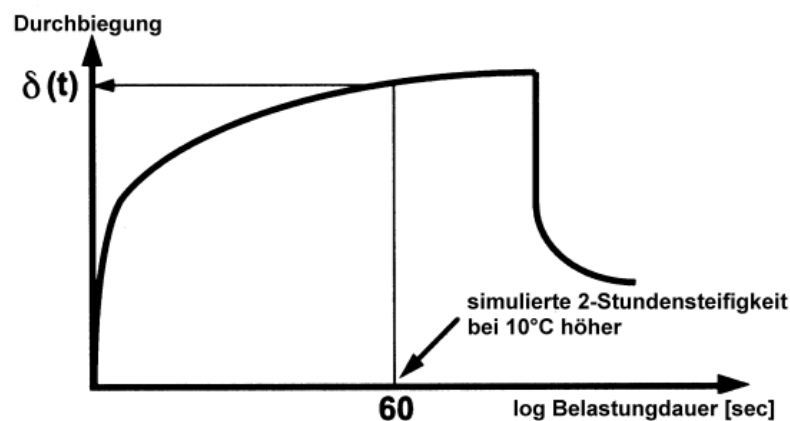


Abbildung 16: Biegekriechsteifigkeit [17]

Daneben wird auch ein sogenannter m -Wert: Eine Tangente wird an die errechnete Steifigkeitskurve gelegt (siehe Abbildung 17). Der m -Wert zeigt die Steigung der Steifigkeitskurve zu einem bestimmten Zeitpunkt und ist ein Maß für die Kriechfähigkeit bzw. Relaxationsfähigkeit des Bitumens. D.h. fällt die Steifigkeitskurve mit zunehmender Zeit stark ab, so hat die an diese Kurve gelegte Tangente eine größere Steigung (m -Wert). Je größer die Neigung ist, desto stärker ist die Relaxationsfähigkeit (Abbau der Biegezugspannungen). SUPERPAVE definiert einen kritischen Wert für diese Steifigkeit von 300 MPa. Die Temperatur, bei der diese kritische Steifigkeit erreicht wird, wird berechnet. Ist S_{60} bei der gewünschten Temperatur geringer als 300 MPa und die Steigung größer als 0,3, dann gelten die Tieftemperaturanforderungen für diesen Versuch als erfüllt und es muss kein zusätzlicher **D**irect **T**ension **T**est (DTT) zur Beurteilung des Bitumens durchgeführt werden. Liegt der S_{60} Wert zwischen 300 und 600 MPa kann zusätzlich noch bei derselben Temperatur ein DTT durchgeführt werden. Wird dort die Anforderung erfüllt, so wird trotz der Überschreitung des Grenzwertes bei der Kriechsteifigkeit das Bitumen mit der Vergleichstemperatur (siehe Seite 33) eingestuft. Die Anforderung an den m_{60} -Wert muss aber auf jeden Fall erfüllt sein. [17]

Der m-Wert kann mit Hilfe der Gleichung 4 bestimmt werden:

$$m(t) = \left| \frac{d \log[S(t)]}{d \log(t)} \right| = |B + 2C \log(t)| \quad \text{Gleichung 4, nach EN 14771 [23]}$$

Dabei ist bzw. sind:

B und C.....die Regressionskoeffizienten

t.....die Belastungsdauer

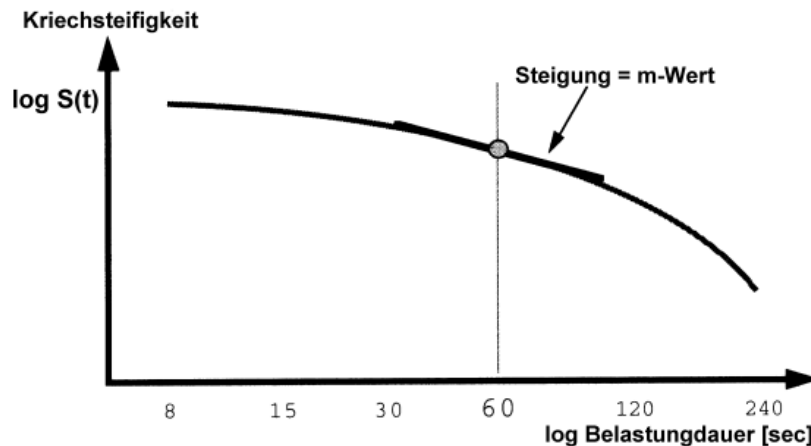


Abbildung 17: m-Wert [17]

Diese Prüfmethode wurde auf Basis einer Abkühlrate von 10 K/h während einer Dauer von zwei Stunden entwickelt (in Österreich bis zu 7 K/h). Um die Prüfzeit im Labor zu verkürzen, macht man sich das „Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip“ (siehe Kapitel 2.9) zu nutzen. Die Kriechsteifigkeit bei einer Prüftemperatur ($T_{\min+10^\circ\text{C}}$) von beispielsweise -12°C nach 60 Sekunden Belastungsdauer ist die gleiche, wie bei Bemessungstemperatur (T_{\min}) -22°C und 2 Stunden Belastungsdauer. Um einen ausreichenden Zusammenhang zwischen Kriechsteifigkeit und Belastungsdauer zu bekommen, ist eine Gesamtversuchsdauer von 240 Sekunden notwendig, wobei die Kriechsteifigkeit bei 60 Sekunden maßgebend ist. [12]

Die Probenvorbereitung und Versuchsablauf werden in Kapitel 4.3.3 detailliert beschrieben.

2.9 Modellierung einer DSR Master-Curve

Das viskoelastische Materialverhalten hängt von Zeit und Temperatur ab, d.h. $|E|=f(t, T)$. Zur Beschreibung dieser Funktion wird eine Reihe von zyklischen dynamischen Versuchen bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen durchgeführt. Ist der Verlauf der viskoelastischen Kenngröße in einem bestimmten Zeitintervall bei unterschiedlichen Temperaturen bekannt, so können die einzelnen Kurvenverläufe, wie in Abbildung 18 schematisch dargestellt, durch horizontale Verschiebung mit der bei der Referenztemperatur T_0 ermittelten Kurve $f(\zeta, T_0)$ zur Deckung gebracht werden. [24], [25]

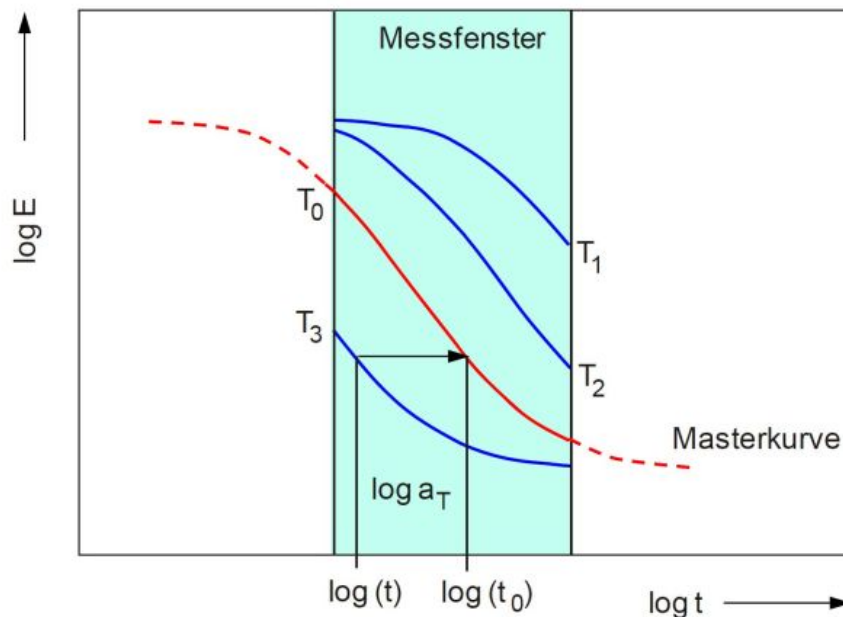


Abbildung 18: Schema der Master-Curve-Konstruktion durch „Zeit-Temperatur-Superposition“ [25]

Eine sogenannte Master-Curve kann aus einer begrenzten Versuchszahl bei unterschiedlichen Frequenzen und Temperaturen unter Verwendung des „**Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips**“ abgeleitet werden. Das bedeutet, dass die viskoelastischen Parameter für jede beliebige Temperatur und in einem breiten Frequenzbereich berechnet werden können, ohne das Material bei bestimmten Temperaturen oder Frequenzen zu messen. Das Verhalten bei hohen Frequenzen entspricht dem bei tiefen Temperaturen und umgekehrt. [24]

„**Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip**“ kann auf folgende Weise formuliert werden:

$$P(t, T) = P(\zeta, T_0) \quad \text{Gleichung 5, [24]}$$

$$\zeta = \frac{t}{a_T} \quad \text{Gleichung 6, [24]}$$

$$P(t, T) = P(\zeta, T_0) = P(a_T) \quad \text{Gleichung 7, [24]}$$

Dabei ist:

- P.....viskoelastisches Parameter
- t.....Zeit, [s]
- T.....Temperatur, [K]
- T₀.....Referenztemperatur, [K]
- ζ.....reduzierte Zeit, [s]
- a_T.....Verschiebungsfaktor, [-]

Der Verschiebungsfaktor a_T wird durch die Williams, Landel und Ferry Gleichung ermittelt:

$$\log a_T(t) = \log \frac{t}{\zeta} = \frac{-k_1(T-T_0)}{k_2+(T-T_0)} \quad \text{Gleichung 8, [24]}$$

Dabei ist, bzw. sind:

- a_T.....Verschiebungsfaktor, [-]
- k₁, k₂..Konstanten, [-]
- T.....absolute Temperatur, [K]
- T₀.....Referenztemperatur, [K]

Für die Berechnung des Verschiebungsfaktors a_T unterhalb der Glasmodul-Übergangstemperatur (T_g) wird die Arrhenius-Gleichung (siehe Gleichung 9), die eine spezielle Form von Gleichung 8 ist, verwendet.

$$\ln a_T = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad \text{Gleichung 9, [24]}$$

Dabei ist:

- a_T.....Verschiebungsfaktor, [-]
- E_a.....Aktivierungsenergie, [J/mol]
- R.....universelle Gaskonstante (=8,314), [J/(K.mol)]
- T.....absolute Temperatur (Messung), [K]
- T₀.....Referenztemperatur, [K]

Die Modellierung der Master-Curve besteht aus:

- systematisches Variieren der Aktivierungsenergie E_a
- geeignete analytische Master-Curve Funktion für jede a_T, bis das gewählte Bestimmtheitsmaß (z.B. R² oder SMRE) ein Maximum oder ein Minimum erreicht

Für die analytische Beschreibung der Master-Curve wird die folgende Gleichung verwendet:

$$f(x) = y_0 + \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b} \quad \text{Gleichung 10, [24]}$$

Dabei sind:

a, b, y_0, x_0, \dots Parameter der logistischen Funktion

Das Anpassungsverfahren kann für eine willkürliche Referenztemperatur $T_{0,i}$ oder Referenzfrequenz $F_{0,i}$ und eine bestimmte Einheit der Steifigkeit U_i durchgeführt werden. Für diese Referenztemperatur/-frequenz und Steifigkeit wird die logistische Funktion an die Prüfdaten angepasst und die geeigneten Parameter x_0, y_0, a und b werden zu einem optimalen Verschiebungsfaktor a_T erhalten. Für den Anpassungsprozess werden verschiedene Gewichtungsfunktionen berücksichtigt, um die Qualität der Anpassung zu optimieren.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist kein idealer Parameter zur Messung der Qualität der Anpassung, wenn die y -Daten eine hohe Breite von Zehnerpotenzen umfassen. Hohe y -Werte werden mit einem viel niedrigeren relativen Fehler bezüglich seiner absoluten Werte als niedrige y -Werte ausgestattet. Um den Einfluss des Absolutwerts des Datenpunktes zu beseitigen, ist die Summe der mittleren relativen Fehler (**Sum of the mean relative error-SMRE**) besser für die Anpassung geeignet:

$$\text{SMRE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|}{n} \quad \text{Gleichung 11, [24]}$$

Dabei ist:

- y_i, \dots, y -Wert zum Zeitpunkt i bei x_i
- \hat{y}_i, \dots geeignete y -Werte bei x_i
- n, \dots Nummer von Zeitpunkten

Um die Parameter der Gleichung 9 besser zu verstehen, werden folgende Überlegungen gemacht:

$$\begin{aligned} f(x)|_{x \rightarrow 0} &= \exp(y_0) \text{ für } b < 0 \text{ und } x > 0 \\ f(x)|_{x \rightarrow \infty} &= \exp(y_0 + a) \text{ für } b < 0 \text{ und } x > 0 \end{aligned} \quad \text{Gleichung 12, [24]}$$

Wenn b negativ und x positiv angenommen werden gibt es eine untere und eine obere Asymptote. Wenn x gegen 0 geht, nähert sich die Funktion zu $\exp(y_0)$ an \rightarrow die untere Asymptote. Wenn die Frequenz gegen Unendlichkeit geht, erreicht man die obere Asymptote $\exp(y_0 + a)$. Parameter x_0 und b beeinflussen die Form der Kurve zwischen diesen beiden Extremen.

Der Parameter x_0 erweist sich als Funktion der Referenztemperatur/Referenzfrequenz und Parameter y_0 ist eine Funktion der Einheit der Prüfdaten. Der Parameter x_0 bei der Bezugstemperatur $T_{0,1}$ wird als $x_{0,1}$ bezeichnet. Für jede andere Referenztemperatur $T_{0,i}$ kann $x_{0,i}$ aus der folgenden Gleichung erhalten werden:

$$x_{0,i} = x_{0,1} \cdot e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{0,1}} - \frac{1}{T_{0,i}} \right)} \quad \text{Gleichung 13, [24]}$$

Der Parameter y_0 mit der Steifigkeit U_1 wird als $y_{0,1}$ bezeichnet. Für jedes andere U_i kann y_0 mit der folgenden Gleichung 14 berechnet werden:

$$y_{0,i} = y_{0,1} + \ln \left(\frac{U_i}{U_1} \right) \quad \text{Gleichung 14, [24]}$$

So kann die Masterkurve für jede beliebige Referenztemperatur und Steifigkeit auf analytischen Weg beschrieben werden, ohne die Masterkurve jedes Mal für Referenztemperatur/Referenzfrequenz - oder Steifigkeitsänderungen anpassen zu müssen.

Für die Modellierung der Master-Curve und anschließende analytische Beschreibung der zuvor beschriebenen logistischen Funktion werden Ergebnisse von zwei verschiedenen DSR-Messprogramme (-10 bis 40 °C und 30 bis 80 °C) verwendet.

2.10 Bitumenextraktion und -rückgewinnung

2.10.1 Extraktion

Unter dem Begriff „Extraktion“, bzw. „extrahieren“⁴ versteht man jedes Trennverfahren, bei dem mit Hilfe eines Extraktionsmittels eine oder mehrere Komponenten aus einem Stoffgemisch, dem Extraktionsgut, herausgelöst werden. Wenn der extrahierte Stoff noch in Lösung vorliegt, wird er als Extrakt bezeichnet. Wird der extrahierte Stoff nicht verändert, so handelt es sich bei dieser Extraktion um ein physikalisches Verfahren, geht der Stoff eine chemische Reaktion ein, so handelt es sich um ein chemisches Verfahren. [26]

Die Bitumenextraktion ist ein Prozess, bei der Bitumen und Gestein mittels Extraktor (siehe Kapitel 4.1.1) getrennt werden. Einerseits wird der Bindemittelgehalt im Asphalt nach EN 12697-1 [27] ermittelt und andererseits das Bitumen für weitergehende Prüfungen rückgewonnen. Zur Trennung des Bitumens vom Gestein kommen verschiedene organische Lösemittel zum Einsatz. [12]

2.10.2 Rückgewinnung

Das Bitumen-Lösemittel-Gemisch wird nach der Extraktion mit Hilfe eines Rotationsverdampfers nach EN 12697-3 [28] destilliert. Als Destillation⁵ bezeichnet man ein thermisches Trennverfahren, um verdampfbare Flüssigkeiten zu gewinnen oder Lösungsmittel von schwer verdampfenden Stoffen abzutrennen. Die Destillation hat gegenüber anderen Trennverfahren den Vorteil, dass in der Regel keine weiteren Stoffe wie Adsorbentien hinzugefügt werden müssen. Der wesentliche Unterschied zwischen einer normalen (Vakuum-) Destillationsapparatur und einem Rotationsverdampfer (siehe Kapitel 4.1.2) ist in der Temperaturverteilung im Verdampferkolben. Die Flüssigkeit strömt in einem Rotationsverdampfer laminar an der Kolbenwand entlang. So wirken Adhäsionskräfte, die bewirken, dass die Flüssigkeit der Bewegung der Kolbenwand folgt. Aber aufgrund ihrer Viskosität kann die Flüssigkeit nur mit begrenzter Geschwindigkeit ablaufen. Durch die Rotation wird sowohl ein dünner, gleichmäßiger Flüssigkeitsfilm an der warmen Kolbeninnenwand hochgezogen, als auch der Wärmeübergang im Heizbad und im Kolbeninneren wesentlich verbessert. Im Kolbeninneren wird die Oberfläche durch die Rotation deutlich vergrößert, was das Verdampfen erleichtert. Dank der kurzen Verweilzeit der Flüssigkeit an einer bestimmten Stelle der Kolbenwand ist eine schonende Destillation gewährleistet (keine Überhitzung, keine Verkrustung). Ein anderer Vorteil des Rotationsverdampfers ist auch die starke Verminderung der Siedeverzüge und

⁴ „**extrahieren**“: von lateinisch extrahere „herausziehen“

⁵ **Destillation**: lat. destillare „herabtröpfeln“

Schaumbildung. Am Ende der Destillation bleibt das Bitumen und ein, vom verwendeten Lösemittel abhängiger Lösemittelrestgehalt von <1 M.-% zurück. [12], [28], [29], [30]

2.10.3 Lösungsmittel

Ein Lösungsmittel, auch genannt Lösemittel oder Solvens, ist ein Stoff, der gasförmige, flüssige und feste Substanzen lösen oder verdünnen kann. Dieser Prozess muss zu keiner chemischen Reaktionen zwischen gelöstem Stoff und lösendem Stoff führen. Wird als Extraktionsmittel ein Lösungsmittel eingesetzt, so lösen sich die zu extrahierenden Stoffe besser im Lösungsmittel als im Stoffgemenge, das Lösungsmittel zieht den in ihm besser löslichen Stoff aus dem Gemisch. Also in diesem Fall das Bitumen aus dem Korngemisch. [31]

Zum Lösen der Stoffe werden einerseits Flüssigkeiten wie Wasser und flüssige organische Stoffe beispielsweise Alkohole, Terpene, Diethylether, pflanzliche Öle, Chlorierte Kohlenwasserstoffe oder *n*-Hexan verwendet, andererseits auch Feststoffe. Unpolare Lösungsmittel lösen unpolare Stoffe und polare Lösungsmittel polare Stoffe und Ionen. Der Vorgang des Lösens besteht in der Überwindung der Gitterenergie. Äußere Kristallmoleküle oder Ionen eines Stoffes, die durch geringere Energie gebunden sind, werden aus dem Verband herausgelöst und von Lösungsmittelmolekülen durch elektrostatische Wechselwirkungen solvatisiert und dadurch stabilisiert. Bei der Wirkung von der Löslichkeit müssen auch die Kräfte innerhalb der Lösungsmittelmoleküle überwunden werden. Die dafür notwendige Energie wird aus der Anziehung zwischen dem Lösungsmittel und der gelösten Verbindung erhalten. Im Fall der Beteiligung von Wasser (wässrige Systeme) spricht man von einer Hydratisierung, bei allen anderen Lösungsmitteln (nichtwässrige Systeme) von einer Solvatisierung. Um die Löslichkeit von Stoffen zu erhöhen, aber auch aus wirtschaftlichen Gründen, werden häufig Lösungsmittelgemische verwendet. Unabhängig von der Art des Lösungsmittels steigt die Löslichkeit von festen und flüssigen Verbindungen häufig mit zunehmender Temperatur, die von Gasen sinkt. [32]

Zur Optimierung des Reaktionsverlaufes werden Druck und Temperatur eingesetzt, darum werden manche Extraktionen mit heißem Lösungsmittel und/oder unter Druck durchgeführt. Bei der Wahl eines entsprechenden Lösungsmittels sind folgenden Kriterien zu berücksichtigen: Umweltverhalten, Löseverhalten, Siedepunkt, Toxizität und Normierbarkeit. [32], [33]

Die Lösungsmittel werden meistens nach ihren physikalischen Eigenschaften in Klassen eingeteilt. Die häufigsten verwendeten sind Toluol (IUPAC: Methylbenzen), Tetrachlorethen (IUPAC: Tetrachloroethene) und Trichlorethen (IUPAC: Trichloroethene). In Österreich sind Tetrachlorethen und Toluol in Verwendung. [12]

Die genannten Lösemittel sind umweltgiftige Stoffe. Da die Extraktion automatisch mit Extraktionsapparaten und in einem geschlossenen Lösemittelkreislauf durchgeführt wird,

bzw. Luftreinhaltemaßnahmen getroffen werden, können die Lösemittel nicht in die Umwelt entweichen. Problematisch ist der toxische Lösemittelrestgehalt auch, wenn es in Zukunft zum großtechnischen Asphaltrecycling mit Bitumenrückgewinnung kommt. Als Alternative wurden Verbrennungsöfen entwickelt. Damit kann jedoch nur der Bindemittelgehalt ermittelt werden. Deswegen ist es notwendig, diese Lösemittel durch andere alternative, nicht giftige Lösemittel zu ersetzen und dazu passende Extraktions- und Destillationsverfahren zu entwickeln. [12], [34]

Ein alternatives Lösemittel ist aus nachwachsenden Rohstoffen, wie z.B. Pflanzenölester. Ein modifizierter Asphaltanalysator (siehe Abbildung 19) ist notwendig, da die bisher üblichen Elastomerdichtungen bei Einsatz der neuen Lösemittel nur eine sehr begrenzte Beständigkeit aufweisen und keinen sicheren Betrieb gewährleisten. [34]



Abbildung 19: Asphaltanalysator der Fa. Infratest, Model: Verte [35]

Die Lösemittel aus nachwachsenden Rohstoffen haben die folgenden Charakteristiken:

- (1) Pflanzenölester sind ungiftig
- (2) sind biologisch leicht abbaubar
- (3) besitzen in der Regel einen hohen Flammpunkt
- (4) sind keine leichtflüchtigen organischen Verbindungen

Besonders geeignet sind Pflanzenölester mit einem Siedepunkt unter 200 °C, wie z.B. Capron- und Caprylsäuremethylester (Methylcaprylat). [34]

2.11 Bitumen in Bulgarien

In Bulgarien werden Straßenbaubitumen 50/70, 70/100, PmB 25/55-55 (für Tragschicht) und PmB 45/80-65 (für Deckschicht) für die Herstellung von Asphaltmischgut verwendet. In den Tabellen 4 und 5 sind ihre technischen Spezifikationen, die für den Bau und Reparatur von Straßen und Autobahnen im System der National Agentur Straßen Infrastruktur gelten, gelistet:

Tabelle 4: Spezifikation des Straßenbaubitumens 50/70 und 70/100 [36]

EIGENSCHAFTEN	Prüfmethoden	ANFORDERUNGEN			
		Straßenbaubitumen 50/70		Straßenbaubitumen 70/100	
		nicht weniger als	nicht mehr als	nicht weniger als	nicht mehr als
1. Penetration, 25 °C; 0,1 mm	БДС EN 1426	50	70	70	100
2. Erweichungspunkt Ring & Kugel, °C	БДС EN 1427	46	54	43	51
3. Brechpunkt nach Fraaß, °C	БДС EN 12593		-8		-10
4. Flammpunkt, °C	БДС EN ISO 2592	230		230	
5. Stabilität des Verhärtung bei 163 °C	БДС EN 12607-1				
- Massenveränderung, %	БДС EN 12607-1		0,5		0,8
- erhaltene Penetration, %	БДС EN 1426	50		46	
- Erhöhung des Erweichungspunkt, °C	БДС EN 1427		10		9
6. Paraffininhalt, %	БДС EN 12606-1		2,2		
7. Auflösbarkeit, %	БДС EN 12592	99		99	

Tabelle 5: Spezifikation des PmB 25/55-55 und 45/80-65 [36]

EIGENSCHAFTEN	Prüfmethoden	ANFORDERUNGEN			
		PmB 25/55-55		PmB 45/80-65	
		nicht weniger als	nicht mehr als	nicht weniger als	nicht mehr als
1. Penetration, 25 °C; 0,1 mm	БДС EN 1426	25	55	45	80
2. Erweichungspunkt Ring & Kugel, °C	БДС EN 1427	55		65	
3. Brechpunkt nach Fraaß, °C	БДС EN 12593		-10		-18
4. Elastische Rückstellung bei 25 °C	БДС EN 13398	50		80	
5. Stabilität bei Lagerung. Unterschied zwischen den Erweichungspunkt in der oberen und unteren Schicht, °C	БДС EN 13399	5		5	
6. Stabilität des Verhärtung	БДС EN 12607-1				
- Massenveränderung, %	БДС EN 12607-1		0,5		0,5
- erhaltene Penetration, %	БДС EN 1426	60		60	
- Erhöhung des Erweichungspunkt, °C	БДС EN 1427		12		12
7. Elastische Rückstellung bei 25 °C nach Prüfung, gemäß БДС EN 12607-1, %	БДС EN 13398	50		70	
8. Flammpunkt, °C	БДС EN ISO 2592	250		250	

Das in Bulgarien am häufigsten verwendete Bitumen ist Straßenbaubitumen 50/70.

Zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Asphaltmischgüter gegenüber plastischen Deformationen und Spurrinnen ist der Einsatz von PmB (Erweichungspunkt steigt – siehe Kapitel 2.6.2) notwendig.

Das PmB wird in folgenden Fällen verwendet:

- für Autobahnen und Straßen mit einer Verkehrsbelastung über 3000 Kfz/Tag mit 11,5 t/Achse → PmB wird in beiden Schichten (Trag- und Deckschicht) eingesetzt
- für Straßen mit Längsneigung bis 4,5 % und eine Fahrleistungsintensität des Verkehrs von 100 bis 550 Kfz/Tag mit 11,5 t/Achse wird PmB nur in der Deckschicht verwendet, aber wenn die Fahrleistungsintensität von 550 bis 3000 Kfz/Tag ist → in beiden Schichten (Trag- und Deckschicht)
- für Straßen mit Längsneigung über 4,5 % und eine Fahrleistungsintensität von 65 bis 420 Kfz/Tag mit 11,5 t/Achse wird PmB nur in der Deckschicht verwendet, aber wenn Fahrleistungsintensität von 420 bis 3000 Kfz/Tag ist benötigt → in beiden Schichten (Trag- und Deckschicht) [36]

Von den in Bulgarien verwendeten Bitumen werden Straßenbitumen 70/100 und PmB 45/80–65 in der vorliegenden Diplomarbeit untersucht.

3 Materialien

3.1 Abschnitte und Probenursprung

Am 18.09.2012 ist ein Probefeld mit insgesamt 72 Asphaltprobekörpern mit Straßenbaubitumen 70/100 (36 Stück) und PmB 45/80-65 (36 Stück) am Standort des Labors des Forschungsbereichs für Straßenwesen der Technischen Universität Wien erstellt worden (siehe Abbildung 20). Diese Bitumen sind von demselben Ursprung, d.h. dass es nicht nur um die gleiche Grundbitumensorte (70/100) handelt, sondern um exakt das gleiche Frischbitumen. Auf diese Weise werden die Einflüsse aus unterschiedlichem Rohöl und Produktionstagen ausgeschlossen und die Bitumen werden besser vergleichbar. Das Ausgangsbitumen 70/100 wurde mit 4,3 % SBS-Polymer modifiziert und ergibt damit die Bitumensorte PmB 45/80-65. Ein Teil der Platten wurde und wird mit Streusalz behandelt, um den Winterdienst zu simulieren. Jede Platte wird in 4 Schichten geschnitten und das Bitumen jeder Schicht wird getrennt und geprüft. Nach 0, 3, 6 und 12 Monaten wurden die Bitumen extrahiert. Auf diese Weise wird die Bitumenalterung einerseits im Laufe der Zeit und andererseits mit der Einbautiefe erfasst.



Abbildung 20: Probefeld

Um die notwendigen Bitumenproben nach 12 Monaten Feldalterung für die Versuche zu erhalten, werden insgesamt 16 Extraktionen und 16 Destillationen durchgeführt (Durchführung, Bindemittel und Füllergehalt-siehe Anhang).

3.2 Probenbezeichnung

Zur Bezeichnung der Proben wurde ein bereits entwickelter Laborcode verwendet (siehe Tabelle 6). Mit diesem Laborcode, bzw. Teilen davon werden danach auch die Ergebnisse präsentiert.

Tabelle 6: Laborcodierung für Proben [12]

Laborcode	Alterungszustand	Alterung	Liegedauer	Methode	Schicht	Winterdienst
Bxxx	A	L	MMM	RTF	S1, S2, S3, S4	W
	B					
	C	F				

Legende:

- B287.....Straßenbaubitumen 70/100
- B288.....PmB 45/80-65
- A.....Frischbitumen
- B.....kurzzeitgealtert
- C.....langzeitgealtert
- RTF.....RTFOT-gealtert
- PAV.....PAV-gealtert
- L.....Laboralterung
- F.....Feldalterung
- MMM.....Liegedauer in Monaten
- S1, S2, S3, S4.....die Plattenschichte
- W.....mit Winterdienst

Das Probefeld, bzw. die Asphaltplatten besitzen eine Dicke von 10 cm. Beim Zersägen geht etwas Material verloren, deswegen ist jede Schicht ungefähr 2 cm dick. In nachfolgender Abbildung 21 wird ein Schnitt durch eine einzelne Asphaltplatte mit der Darstellung der Schichten gezeigt:



Abbildung 21: Darstellung der Schichten

Die Tabelle 7 gibt einen Überblick über alle Bitumenproben, die während des gesamten 12-monatigen Versuchs gewonnen wurden bzw. für die Auswertung verwendet werden.

Tabelle 7: Bitumenproben

Frischbitumen/Laborgealtert	Feldgealtert
B287A B288A	B287C_F000 B288C_F000
B287B_LRTF B288B_LRTF	B287C_F003_S1 B288C_F003_S1
B287C_LPAV B288C_LPAV	B287C_F003_S2 B288C_F003_S2
B287C_L000 B288C_L000	B287C_F003_S3 B288C_F003_S3
	B287C_F003_S4 B288C_F003_S4
	B287C_F006_S1 B288C_F006_S1
	B287C_F006_S2 B288C_F006_S2
	B287C_F006_S3 B288C_F006_S3
	B287C_F006_S4 B288C_F006_S4
	B287C_F006_S1_W B288C_F006_S1_W
	B287C_F006_S2_W B288C_F006_S2_W
	B287C_F006_S3_W B288C_F006_S3_W
	B287C_F006_S4_W B288C_F006_S4_W
	B287C_F012_S1 B288C_F012_S1
	B287C_F012_S2 B288C_F012_S2
	B287C_F012_S3 B288C_F012_S3
	B287C_F012_S4 B288C_F012_S4

4 Angewandte Prüfmethoden

4.1 Extraktion und Rückgewinnung

4.1.1 Asphaltanalysator

Für die Bitumenextraktion von Asphalt wird der Asphaltanalysator verwendet (siehe Abbildung 22). Mit seiner Hilfe werden die Asphalte in Bindemittel, Gesteinskörnung und Zusatzstoffe unter der Einwirkung von Lösemittel voneinander getrennt. Der einzige Weg, um ein Bitumen physikalisch unverändert und zerstörungsfrei vom Mineral zu befreien, ist die Heißextraktion.



Abbildung 22: Asphaltanalysator der Fa. Infratest, Model: ecoTest

Zuerst wird das aufgeheizte und in kleine Stücke zerteilte Asphaltmischgut in eine Siebtrommel eingefüllt und dann in die Waschkammer des Asphaltanalysators eingeführt. Mit Hilfe des heißen eingesprühten Lösemittels wird das Bindemittel (hier: Bitumen) von den Gesteinskörnern gelöst und als Bitumen-Lösemittelgemisch zusammen mit den Füllerbestandteilen in eine Becherzentrifuge überführt. Dort werden der Füller und das Bitumen-Lösemittelgemisch getrennt. Die nun vom Bindemittel befreiten feinen und groben Gesteinskörnungen sowie der Füller werden mittels eines Vakuum-Systems unter Rückgewinnung des Lösemittels getrocknet und stehen danach für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Zur Rückgewinnung des Lösemittelanteils aus dem Bitumen-Lösemittelgemisch wird das Gemisch in einen Rotationsverdampfer überführt und durch Destillation getrennt. An dem zurückbleibenden Bindemittel werden schließlich Untersuchungen zur Bestimmung der Bindemittleigenschaften durchgeführt. [37]

In Abbildung 23 sind einige Fotos über den Ablauf der Extraktion von Asphaltmischgut dargestellt:



Abbildung 23: Ablauf der Extraktion von Asphaltmischgut

Angewendete Bedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **Infratest Asphaltanalysator ecoTest Nr:200449**
- (2) Zeitdauer: etwa 60 Minuten

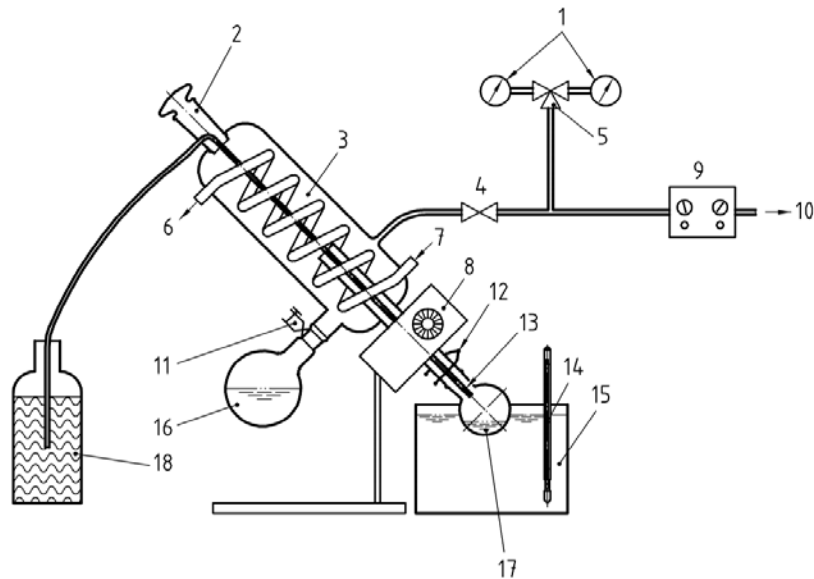
4.1.2 Rotationsverdampfer (EN 12697-3)

Ein Rotationsverdampfer ist ein speziell entwickeltes Laborgerät, das man im chemischen Labor zum schonenden Eindampfen von Lösungsmitteln verwendet (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: Rotationsverdampfer

Die Hauptbestandteile eines Rotationsverdampfers sind ein Heizbad, ein Dampfrohr mit Normschliff, an dessen unterem Ende der Verdampferkolben befestigt wird, einem Kühler mit Vakuumansatz und einem Auffangkolben auch Vorlage genannt (siehe Abbildung 25).



Legende

1	Vakuummeter	11	Schraubklemme
2	Einlasshahn	12	Quetschklemme
3	Kühler	13	Entnahmeröhrchen (Ende bis etwa 1/3 in den Kolben hineinreichend)
4	Zusätzlicher Lufteinlass	14	Temperaturmesser
5	Umschaltventil	15	Ölbad
6	Wasserablass	16	Vorlage
7	Wassereinlass	17	Rotierender Destillationskolben
8	Antriebsmotor für die Rotation	18	Bitumenlösung
9	Vakuumregler		
10	Zur Vakuumpumpe		

Abbildung 25: Schema eines typischen Rotationsverdampfers [28]

Das drehbar gelagerte Dampfrohr wird an seinem oberen Ende durch eine Wellendichtung in den Kühler geführt. Die Wellendichtung dient zur Abdichtung des rotierenden Dampfrohrs gegen den Atmosphärendruck und sorgt so für die Aufrechterhaltung des Vakuums im Inneren der Apparatur. Die notwendige Wärme für die Destillation vom Lösungsmittel wird über ein Heizbad zugeführt, in das der Verdampferkolben mittels der Höhenverstellung eingetaucht werden kann. Das Antriebsaggregat sorgt für eine gleichmäßige Rotation des Verdampferkolbens, in dem sich ein dünner Lösungsmittelfilm an der Kolbeninnenfläche bildet, was eine höhere Verdampfungsrate zur Folge hat. Die Rotation bewirkt auch ein gleichmäßiges Durchmischen der Probe und verhindert dadurch eine stationäre Überhitzung im Kolben. Das Heizbad kann sowohl mit Wasser, als auch mit Öl zwecks Erreichens höherer Arbeitstemperaturen gefüllt werden (bei Bitumen: Öl). Es besteht außerdem die Möglichkeit, mittels einer Pumpe die Apparatur zu evakuieren, d.h. den Innendruck abzusenken. Der Lösungsmitteldampf strömt in die Kondensationszone des Rotationsverdampfers, dem Kühler. Hier wird die Energie, die im Lösungsmitteldampf ist, an das Kühlmedium (meistens Wasser) abgegeben, und das Lösungsmittel kondensiert. Durch die Schwerkraft fließt nun

das auskondensierte Lösungsmittel in den Auffangkolben. Eine Abtrennung von Stoffen wird dadurch erreicht, dass sich deren Siedepunkte unterscheiden; also dass bei einer gegebenen Temperatur bestimmte Stoffe verdampfen und andere (noch) nicht. Das Vakuum dient zur Senkung der Siedetemperatur und somit der Leistungssteigerung der Destillation, d.h. höhersiedende Lösungsmittel bei geringerer Temperatur verdampft werden können, als es bei Normaldruck der Fall wäre. Dies ist wichtig, wenn die im Lösungsmittel enthaltene Substanz, die bei diesem Vorgang ja vom Lösungsmittel befreit werden soll, temperaturempfindlich ist. Durch das Arbeiten bei geringerer Siedetemperatur kann eine Zersetzung verhindert werden. In Tabelle 8 sind die Normbedingungen für verschiedene Lösungsmittel aufgelistet. [28], [29], [30]

Tabelle 8: Destillationsbedingungen verschiedenes Lösemittels nach EN 12697-3 [28], [34]

Lösemittel		Erste Phase		Zweite Phase		Extra
Beschreibung	Siedepunkt [°C]	Temperatur T ₁ [°C]	Druck P ₁ [kPa]	Temperatur T ₂ [°C]	Druck P ₂ [kPa]	Temperatur T ₃ [°C]
Dichlormethan	40,0	45	85	150	1,3	175
1.1.1- Trichlorethan	74,1	80	30	160	2,0	185
Benzen	80,1	80	30	160	2,0	185
Trichlorethylen	87,0	90	40	160	2,0	185
Xylen	140,0	120	30	180	2,0	205
Toluol	110,6	110	40	160	2,0	185
Tetrachlorethylen	121,0	110	40	160	2,0	180
Caprylsäuremethylester	<200,0	100	18-22	165-175	5±1	-

Angewendete Bedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **Heidolph, LABOROTA 4000 efficient**
- (2) Destillationsprogramm:
 - 1. Phase: 110 °C /30 kPa
 - 2. Phase: 160 °C /2 kPa (15 Min)
 - 3. Phase: 180 °C /2 kPa (15 Min)
- (3) Drehzahl: 60 U/min^{*)}
- (4) Ölbad: Rapsöl
- (5) Verdampferkolben: 2 l^{*)}

Die mit ^{*)} bezeichneten Bedingungen entsprechen nicht der EN 12697-3 [28], damit die Destillation schneller durchgeführt werden kann. Nach Norm ist die Drehzahl 75±15 U/min und der Verdampferkolben hat ein Volumen von 1 l.

4.2 Konventionelle Prüfmethode

Bei den konventionellen Prüfmethode werden die Bitumenproben mittels verschiedener Tests (z.B. Erweichungspunkt Ring & Kugel, Nadelpenetration, Brechpunkt nach Fraaß und Elastische Rückstellung) untersucht. Sie sind einfach, kostengünstig und bieten eine schnelle Möglichkeit zur Bitumenklassifizierung. Der Aussageschwerpunkt der Prüfergebnisse liegt vorwiegend auf dem Gebiet der Sortenabgrenzung und Reinheit. Nachteil dieser Methoden ist, dass die direkte Übertragung auf die Praxis mit Bestimmung der physikalischen Kenngrößen wie Steifigkeiten oder Festigkeiten nicht möglich ist, deshalb werden sie auch als empirische Konventions-Verfahren bezeichnet.

4.2.1 Erweichungspunkt Ring & Kugel (EN 1427)

Der Erweichungspunkt Ring & Kugel (Gerät siehe Abbildung 26 links) ermittelt die Temperatur, bei der das Bitumen eine bestimmte Verformung bei einer gleichmäßigen Erwärmung erfährt und gibt eine Information über den oberen Bereich der Gebrauchspanne.

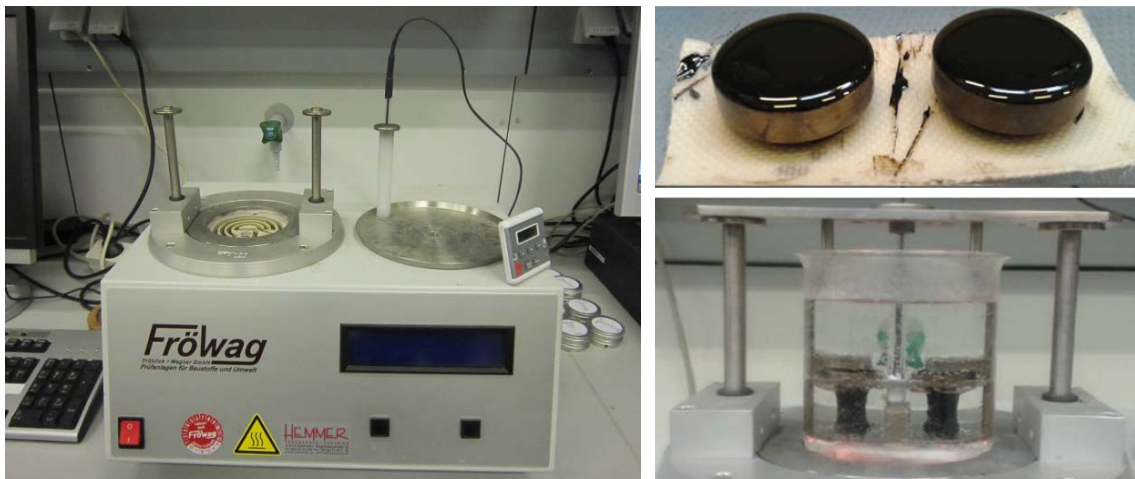


Abbildung 26: links: Ring & Kugel Automat, rechts oben: Messingringe, rechts unten: Bitumensack

Versuchsvorbereitung:

Das Bitumen wird in auf 180 °C aufgeheizte Messingringe (siehe Abbildung 26 rechts oben) eingegossen, nach 30 Minuten Abkühlung bei Raumtemperatur wird der Überstand abgeschnitten. Wenn der erwartete Erweichungspunkt des geprüften Bitumens zwischen 25–80 °C liegt, werden die vorbereiteten Proben und 3,50 g schwere Stahlkugeln, die zur Versuchsdurchführung benötigt werden, in den Kühlschrank gelegt um auf 5 °C zu temperieren. Nach etwa 1 Stunde wird der Versuch in einem Flüssigkeitsbad aus Wasser bei einer Starttemperatur von 5 °C durchgeführt. Liegt der Erweichungspunkt über 80 °C liegt wird Glycerol statt Wasser verwendet. Die Anfangstemperatur beträgt dann 25 °C statt 5 °C.

Versuchsdurchführung:

Im Laufe des Versuchs wird die Temperatur mit 5 K/min gesteigert. Die Bitumenschicht bildet in Folge der Erwärmung und der auf die Stahlkugeln wirkenden Schwerkraft einen Bitumensack aus (siehe Abbildung 26 rechts unten). Wenn die Probe sich um eine Länge von 1 Zoll (entspricht 2,54 cm) nach unten verformt hat, ist der Versuch zu Ende und die entsprechende Temperatur wird festgehalten bzw. vom Gerät automatisch aufgezeichnet (siehe Abbildung 27).

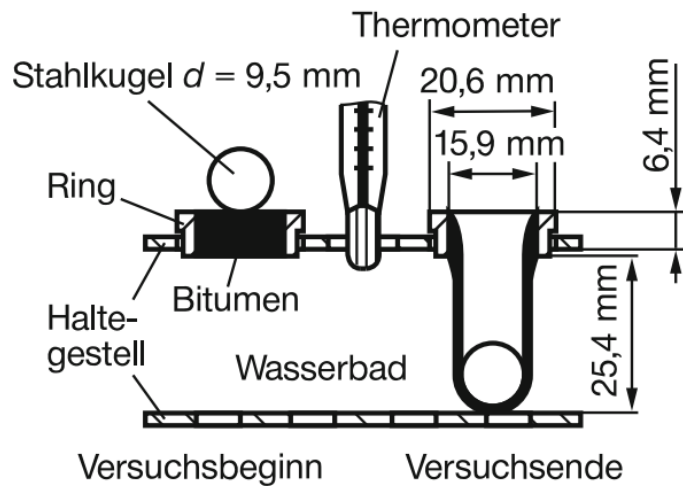


Abbildung 27: Messprinzip für Erweichungspunkt Ring und Kugel [17]

Prüfbedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **FRÖWAG Ring und Kugelautomat 1.640**
- (2) Temperatur: beginnend bei 5 °C (Wasser) bzw. 25 °C (Glycerol), Steigerung 5 K/min.
- (3) Belastung durch 3,5 g Stahlkugel
- (4) Bitumenmenge: 2x 3 g = 6 g

Prüfresultat(se): Erweichungspunkt Ring & Kugel [°C]

Je größer der Erweichungspunkt Ring & Kugel ist, desto härter ist das Bitumen.

4.2.2 Nadelpenetration (EN 1426)

Die Nadelpenetration ist ein konventionelles Prüfverfahren für die Bitumenkonsistenz, ausgedrückt als Wegstrecke in Zehntelmillimeter (1/10 mm). Mit den ermittelten Werten kann die „Härte“ eines Bitumens bestimmt und die Bitumenklassifizierung durchgeführt werden.



Abbildung 28: links: Nadelpenetrometer, rechts: Penetrationsnadel und -tiegel

Versuchsvorbereitung:

Die Untersuchungsprobe (100 g) wird in einen Tiegel gegossen, mit einem Becherglas abgedeckt und bei Raumtemperatur für eine Stunde abgekühlt. Danach ist die Probe wieder für eine Stunde in einem temperaturkonstanten Wasserbad auf 25 °C zu temperieren (siehe Abbildung 28).

Versuchsdurchführung:

Bei der Prüfungsdurchführung wird das Bitumen mit der Gesamtbelastung von 100 g (2,5 g Nadel und 97,5 g Halterung) über 5 Sekunden belastet (siehe Abbildung 29). Es sind mindestens zwei gültige Eindringungen durchzuführen, die mindestens 10 mm vom Rand des Tiegels und 10 mm voneinander entfernt sein müssen. Die Bitumensorte 70/100 sagt aus, dass ein Bitumen eine Nadelpenetration zwischen 70 und 100 Zentelmillimeter aufweisen muss, um die entsprechende Anforderung der Spezifikation zu erfüllen.

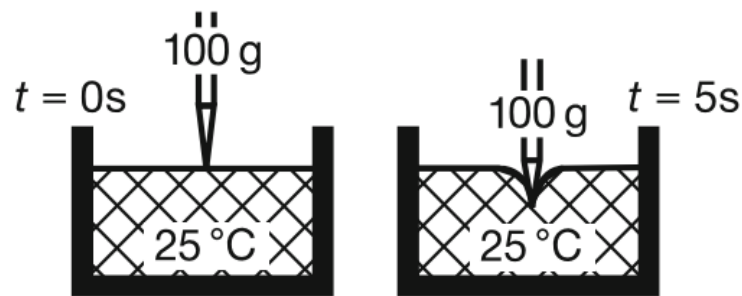


Abbildung 29: Messprinzip für Nadelpenetration [1]

Prüfbedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **FRÖWAG Nadelpenetrometer Typ 1.571**
- (2) Prüfnadel: 100 g
- (3) Temperierung: 1 Stunde abkühlen im Tiegel, 1 Stunde im Wasserbad bei 25 °C
- (4) Belastungsdauer: 5 Sekunden
- (5) Bitumenmenge: 100 g

Prüfresultat(se): Eindringtiefe [1/10 mm]

Je geringer die Eindringtiefe ist, desto härter ist das Bitumen.

Je älter das Bitumen ist, desto geringer ist Eindringtiefe.

4.2.3 Brechpunkt nach Fraaß (EN 12593)

Der Brechpunkt nach Fraaß (siehe Abbildung 30 links) ermittelt den Übergang vom zähplastischen zum spröden Zustand, d.h. den unteren Bereich der Plastizitätsspanne.

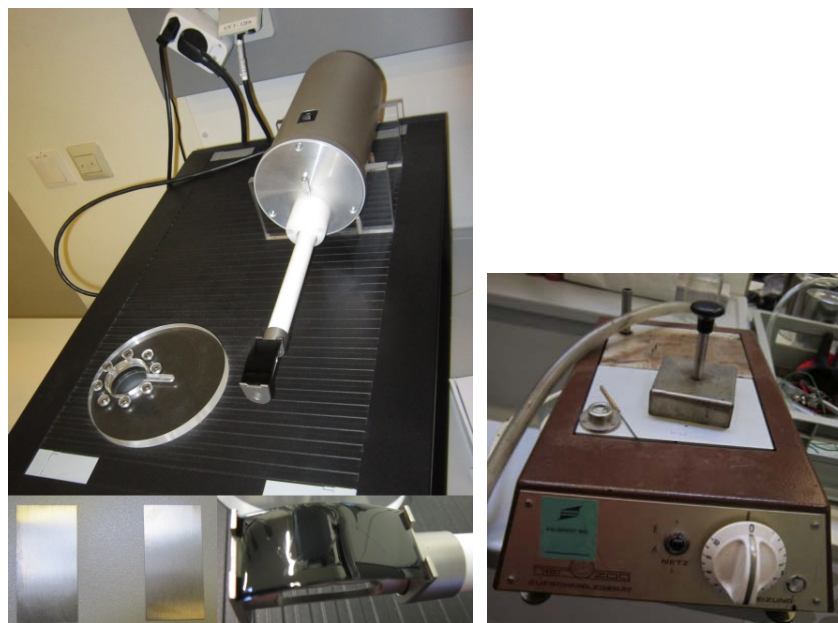


Abbildung 30: links: Brechpunktautomat und Metallplättchen, rechts: Aufschmelzgerät

Versuchsvorbereitung:

Der Probenauftrag kann auf 2 verschiedenen Varianten durchgeführt werden:

(1) Schmelzflüssiger Probenauftrag

0,41±0,01 g Bitumen werden auf ein 41x21x0,15 mm Metallplättchen eingewogen und dann auf einem Aufschmelzgerät (siehe Abbildung 30 rechts), dessen Temperatur so einzustellen ist, dass der Erweichungspunkt Ring & Kugel des Bitumens um nicht mehr als 80 °C (Die Temperatur bei PmB ist unabhängig von Erweichungspunkt und darf nicht mehr als 200 °C sein.) überschritten wird, aufgelegt. Durch Hin- und Herneigen verteilt sich eine gleichmäßig dünne Bitumenschicht auf dem Blech bis man eine glatte Oberfläche bekommt.

(2) Probenauftrag mit Presse

2 g Bitumen sind zwischen zwei Trennfolien aufzubringen. Die Probe wird zwischen zwei auf 20 °C unter den Erweichungspunkt des Bitumens aufgeheizte Druckblöcke gelegt und eine Minute zusammengepresst. Nach Abkühlung auf Umgebungstemperatur wird die Probe in Eiswasser getaucht und nach zwei Minuten werden die Trennfilme entfernt. Danach wird die Kante abgeschnitten.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde der schmelzflüssige Probenauftrag verwendet.

Versuchsdurchführung:

Die Probe wird mit einer konstanten Abkühlungsgeschwindigkeit von 1 °C/min abgekühlt. Wenn die Temperatur 10±2 °C über dem zu erwartenden Brechpunkt erreicht ist, beginnt das Biegen des Prüfblechs. Es wird jene Temperatur notiert, bzw. vom Brechpunktautomaten aufgezeichnet, bei der die Bitumenschicht oder bricht. So wird die Tieftemperatur, bei der Risse im Asphalt zu erwarten sind, ermittelt. Die Abbildung 31 veranschaulicht das Messprinzip für Brechpunkt nach Fraaß.

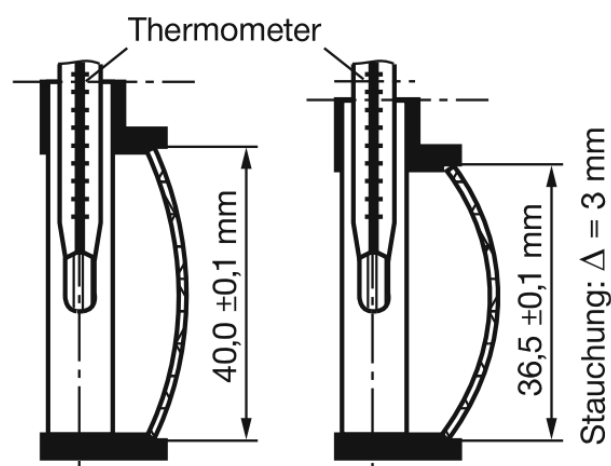


Abbildung 31: Messprinzip für Brechpunkt nach Fraaß [1]

Prüfbedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **IWS BPA (Brechpunktautomat)**
- (2) Bitumenmenge: 2x 0,41 g (2 Metallplättchen)
- (3) Biegeschwindigkeit: 1 s^{-1}
- (4) Temperatur: kontinuierliche Abkühlung mit 1 K/min.

Prüfresultat(se): Brechpunkt nach Fraaß [°C]

Je höher die Temperatur, desto härter das Bitumen.

Brechpunkt und Erweichungspunkt treten bei solchen Temperaturen auf, bei denen die Bitumen jeweils etwa vergleichbare Zähigkeiten aufweisen. Zwischen den beiden Übergängen zeigen die Bitumen ein zähplastisches Verhalten. Die Temperaturdifferenz zwischen Erweichungspunkt Ring & Kugel und Brechpunkt nach Fraaß wird als Plastizitätsspanne (auch Gebrauchsspanne genannt) bezeichnet:

$$\text{Plastizitätsspanne} = T_{EP \text{ RUK}} - T_{BP}$$

Gleichung 15, [17]

Je größer die Plastizitätsspanne ist, desto weniger reagiert das Bindemittel auf Temperaturänderungen.

4.2.4 Elastische Rückstellung (EN 13398)

Die elastische Rückstellung dient zur Feststellung ob Elastomere/Polymere enthalten sind. Der Versuch wird mit Hilfe eines Duktilometers (siehe Abbildung 32) durchgeführt.



Abbildung 32: Duktilometer

Versuchsvorbereitung:

2x20 g Bitumen wird in Formen gegossen (siehe Abbildung 33), dann werden die Probekörper für die Dauer von 1 Stunde bei Raumtemperatur abgekühlt und mit einer heißen Spachtel abgeschnitten. Danach werden die Proben für 1 Stunde in einem Wasserbad bei 25 °C (siehe Abbildung 32) gelagert.



Abbildung 33: Proben

Versuchsdurchführung:

Nach dieser 1 Stunde wird das Bitumen ausgeformt und in die Zugplatten eingebaut. Das Bitumen wird auf 20 cm mit einer Geschwindigkeit von $50 \pm 2,5$ mm/min ausgezogen. Dann werden alle Proben innerhalb von 10 Sekunden in der Mitte des Bitumenfadens durchgeschnitten. Nach 30 Minuten wird der lichte Abstand zwischen den Fadenenden gemessen (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35).

$$R_E [\%] = \frac{d}{L} \times 100$$

Gleichung 16, nach EN 13398 [38]

Dabei ist:

- RE.....die elastische Rückstellung, [%]
- D.....der Abstand zwischen den Halbfäden, [mm]
- L.....die Auszugslänge (hier 200 mm), [mm]

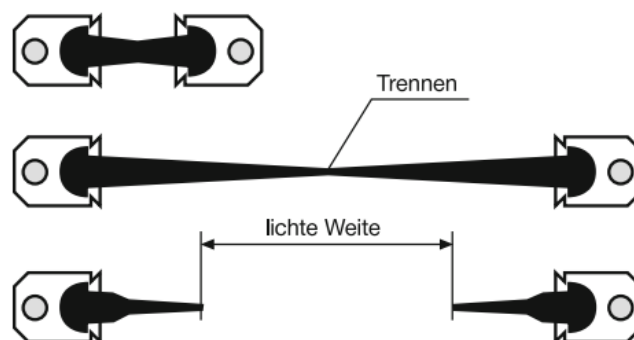


Abbildung 34: Messprinzip für die elastische Rückstellung [1]



Abbildung 35: Formen nach der Versuchsdurchführung

Prüfbedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **BUEHL+FAUBEL**
- (2) Bitumenmenge: 2x 20 g = 40 g (für 2 Formen)
- (3) Belastung: Zugbelastung durch Ausziehen, $50 \pm 2,5$ mm/min
- (4) Temperatur: 25 °C

Prüfresultat(se): Elastische Rückstellung [%]

4.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode

Die Anforderungen an die im Straßenbau verwendeten Bitumen werden wegen der zunehmenden Verkehrsbelastung immer höher. Deswegen werden zusätzlich zu den konventionellen Prüfmethode auch anwendungsbezogene Parameter untersucht, um die Gebrauchseigenschaften von Bitumen in der Praxis noch besser beurteilen zu können. Das wird durch die gebrauchsvorhaltensorientierten Prüfverfahren (GVO): Rotational Viscometer, Dynamic Shear Rheometer und Bending Beam Rheometer möglich. Sie wurden im Rahmen des US-amerikanischen Straßenforschungsprogrammes SHRP (Strategic Highway Research Program) unter dem Namen SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVements) entwickelt.

4.3.1 Rotational Viscometer RV (EN 13302)

Ein Rotational Viscometer (siehe Abbildung 36 links) misst die dynamische Bitumenviskosität und besteht aus einem coaxialen Zylindersystem mit einem stillstehenden äußeren Zylinder (Aluminiumhülse) und einem rotierenden inneren Zylinder (Spindel) (siehe Abbildung 36 rechts). Die Spindeldrehzahl ist mit 20 Umdrehungen pro Minute vorgegeben. Es wird das notwendige Drehmoment für das Rotieren der Spindel gemessen.



Abbildung 36: links: Rotational Viscometer, rechts: Aluminiumhülse und Spindeln

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem aufgetragenen Drehmoment und der dynamischen Viskosität:

$$\eta = \frac{M_d}{\omega} \cdot \frac{A}{M}$$

Gleichung 17, nach [17]

Dabei sind:

ηdynamische Viskosität, [Pa.s]

M_dDrehmoment, [Nm]

ωWinkelgeschwindigkeit der Spindel, [rad/s]

AFormfaktor, der von der Form der Spindel abhängig ist, [m⁻³]

MGeometriefaktor, der vom Radius der Spindel (=Rotor) und dem Radius des Bechers (=Stator) abhängig ist, [1/rad]

Die Schemaskizze eines Rotational Viscometers wird in Abbildung 37 dargestellt.

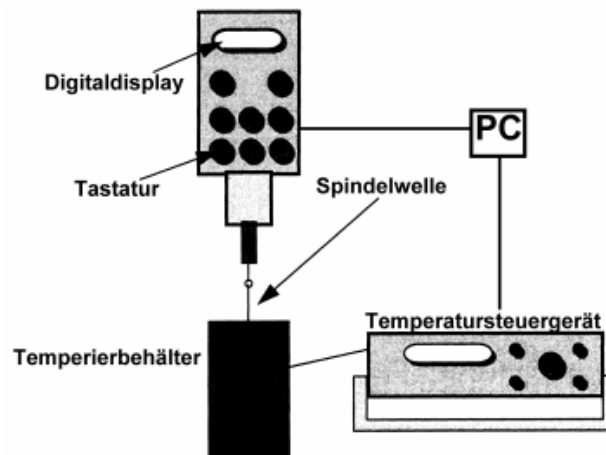


Abbildung 37: Schemaskizze eines Rotational Viscometers [17]

Versuchsvorbereitung:

Eine homogenisierte Bitumenmenge, die von der Größe der Spindel abhängig ist, wird in den Messbecher (Aluminiumhülse) gefüllt. Zwei Spindelgrößen: die große Spindel (SC4-21) für ungealtertes und die kleine Spindel (SC4-27) für kurzzeit- und langzeitgealtertes Bitumen, werden angewendet. Je kleiner die Spindel, desto größer ist der Spalt zwischen Spindel und Aluminiumhülse und desto geringer die Scherkraft und das in weiterer Folge vom Viscometer aufzubringende Drehmoment. Da die unterschiedlich großen Spindeln nicht gleich viel Bitumen verdrängen und die Bitumenfüllhöhe ein definiertes Maß erreichen muss, werden die Aluminiumhülsen mit unterschiedlich viel Bitumen befüllt. Die Messung erfolgte mit jeweils 8,0 g bei der großen und 10,5 g bei der kleiner Spindel. [12]

Das Viscometer und der Temperierbehälter werden waagrecht eingestellt, dann wird die Aluminiumhülse (mit Bitumen) in den Temperierbehälter gesteckt (siehe Abbildung 38). Die Spindel wird an der Spindelwelle befestigt und über eine Höhenverstellungsschraube in das Bitumen eingetaucht. Damit die Spindel nicht zu weit in das Bindemittel eintaucht, ist ein Anschlag am Viscometer vorhanden. Um eine gleichmäßige Temperierung der gesamten Probe, der Spindel und der Aluhülse zu gewährleisten, wird die Spindel vor dem eigentlichen Messvorgang mit 20 U/min für eine Dauer von 15 Minuten in Drehung versetzt. Dieser

Vorgang dient außerdem der Probenhomogenisierung. Während dieser Zeit sollte die prozentuelle Auslastung der Torsionsfeder, die zum Messen des Drehmomentes im Viscometer eingebaut ist, anhand des Displays überprüft werden. Je nach Herstellerangaben sollte diese Auslastung in einem bestimmten Bereich (etwa. 10-90 %) liegen, da hier das Drehmoment am genauesten gemessen werden kann. Sollte die Auslastung zu gering sein, müsste eine größere Spindel (= höhere Scherrate = mehr Drehmoment notwendig) verwendet werden. Bei zu hoher Auslastung muss umgekehrt eine kleinere Spindel verwendet werden. [17]

Es wird eine Begrenzung von 3000 mPa*s bei einer Temperatur von 135 °C nach SUPERPAVE eingesetzt, die die Zähigkeit des Bitumens nach oben limitiert, damit die Verarbeitbarkeit garantiert wird. Wenn die dynamische Viskosität zu hoch ist, führt das zum hohen Energieeinsatz beim Pumpen und zur Gefahr der schlechten Mischbarkeit mit Gestein.

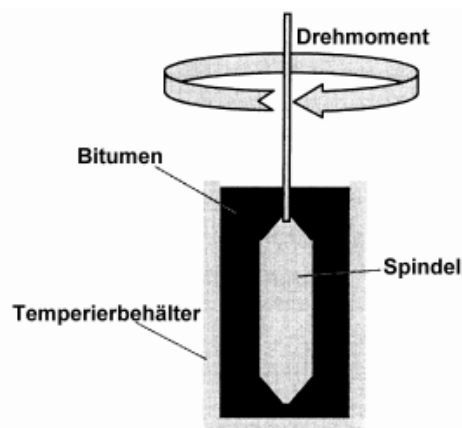


Abbildung 38: Prinzipskizze von Messensor für Rotational Viscometer [17]

Versuchsdurchführung:

Nach der Temperierzeit von 15 Minuten beginnt die Messung der Viskosität im Temperaturbereich von 120 °C bis 180 °C. Für die SHRP-Bitumenklassifizierung allein ist nur eine Viskositätsmessung 135 °C notwendig. Soll die Bitumenprüfung aber auch für eine Asphaltprüfung nach SHRP verwendet werden, ist es notwendig, die Viskosität bei verschiedenen Temperaturen zu messen, um daraus eine Temperatur-Viskositätskurve ermitteln zu können. Anhand dieser Kurve kann die Mischtemperatur bzw. die Verdichtungstemperatur für den Gyrator-Versuch (Verdichtungsversuch) abgelesen werden.

Prüfbedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **BROOKFIELD DV-III Programmable Rheometer**
- (2) Bitumenmenge: 8,0 bzw. 10,5 g abhängig von Spindelgröße
- (3) Temperierzeit: 15 Minuten
- (4) Temperatur: 120 °C bis 180 °C in 15 K Schritten
- (5) Drehzahl: 20 U/min.

Prüfresultat(se): Grenzwert SUPERPAVE (siehe Angang) < 3 000 [mPa*s]
dynamische Viskosität [mPa*s]

Je höher die dynamische Viskosität (bei einer definierten Temperatur) ist, desto härter ist das Bitumen.

4.3.2 Dynamic Shear Rheometer DSR (EN 14770)

Bei hohen Temperaturen muss Bitumen steif und elastisch sein, um Spurrinnen zu vermeiden. Bei tiefen Temperaturen muss es sowohl leicht verformbar als auch ausreichend elastisch sein, um Ermüdungsrisse zu vermeiden. Der komplexe Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenverschiebungswinkel δ (=Verlustwinkel, auch Phasenwinkel genannt) drücken diese Eigenschaften aus. Der Dynamic Shear Rheometer (siehe Abbildung 39 links) ermittelt die beiden Komponenten. Diese Prüfmethode ist ein Oszillationsversuch, der auch „Mehr-Punkt-Messung“ genannt wird.

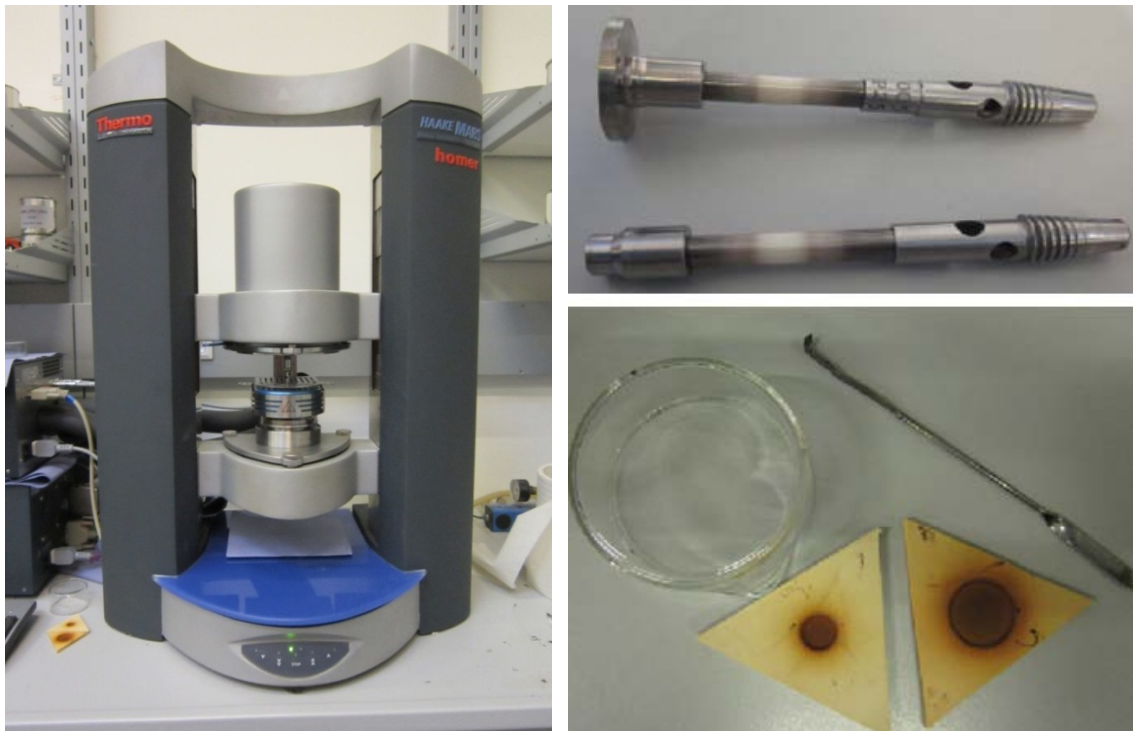


Abbildung 39: links: Dynamic Shear Rheometer, rechts oben: Messköpfe, rechts unten: Silikongummiformen und Spachtel

Der DSR besteht aus dem Rheometer mit Peltier-Element Temperierung und Messplatten mit verschiedenen Größen - „PP08“ und „PP25“ (siehe Abbildung 39 rechts oben). Die Buchstaben „PP“ bedeuten Platte-Platte-Messsystem (siehe Abbildung 40). Während sich die obere Platte oszillierend bewegt, steht die untere Platte still und das zwischen den beiden Platten eingespannte Bitumen wird deformiert. Die Zahl bezeichnet jeweils den

Durchmesser der oberen Platte in Millimeter. Die Messsensoren des Rheometers werden ebenfalls auf Messtemperatur temperiert.

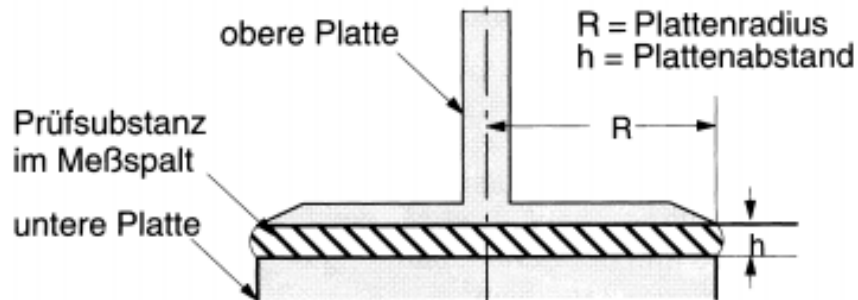


Abbildung 40: Platte-Platte Messsystem [17]

Versuchsvorbereitung:

Das Bitumen wird erwärmt, homogenisiert und in eine Silikonform (siehe Abbildung 39 rechts unten) gegossen. Dann wird es bei Raumtemperatur abgekühlt. Nach der Abkühlung wird die Probe zwischen den beiden Platten eingelegt, der Spalt zwischen den Platten wird auf 2,05 mm bei PP08 (bzw. 1,05 mm bei PP25) eingestellt, der Überstand wird abgeschnitten (siehe Abbildung 41). Dann wird der Messspalt auf 2 mm (bzw. 1 mm) korrigiert. Dabei bildet sich ein kleiner Wulst, der Randeffekte durch das Abschneiden vermeiden soll. Die Platten werden auf entsprechende Anfangstemperatur von -10 °C (bzw. 30 °C) temperiert und der Versuch beginnt.

Versuchsdurchführung:

Damit einerseits ein größerer Temperatur-, als auch Frequenzbereich abgedeckt wird und andererseits eine größere Datenbasis geschaffen wird, werden die Versuche mit einem Frequenzsweep von 0,1 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz in den Temperaturbereichen von -10 °C bis 40 °C und von 30 °C bis 80 °C in 10 K Schritten durchgeführt.



Abbildung 41: Versuchsvorbereitung

Die Abbildung 42 zeigt einen Oszillationszyklus mit den Punktfolge A-B-A-C-A.

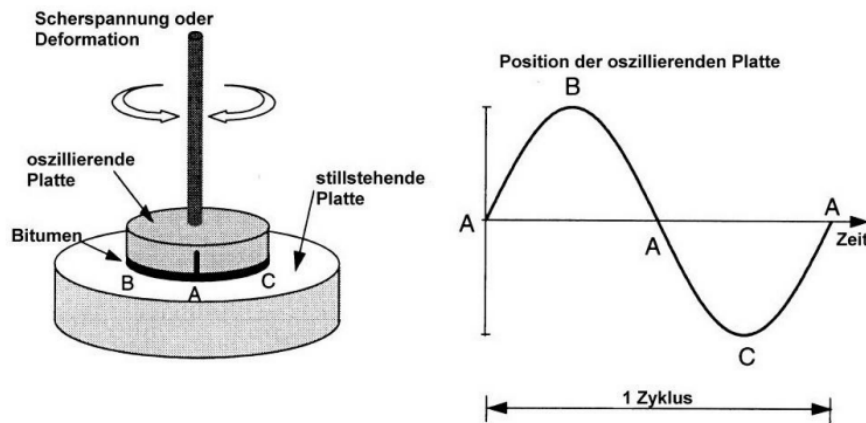


Abbildung 42: Oszillationszyklus [17]

Der komplexe Schubmodul $|G^*|$ gibt Auskunft über jene Spannung, die notwendig ist, um eine bestimmte Deformation zu erreichen oder die bei einer vorgegebenen Deformation auftritt. Entsprechend wird in CS-Rheometer (Controlled Stress \rightarrow Spannungsvorgabe und Deformationsmessung) und CD-Rheometer (Controlled Deformation \rightarrow Deformationsvorgabe und Spannungsmessung) unterschieden. Wenn der Schubmodul $|G^*|$ groß ist, ist die Probe schwer verformbar, ist er niedrig, dann verformt sie sich leicht.

Die Berechnung des komplexen Schubmoduls erfolgt nach folgender Formel:

$$|G^*| = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad \text{Gleichung 18, [17]}$$

Dabei sind:

- $|G^*|$komplexer Schubmodul, [Pa]
- τ_{\max}Schubspannung, [Pa]
- γ_{\max}Deformation, []

Zur Bestimmung des komplexen Schubmoduls sind die folgenden Größen notwendig: die Schubspannung und die Schubdeformation. Die Schubspannung wird durch

$$\tau_{\max} = \frac{2 \cdot M_{\max}}{2 \cdot r^3} \quad \text{Gleichung 19, [17]}$$

ermittelt.

Dabei sind:

- τ_{\max}Schubspannung, [Pa]
- M_{\max}maximales Drehmoment, [Nm]
- RRadius Messplatte, [m]

Die Deformation wird als Funktion vom Verdrehwinkel bestimmt:

$$\gamma_{\max} = \frac{\alpha_{\max} \cdot r}{h} \quad \text{Gleichung 20, [17]}$$

Dabei sind:

- γ_{\max}Deformation, []
- α_{\max}Verdrehwinkel, [rad]
- rRadius Messplatte, [m]
- hMessspalt, [m]

Die Deformation ist beim Platte-Platte-Messsystem auf folgender Weise berechnet:

$$\gamma = \frac{s}{h} \cdot 100 \text{ [%]} \quad \text{Gleichung 21, [17]}$$

Dabei sind:

- γDeformation, [%]
- sAuslenkung am äußersten Umfang der Messplatte, [mm]
- hSpalt zwischen unterer Platte und Messplatte, [mm]

Eine durch die oszillierende Bewegung aufgebrachte Schubspannung verursacht eine Deformation der Probe, das Material „antwortet“. Abhängig vom Verlauf der Schubspannung im Vergleich zum Verlauf der Deformation (siehe Abbildung 43) lassen sich zwei Extremsituationen unterscheiden:

- (1) Ideal elastisches Verhalten nach HOOKE
- (2) Ideal viskoses Verhalten nach NEWTON

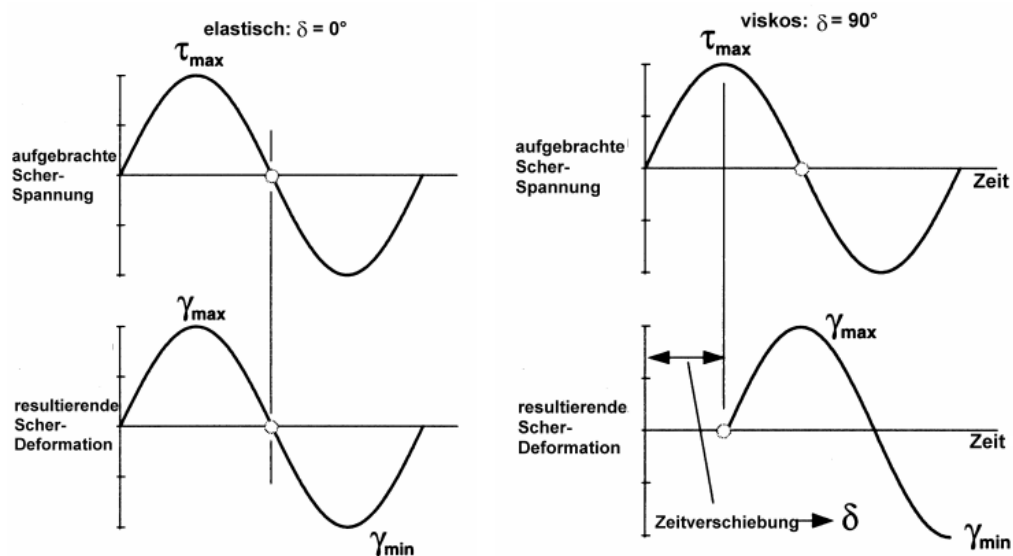


Abbildung 43: Verlauf von Spannung und Deformation beim elastischen (links) und viskosen (rechts) Verhalten [17]

Einerseits befinden sich Schubspannung und Deformation bei ideal elastischem Verhalten in direktem Zusammenhang, andererseits aber stehen sie beim ideal viskosen Verhalten in indirektem Zusammenhang – es gibt eine Zeitverschiebung. Diese Zeitverschiebung wird durch den sogenannten Phasenverschiebungswinkel δ (auch Phasenwinkel genannt) ausgedrückt. Er gibt Information darüber, ob sich eine Substanz eher elastisch oder eher viskos verhält. Ein Phasenverschiebungswinkel von 0° entspricht dabei ideal elastischem, ein Phasenverschiebungswinkel von 90° ideal viskosem Verhalten. Dazwischen befindet sich der für Bitumen gebrauchtsrelevante visko-elastische Bereich wie in Abbildung 44 dargestellt.

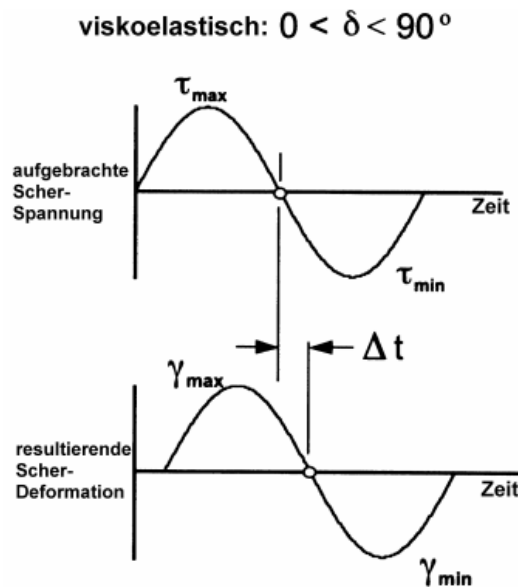


Abbildung 44: Verlauf von Spannung und Deformation bei visko-elastischem Verhalten [17]

Der Phasenverschiebungswinkel δ wird wie folgt berechnet:

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360^\circ \quad \text{Gleichung 22, [17]}$$

Dabei sind:

- δPhasenverschiebungswinkel, [$^\circ$]
- ΔtZeitverschiebung zwischen τ_{\max} und γ_{\max} , [s]
- tZeit für eine Schwingung, [s]

mit

$$t = \frac{1}{f} \quad \text{Gleichung 23, [17]}$$

wobei:

- fFrequenz, [Hz]

Die Abbildung 45 stellt die Aufteilung vom komplexen Schubmodul $|G^*|$ mit Hilfe des Phasenverschiebungswinkel δ in einen elastischen und in einen viskosen Anteil dar. Der elastische Anteil G' wird auch als Speichermodul oder Realteil von $|G^*|$ und der viskose Anteil G'' als Verlustmodul oder Imaginärteil von $|G^*|$ bezeichnet. Diese zwei unterschiedlichen Materialien besitzen den gleich großen komplexen Schubmodul und haben dabei jeweils andere elastische bzw. viskose Eigenschaften. [12]

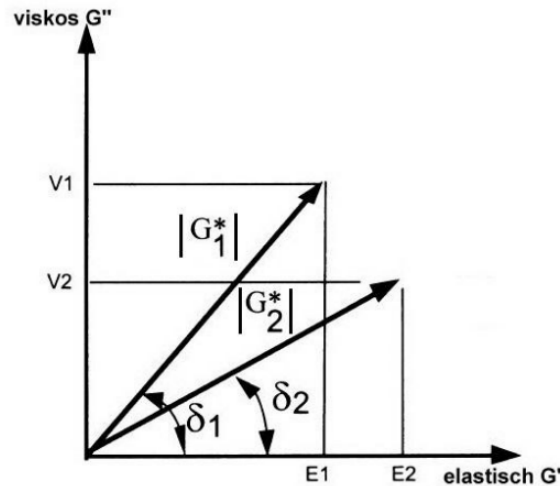


Abbildung 45: Phasenverschiebungswinkel [17]

wobei nach Pythagoras gilt:

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad \text{Gleichung 24, [17]}$$

Die beiden Anteile lassen sich nach folgenden Formeln abgeleitet:

$$G' = |G^*| \cdot \cos\delta \quad \text{Gleichung 25, [17]}$$

$$G'' = |G^*| \cdot \sin\delta \quad \text{Gleichung 26, [17]}$$

Dabei sind:

G' elastischer Anteil, [Pa]

G'' viskoser Anteil, [Pa]

δPhasenverschiebungswinkel, [°]

Prüfbedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **Thermo Scientific, HAAKE MARS II Modular Rheometer**
- (2) Temperatursweep: -10 bis 40 °C und 30 bis 80 °C in 10 K Schritten
- (3) Frequenzsweep: 0,1 Hz; 1 Hz; 3 Hz; 5 Hz; 10 Hz
- (4) Messgeometrie: PP08 und PP25
- (5) Bitumenspalt: 2 mm bei PP08 und 1 mm bei PP25

Prüfergebnis(se):

- Komplexer Schubmodul $|G^*|$ [Pa]
- Phasenverschiebungswinkel δ [°]

Je höher der komplexe Schubmodul, desto höher der Widerstand gegen Verformungen.

Je höher der Phasenverschiebungswinkel, desto viskoser reagiert das Bitumen.

4.3.3 Bending Beam Rheometer BBR (EN 14771)

Das Bending Beam Rheometer (siehe Abbildung 46 links) ist wie der Brechpunkt nach Fraaß ein Versuch für den Tieftemperaturbereich. Wie schon in Kapitel 2.9 erwähnt, wird es verwendet, um einen 3-Punktbiegeversuch an einem Bitumen- bzw. Mastixbalken durchzuführen um seine Biegekriechsteifigkeit und Relaxationsfähigkeit nach 60 Sekunden (S_{60}) zu ermitteln. Das Rheometer besteht aus einem Computer, einem Kryostaten, einem Ethanolbad zur Temperierung (von 0 bis -40 °C), einem Laststempel mit einem Weg- und Kraftaufnehmer und der Auflagervorrichtung für den Biegeversuch.



Abbildung 46: links: Bending Beam Rheometer, rechts: Bitumenbalkenform

Versuchsvorbereitung:

Für jeden Versuch werden zwei Biegebalken (2x 15 g) benötigt. Das Bitumen wird in vorbereiteten Formen eingegossen. Jede Form besteht aus den folgenden Teilen: 3 Aluminiumbalken, 3 Kunststofffolien, 2 Gummiringen und 2 Endstücke (siehe Abbildung 47). Die Kunststofffolien dienen zum leichteren Ausformen. Die Gummiringe sind handelsübliche O-Dichtungsringe. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wird der Überstand abgeschnitten. Danach werden die Bitumenbalken ausgeformt und in ein Ethanolbad für die Dauer von 60 Minuten gelegt. Der zweite Bitumenbalken wird 6-7 Minuten nach dem Ersten in das Ethanolbad eingelegt, da die Versuchsdurchführung mit anschließender Pufferzeit des ersten Balkens etwa diese Zeit beansprucht und sonst. Die Steifigkeit des Bitumens nimmt aufgrund des „*physical hardening*“ Effektes (siehe Kapitel 2.8) mit zunehmendem Verweilen im Ethanolbad zu und so die Messergebnisse verfälscht.

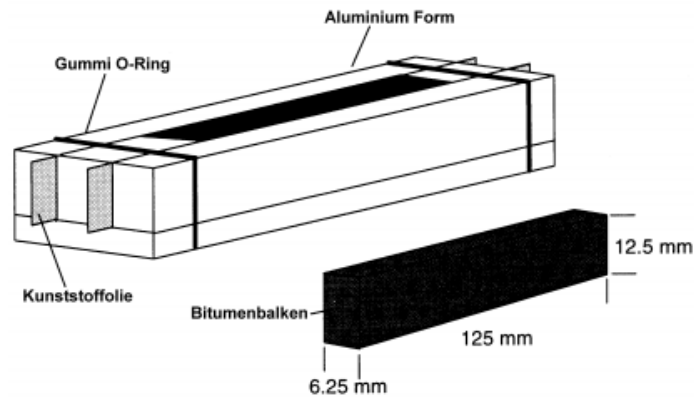


Abbildung 47: Bitumenbalkenform [17]

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die Prüfungen bei Temperaturen von -12 , -18 und -24 °C durchgeführt.

Versuchsdurchführung:

Der Bitumenbalken wird anschließend auf die Auflagerpunkte gelegt und in der Mitte mit einer konstanten Auflast von $0,981$ N für 240 Sekunden belastet (siehe Abbildung 48). Danach folgt die vollständige Entlastung. Während der Versuchsdurchführung werden die Temperatur, die Kraft und die Durchbiegung gemessen.

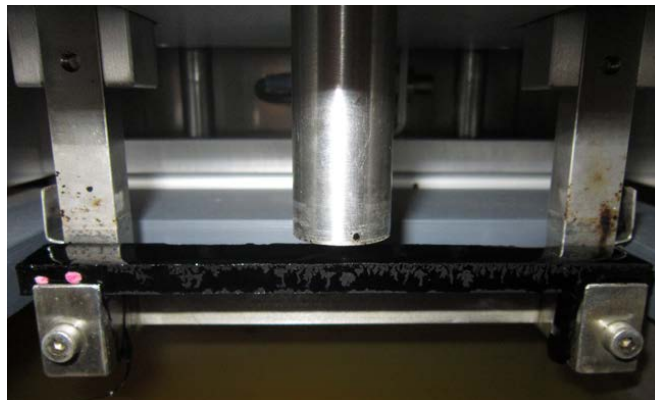


Abbildung 48: BBR Versuchsanordnung

Die Steifigkeitswerte werden für die Belastungszeiten von 8 , 15 , 30 , 60 , 120 und 240 Sekunden berechnet.

Prüfbedingungen:

- (1) Gerätehersteller, -modell: **COESFELD Materialtest Bending Beam Rheometer**
- (2) Bitumenmenge: 2×15 g
- (3) Temperierdauer: 60 Minuten (± 2 Minuten)
- (4) Temperatur: $T_{\min+10}$ °C (-12 , -18 , -24 °C)
- (5) Belastungsdauer: 60 Sekunden (240 Sekunden)
- (6) Belastung: $0,981$ N

Prüfergebnis(se):

- (1) Kriechsteifigkeit S [MPa] < 300 MPa (300 MPa $< S < 600$ MPa \Rightarrow **Direct Tension Test**)
- (2) m -Wert $[\] > 0,3$

Je geringer die Steifigkeit und je höher der m -Wert ist, desto besser ist das Tieftemperaturverhalten des aus dem Bitumen hergestellten Asphalts.

5 Ergebnisse und Interpretation

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse von konventionellen und gebrauchungsverhaltenorientierten Prüfungen interpretiert.

5.1 Unterschiede zwischen Straßenbaubitumen und PmB

Wie im Kapitel 3.1 erwähnt, haben die beiden Bitumensorten – Straßenbaubitumen 70/100 und PmB 45/80-65, denselben Ursprung. Dadurch ist ein besserer Vergleich möglich. Zur Modifizierung wurde 4,3 % SBS-Polymer hinzugefügt. Die Unterschiede zwischen 70/100 und 45/80-65 im ungealterten Zustand werden anhand der nächsten Versuchen (Elastische Rückstellung, DSR und RV) veranschaulicht.

Die elastische Rückstellung gibt Information, ob ein Bitumen mit Elastomeren modifiziert wurde und wie gut dieses das Bitumen bei 25 °C rückformt. In Abbildung 49 ist die Auswirkung der SBS-Modifizierung deutlich erkennbar. Die elastische Rückstellung von 70/100 liegt bei nur rund 13 %. Im Vergleich dazu formt sich 45/80–65 mit 92 % beinahe auf den Ausgangszustand zurück.

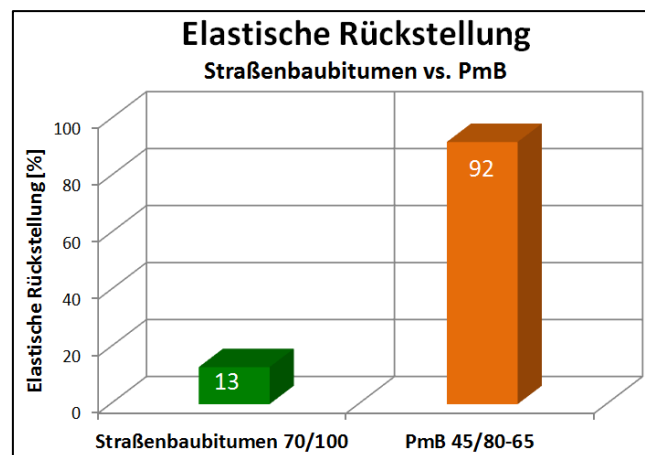


Abbildung 49: Elastische Rückstellung im Zustand A, Straßenbaubitumen vs. PmB

Anhand der Ergebnisse aus dem RV wird die Verarbeitbarkeit (Mischen, Transport, Einbau) der Bitumen beurteilt. Die folgende Abbildung 50 zeigt die dynamische Viskosität von 70/100 und 45/80-65 über einen Temperaturbereich von 120 °C bis 180 °C. Es ist erkennbar, dass die Viskosität von beiden Bitumen mit steigender Temperatur abnimmt und 45/80-65 eine etwas höhere Viskosität als 70/100 zeigt.

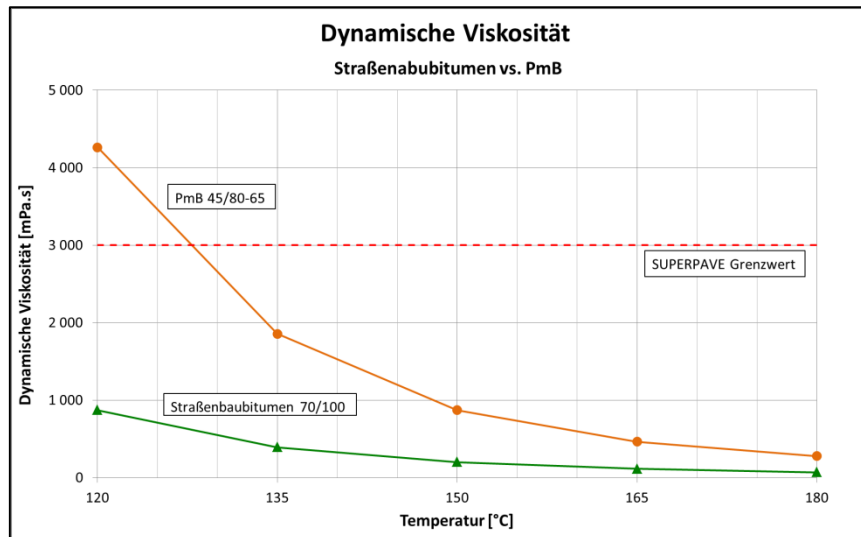


Abbildung 50: Dynamische Viskosität im Zustand A, Straßenbaubitumen vs. PmB

Mittels DSR wurden der komplexe Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenwinkel δ von 70/100 und 45/80-65 ermittelt. Die Messung erfolgte in Temperaturbereichen von -10 °C bis 40 °C und 30 °C bis 80 °C in 10 K Schritten.

In der Abbildung 51 ist der Verlauf der Messergebnisse der DSR-Versuche in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Frequenz von 1 Hz im Zustand A dargestellt. Der komplexe Schubmodul $|G^*|$ ist ein Maß für die Steifigkeit des Materials während der Phasenwinkel δ Information über den elastischen bzw. viskosen Anteil des Bindemittels gibt. Je geringer der Phasenwinkel, desto größer der elastische Anteil. Je höher der komplexe Schubmodul und je geringer der Phasenwinkel, desto günstiger ist das Verformungsverhalten des Bindemittels.

Aus der Grafik in Abbildung 51 ist ersichtlich, dass der komplexe Schubmodul von beiden Bitumenarten mit Temperaturerhöhung sinkt. Gleichzeitig nimmt der Phasenwinkel kontinuierlich zu, d.h. der elastische Anteil nimmt ab. Im Gegensatz dazu ist bei 45/80-65 ab etwa 30 °C die Ausbildung eines, für SBS-modifizierte Bitumen, typischen Plateaus ersichtlich. Ab einer Temperatur von etwa 30 °C zeigt 45/80-65 daher wegen der vernetzenden Eigenschaften des SBS höhere Steifigkeiten als 70/100. Mit Temperatursteigerung wird der Unterschied in den Steifigkeiten von beiden Bitumen größer. Die Abbildung 52 veranschaulicht die relative Veränderung von 45/80-65 Schubmoduls (links) und die absolute Veränderung von 45/80-65 Phasenwinkels im Vergleich zu 70/100 (rechts).

Die Überlappung der Ergebnisse bei 30 °C und 40 °C ist ein Resultat von beiden DSR Messprogrammen im unteren (-10 °C bis 40 °C) und oberen (30 °C bis 80 °C) Temperaturbereich mit zwei verschiedenen Messensoren (PP08, PP25).

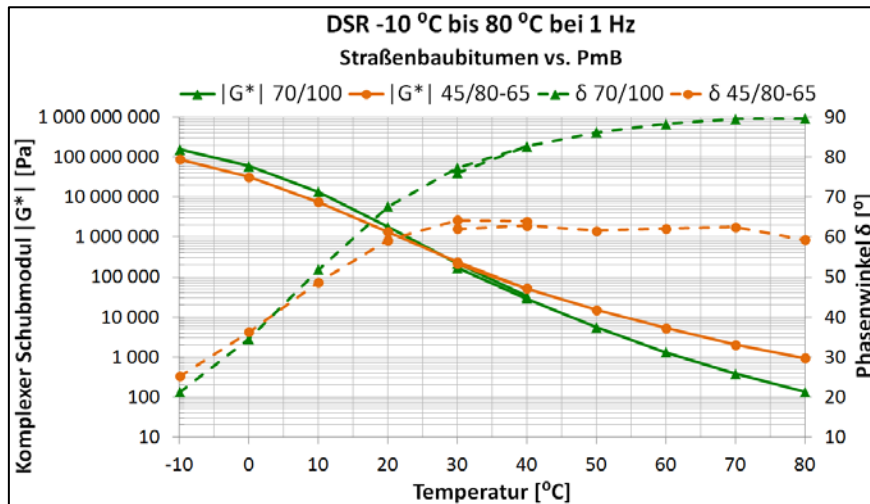


Abbildung 51: DSR von -10 °C bis 80 °C bei 1 Hz im Zustand A, Straßenbaubitumen vs. PmB

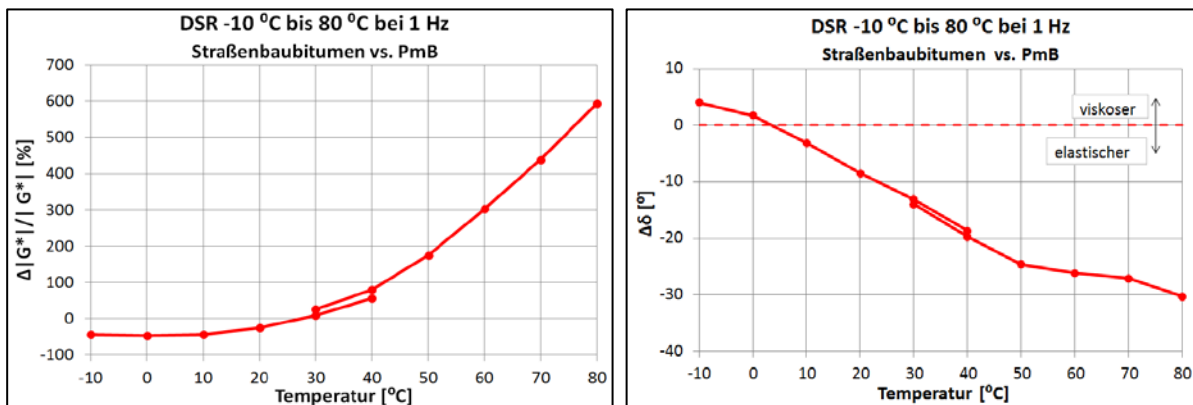


Abbildung 52: links: Relative Veränderung des PmB Schubmoduls zum 70/100, rechts: Absolute Veränderung des PmB Phasenwinkels zum 70/100

Aus den Messwerten $|G^*|$ und δ kann der für das SUPERPAVE-Schema relative Wert zur Beurteilung der Standfestigkeit und Verformbarkeit $|G^*|/\sin\delta$ errechnet werden. Je höher der Schubmodul und je geringer der Phasenwinkel, desto höher ist der Widerstand gegen Spurrinnenbildung. Als Mindestwert des Quotienten wurde im SUPERPAVE-Schema (siehe Anhang) für das Ausgangsbitumen (A-Zustand) 1,0 kPa festgelegt. Für das RTFOT-gealterte (B-Zustand) Bitumen liegt der Mindestwert bei 2,2 kPa.

In Abbildung 53 links wird ein Modell von beiden Bitumenarten im Ausgangszustand bezüglich $|G^*|/\sin\delta$ bei 1,592 Hz (entspricht 10 Rad/sek) über den Temperaturbereich von 30 bis 89 °C ausgehend von den gemessenen Frequenzen von 0,1; 1; 3; 5 und 10 Hz dargestellt. Das Berechnungsmodell ist in Kapitel 2.9 erklärt. Jene Temperatur, bei der die Kurve die Gerade des Grenzwertes schneidet, ist die für den high Performance Grade (high PG) ausschlaggebende Temperatur. In Tabelle 9 sind die abgelesenen Werte angegeben. Die mit *) bezeichneten Werte sind geschätzt. Für das verwendete 70/100 wird der SUPERPAVE-Grenzwert $|G^*|/\sin\delta$ im A-Zustand bei 67 °C und im B-Zustand bei einer Temperatur von 68 °C erreicht. Beim verwendeten 45/80-65 ist die Temperatur im A-Zustand 80 °C und im B-

Zustand beträgt sie 83 °C. Im Vergleich dazu zeigen die tatsächlich bei 1,592 Hz gemessenen Werte folgendes: das Straßenbaubitumen erweist im A-Zustand 67 °C, im B-Zustand 66 °C; das frische PmB erreicht etwa 84 °C und das Kurzzeitgealterte 82 °C. Die Ergebnisse von 70/100 und von 45/80-65 im B-Zustand gehören zur jeweils gleichen PG-Klasse, nämlich bis 64 °C, bzw. 82 °C. Diese von 45/80-65 im A-Zustand liegen in verschiedenen Klassen, nämlich bis 76 °C und 82 °C.

„Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips“ ist auch bei DSR anwendbar zur Ermittlung des PG ohne tatsächlich bei 1,592 Hz zu messen. Höhere Präzision ist möglicherweise durch Modellierung von 30/80 °C Programm alleine. In dieser Diplomarbeit werden zwei Programme: -10/40 °C und 30/80 °C, verwendet. Die Modellierung ist aufgrund unterschiedlicher Platten nicht perfekt.

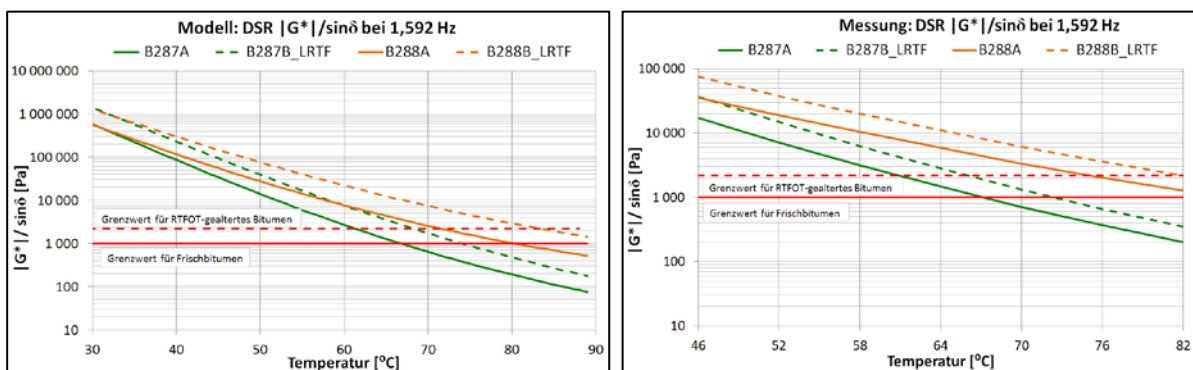


Abbildung 53: $|G^*|/\sin\delta$ für Straßenbaubitumen und PmB im A- und B-Zustand, links: Modell, rechts: gemessene Werte

Tabelle 9: Obere PG für 70/100 und 45/80-65

	Model	SHRP-Messung	Klassifizierung SUPERPAVE	
			Model	SHRP-Messung
70/100 A	67	67	64	64
70/100 B	68	66	64	64
45/80-65 A	80	84 ^{*)}	76	82
45/80-65 B	83 ^{*)}	82	82	82

5.2 Veränderungen im Laufe der Zeit

Diese Diplomarbeit verfolgt die Auswirkungen von 12 Monaten Feldalterung auf das Bitumenverhalten. In diesem Kapitel werden die Daten von Versuchen zu Beginn (0 Monaten), nach 3, 6 und 12 Monaten dargestellt und verglichen. Die Daten von 0 Monaten sind gleich, weil es noch keine schichtenweise Alterung gibt.

Die Ergebnisse vom Erweichungspunkt Ring & Kugel ermitteln die obere Grenze der Gebrauchsspanne und sind in Abbildung 54 dargestellt. Bei der Laboralterung von 70/100 findet eine deutliche Steigerung des Erweichungspunkts Ring & Kugel statt (horizontale Linien). Bei der Feldalterung zeigen die Ergebnisse, dass das 70/100 bereits nach dem Herstellen der Asphaltplatte (die Asphaltplatte wird hergestellt und das Bitumen extrahiert) stark gealtert ist. Von allen 4 Schichten ist die erste Schicht, also jene die am stärksten der Umwelt exponiert ist, am meisten gealtert.

Durch die Zugabe von SBS-Polymer steigt der Erweichungspunkt von 46 auf 71 °C beim Frischbitumen (Vergleich Abbildung 54 links und rechts). Dieser direkte Vergleich ist möglich, da das 45/80–65 aus genau diesen 70/100 hergestellt wurde. Bei der Laboralterung sinkt die Temperatur bei 45/80–65 im Gegensatz zur Laboralterung von 70/100. Das ist ein Resultat der entgegengesetzten Wirkung von Bitumenverhärtung und SBS-Degeneration. Während die Verhärtung zu einer Erweichungspunkterhöhung führt, wird dieser mit zunehmender Degeneration des SBS-Netzwerks niedriger. Die 3-Monats Ergebnisse der Feldalterung bei 45/80–65 weichen ab, weil der Normschliff nicht gefettet war und Sauerstoff bei der Destillation eingetragen wurde. Ein wichtiger Hinweis: Bei der Destillation ist auf absolute Dichtheit des Systems zu achten. Bei der Feldalterung zeigen die Ergebnisse, dass das 45/80–65 im Gegensatz zur Laboralterung sich kaum verändert. Der Grund dafür besteht darin, dass die SBS-Alterung nur schlecht durch Laboralterung abgebildet ist. Die Ergebnisse von Feldalterung bei 70/100 liegen in der Mitte zwischen den Werten von kurz- und langzeitgealterter Laboralterung. Im Vergleich dazu liegen die Daten der Feldalterung beim 45/80–65 nahe den Werten des Frischbitumens.

Bei 45/80–65 ist der Erweichungspunkt Ring & Kugel daher zur Beurteilung der Alterung des Bindemittels ungeeignet.

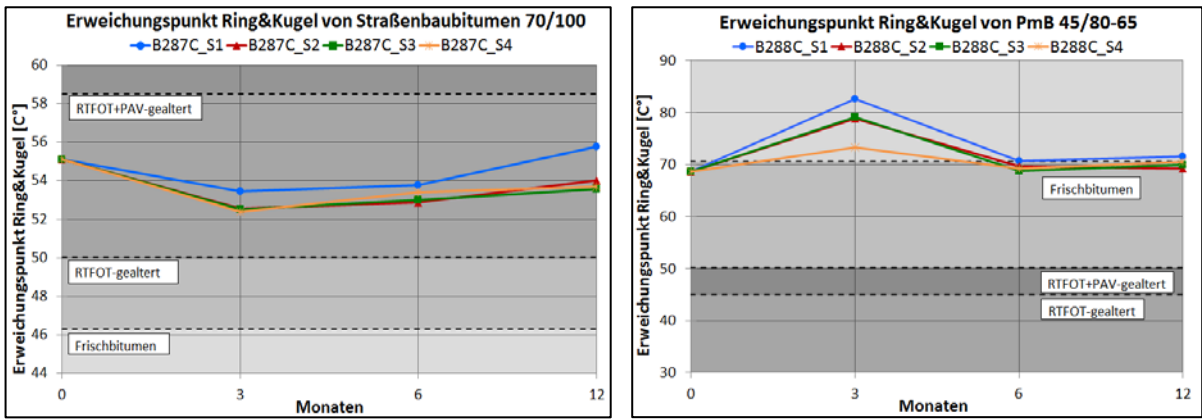


Abbildung 54: Erweichungspunkt Ring & Kugel im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

Die Ergebnisse der Nadelpenetration sind in Abbildung 55 dargestellt. Die Laboralterung führt sowohl bei 70/100 als auch bei 45/80–65 zu deutlichen Verhärtungen. Bei der Feldalterung kann man bei beiden Bitumen sehen, dass bereits nach dem Herstellen der Asphaltplatte das Bitumen stark gealtert ist. Das Bitumen der ersten Schicht ist tendenziell am meisten gealtert. Während sich die Ergebnisse der Feldalterung bei 70/100 zwischen den Daten von Kurz- und Langzeitlaboralterung befinden, zeigen die Ergebnisse der Feldalterung bei 45/80–65 fast die gleichen Werte wie Langzeitlaboralterung von 45/80–65.

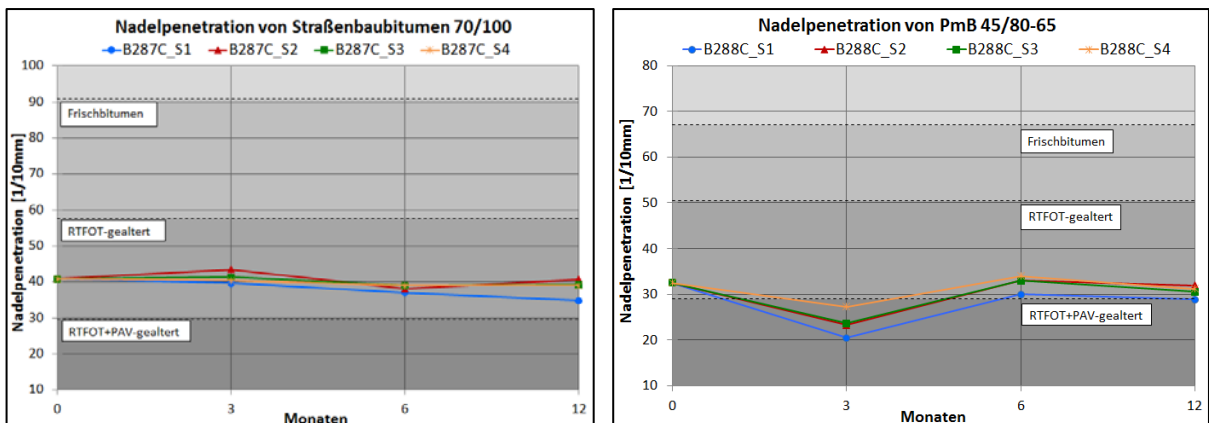


Abbildung 55: Nadelpenetration im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

Die Abbildung 56 stellt die Messwerte der elastischen Rückstellung von 45/80–65 dar. Die 3-Monate Proben wurden mit verschiedenen Ausziehlängen gemessen, da die Bitumenfäden bereits vor dem Erreichen der Standard-Ausziehlänge von 20 cm gerissen sind. Sowohl die Laboralterung, als auch die Feldalterung zeigen, dass sich die elastische Rückstellung im Laufe der Zeit verringert. Bei der Feldalterung im Laufe der Zeit nur sehr wenig bzw. liegen die Ergebnisse innerhalb der Wiederholbarkeit. Nach der Asphaltplattenherstellung ist die elastische Rückstellung des Bitumens schon um mehr als 10 % kleiner geworden.

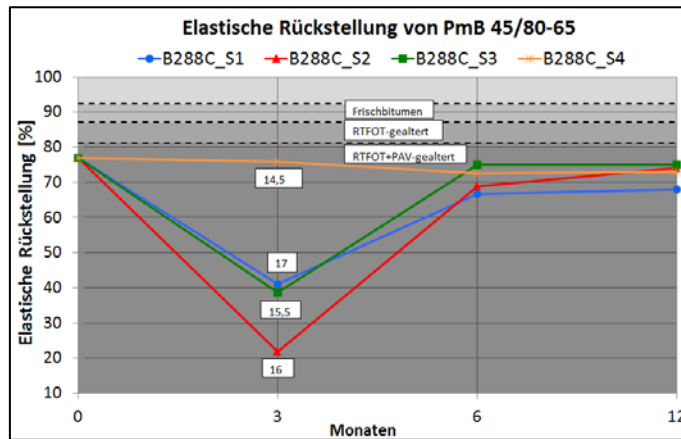


Abbildung 56: Elastische Rückstellung von PmB 45/80-65 im Laufe der Zeit

Die RV Ergebnisse bei 120 °C (siehe Abbildung 57) zeigen, dass die dynamische Viskosität im Laufe der Zeit ansteigt. Die erste Schicht besitzt die höchste Viskosität. Die Viskosität der ersten Schicht hebt sich nach 12 Monaten deutlich von den anderen ab. Bei 45/80-65 ist der Unterschied zwischen der Viskosität verschiedener Schichten sehr gering. Bei 70/100 liegen die Werte der Feldalterung in der Mitte zwischen den Werten von B- und C-Zustand der Laboralterung. Im Vergleich dazu nähern sich die Ergebnisse der Feldalterung von 45/80-65 dem B-Zustand an.

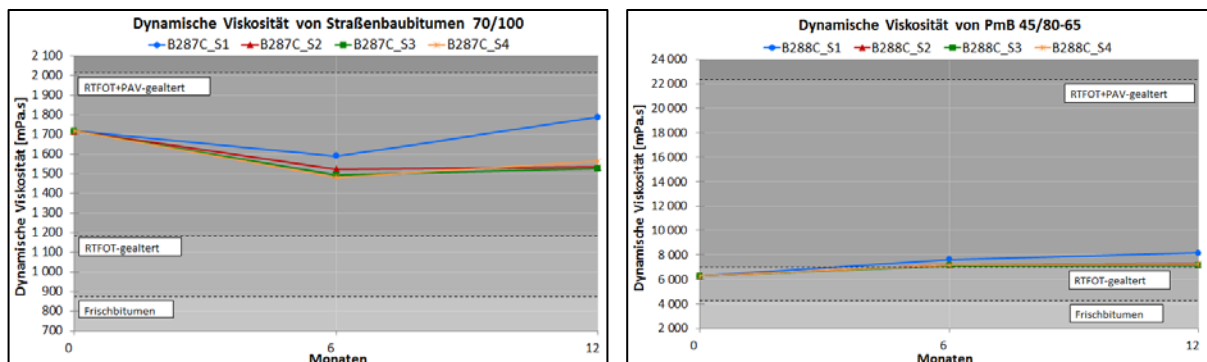


Abbildung 57: Dynamische Viskosität im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

Die Abbildung 58 veranschaulicht den komplexen Schubmodul eines DSR Messung im Laufe der Zeit bei 0,1 Hz über einen Temperaturbereich von 30 bis 80 °C. Die Abbildung 59 gibt Information über die Veränderung der Phasenwinkel (beides echte Messwerte, nicht modelliert). Mit zunehmender Alterung reagiert das Bitumen steifer ($|G^*|$ steigt) und elastischer (Phasenwinkel δ sinkt). Die Daten ($|G^*|$ und δ) der Feldalterung beim Straßenbaubitumen und PmB liegen zwischen den Werten von kurz- und langzeitlaborgealterten Bitumen.

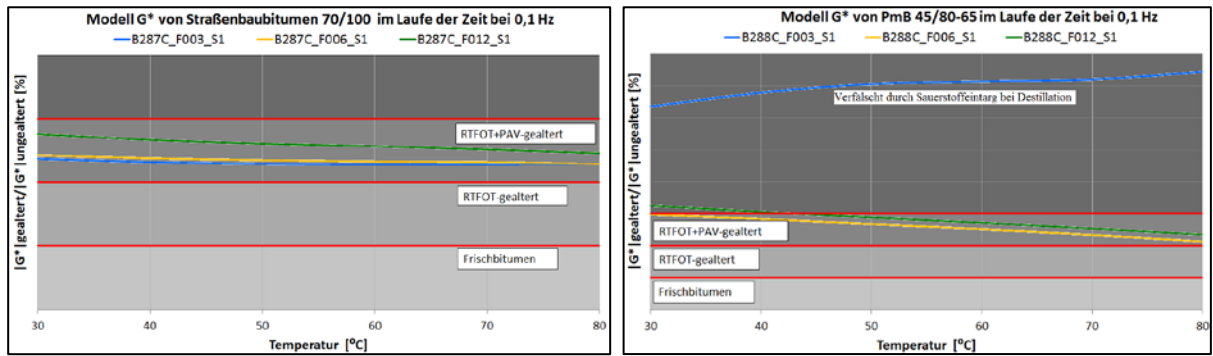


Abbildung 58: Modell des komplexen Schubmoduls im Laufe der Zeit bei 0,1 Hz, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

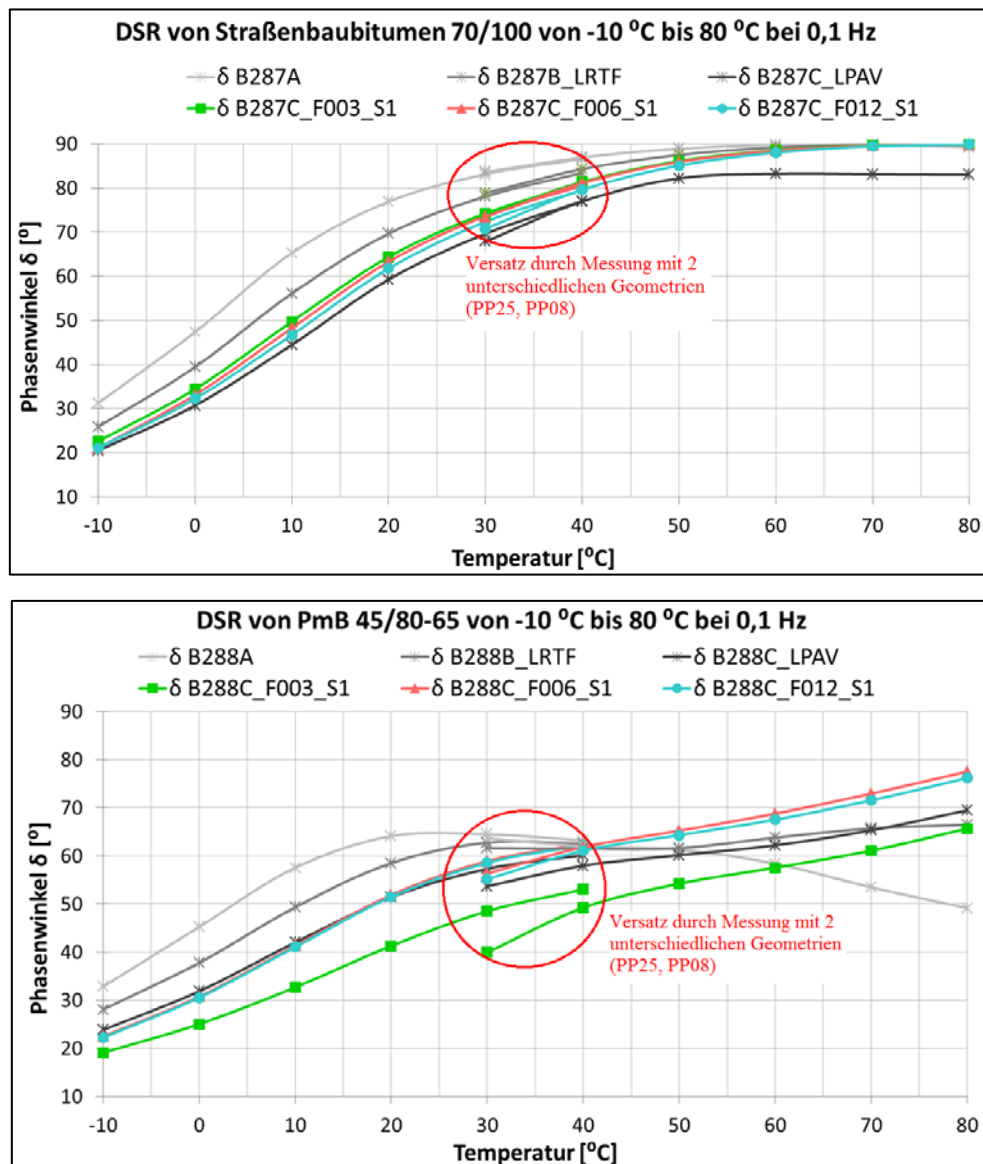


Abbildung 59: Phasenwinkel δ im Laufe der Zeit bei 0,1 Hz, oben: Straßenbaubitumen, unten: PmB

In der nachfolgenden Abbildung 60 sind die BBR-Messungen gegeben. Die Biegekriechsteifigkeit (S) und der m-Wert, deren Verlauf in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt ist. Der m-Wert drückt die Kriechfähigkeit bzw. Relaxationsfähigkeit des Bitumens aus. Ein hoher m-Wert ist ein Indikator dafür, dass das Material gut in der Lage ist, die Spannungen abzubauen (siehe Kapitel 4.3.3). Geringe Steifigkeit und ein hoher m-Wert zeigen ein günstiges Temperaturverhalten des Bindemittels. Mit Temperaturerhöhung sinkt die Steifigkeit und der m-Wert steigt an. Im Laufe der Zeit verschiebt sich die untere PG-Grenze nach oben (siehe Tabelle 10). In den beiden Grafiken der Abbildung 60 sind auch die SUPERPAVE-Grenzwerte für das Tieftemperaturverhalten eingetragen: einen Maximalwert von 300 MPa für die Steifigkeit S und einen Mindestwert von 0,3 für den m-Wert. Die jeweilige Kurve schneidet die Gerade des Grenzwertes und die entsprechende Temperatur wird abgelesen, wobei diese auf eine ganzzahlige Temperatur gerundet wurde. Jene Temperatur wird aufgrund des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips um 10 °C reduziert, was die maßgebende Temperatur für den „low Performance Grade“ ergibt.

Für die erste Schicht nach 12 Monaten des 70/100 wird der SUPERPAVE-Grenzwert des Steifigkeits-Kriteriums bei etwa -27 °C erreicht, im Gegensatz zu -29 °C für 45/80–65. Für die Bestimmung des low PG ist beim 45/80–65 ausschließlich die m-Wert-Kurve entscheidend. Beim 70/100 ist sowohl die Biegekriechsteifigkeitskurve, als auch m-Wert-Kurve für die Ableseung des low PG maßgebend (mit ^{*)} sind in der Tabelle 10 jene Proben bezeichnet, für welche die Biegekriechsteifigkeit entscheidend ist).

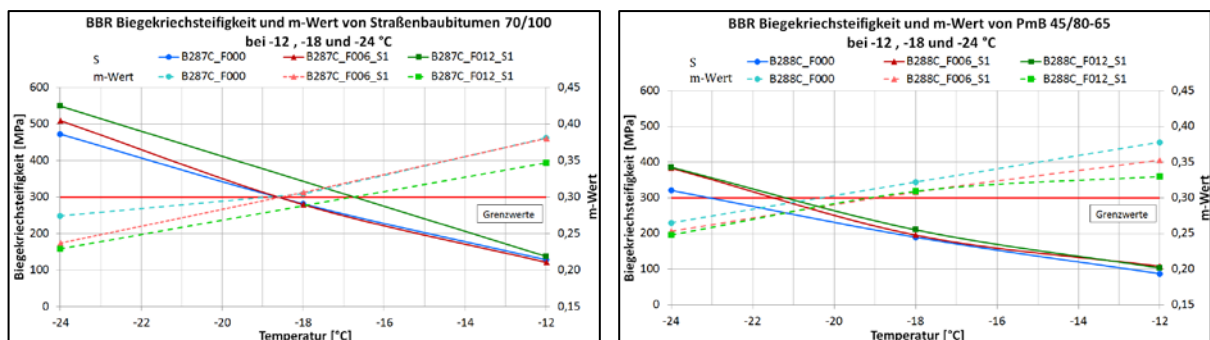


Abbildung 60: BBR der Schicht 1 bei -12, -18 und -24 °C im Laufe der Zeit,
links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

Die Grafiken für die Bestimmung des low PG der anderen Schichten sind im Anhang zu finden.

Tabelle 10: Veränderung des „low Performance Grade“ im Laufe der Zeit

70/100	low PG	45/80-65	low PG
B287C_F000	-29	B288C_F000	-30
B287C_F006_S1	-28	B288C_F006_S1	-29
B287C_F012_S1	-27	B288C_F012_S1	-29
B287C_F006_S2	-28 ^{*)}	B288C_F006_S2	-29
B287C_F012_S2	-28	B288C_F012_S2	-29
B287C_F006_S3	-29 ^{*)}	B288C_F006_S3	-31
B287C_F012_S3	-29 ^{*)}	B288C_F012_S3	-31
B287C_F006_S4	-28 ^{*)}	B288C_F006_S4	-30
B287C_F012_S4	-29 ^{*)}	B288C_F012_S4	-29

Aus der Tabelle 10 ist es ersichtlich, dass der low PG tendenziell leicht mit zunehmender Umweltexposition steigt. Der Unterschied beim low PG zwischen 70/100 und 45/80–65 ist ebenfalls nur sehr gering.

Mit dem jeweils bestimmten lowest PG (tritt jeweils bei Schicht 1 nach 12 Monaten auf) beider Bitumen werden die Steifigkeiten der anderen feld- und laborgealterten Bitumen bei gleicher Temperatur (jene des lowest PG) in den beiden Grafiken der Abbildung 61 über die Zeit dargestellt. Das rückgewonnene Bitumen aus dem Asphaltmischgut zeigt bereits extrem hohe Steifigkeitswerte. Nach 6 und 12 Monaten verändert sich die Biegebruchsteifigkeit gegenüber dem Mischgut nur sehr wenig. Die Streuung zwischen Schicht 1 und den anderen Schichten nach 12 Monaten bei 70/100 ist größer im Vergleich zu 45/80–65. Die Biegebruchsteifigkeit beim feldgealterten 70/100 liegt wesentlich über der Langzeitlaboralterung.

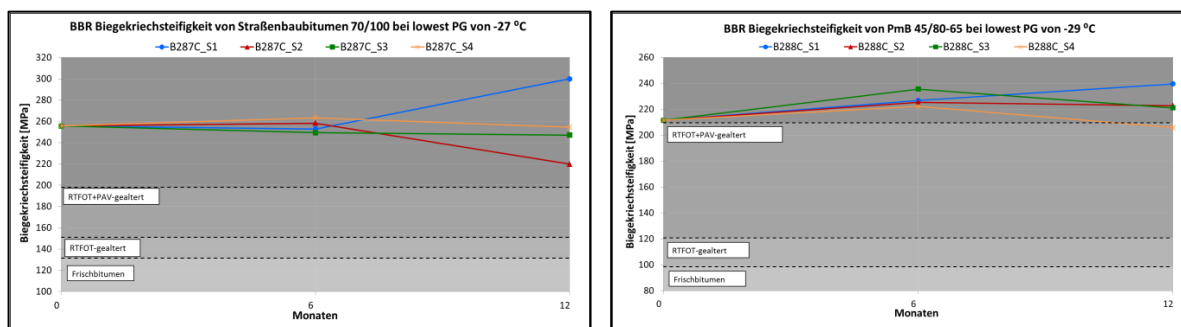


Abbildung 61: BBR im Laufe der Zeit bei entsprechenden low PG, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

So wird der Temperatureinsatzbereich des Bitumens bestimmt, innerhalb dessen in der Praxis keine Schädigung auftritt. „PG 52–22“ bedeutet, dass das so bezeichnete Bitumen nur in einer Temperaturzone (Klima) verwendet werden dürfte, in der die maximalen Asphalttemperaturen im Sommer +52 °C nicht überschreiten, und die minimalen Asphalttemperaturen im Winter -22 °C nicht unterschreiten.

5.3 Veränderungen in den Schichten

Wie sich die Alterung in den verschiedenen Schichten nach 12 Monaten zeigt, wird in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Die Ergebnisse von Erweichungspunkt Ring & Kugel für die verschiedenen Schichten nach 12 Monaten (siehe Abbildung 62) zeigen, dass die Schicht 1 bei beiden Bitumenarten den höchsten Erweichungspunkt im Vergleich zu den anderen Schichten besitzt. Die Unterschiede zwischen den Erweichungspunkten anderer Schichten sind insbesondere beim 70/100 gering.

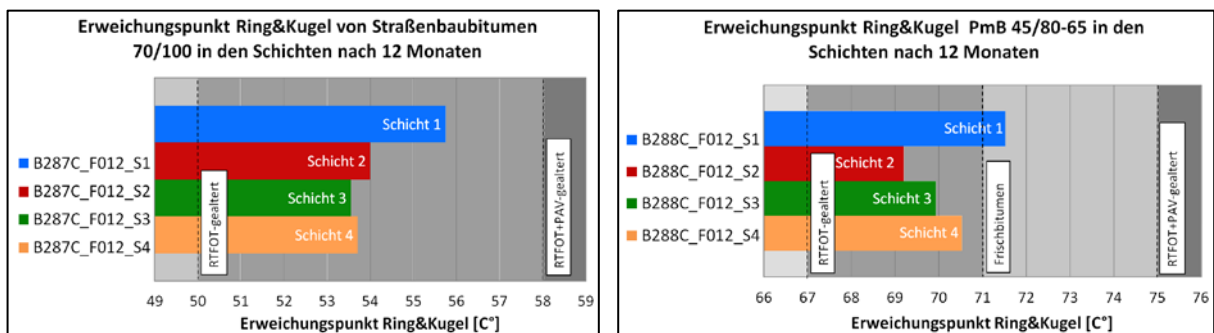


Abbildung 62: Erweichungspunkt Ring & Kugel in verschiedenen Schichten, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

Die Daten der Nadelpenetration in den nächsten Grafiken (siehe Abbildung 63) zeigen, dass die größte Verhärtung in der Schicht 1 stattfindet. Die Werte liegen zwischen den Kurz- und Langzeitlaboralterungswerten. Die Daten von 45/80-65 befinden sich nahe an den Werten der Langzeitlaboralterung.

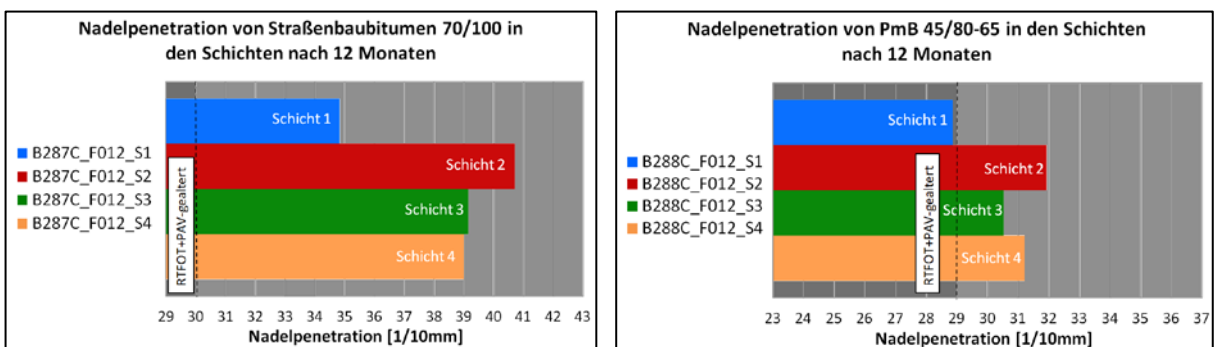


Abbildung 63: Nadelpenetration in verschiedenen Schichten, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

Die elastische Rückstellung verändert sich von 92 % beim Frischbitumen auf 68 % in Schicht 1 nach 12 Monaten (siehe Abbildung 64). Die Rückstellungen der anderen Schichten sind ungefähr gleich (etwa 74 %).

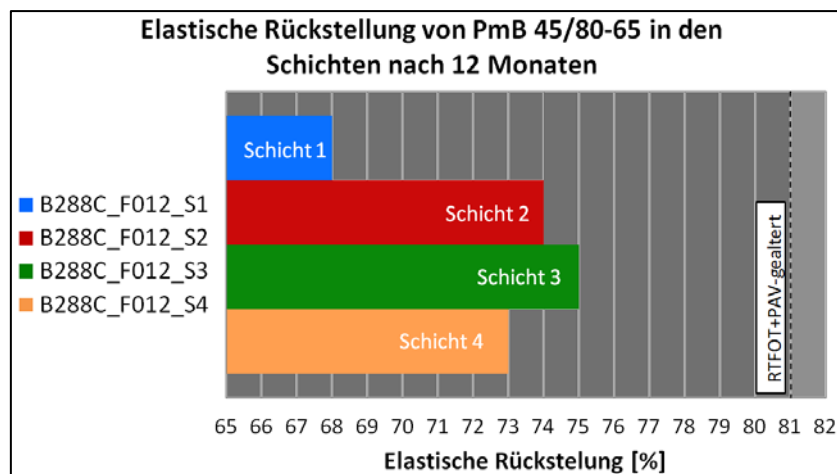


Abbildung 64: Elastische Rückstellung von PmB in verschiedenen Schichten

Die RV Ergebnisse von Abbildung 65 zeigen, dass die Schicht 1 bei 120 und 135 °C im Vergleich zu den anderen Schichten eine höhere Viskosität besitzt. Ab 150 °C gibt es keine Unterschiede.

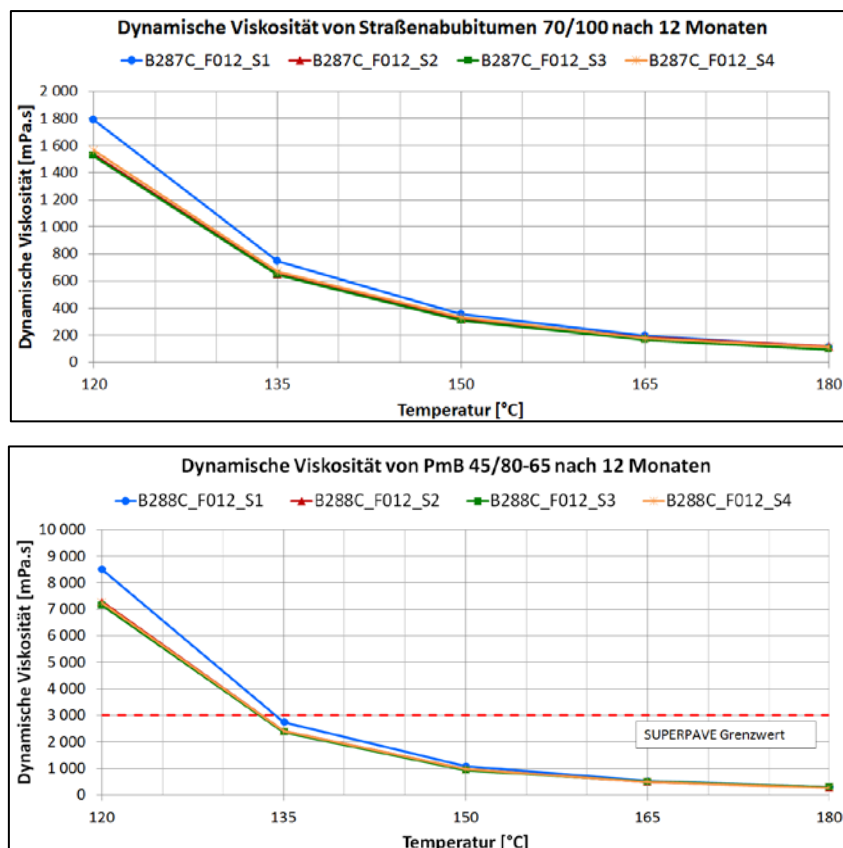


Abbildung 65: Dynamische Viskosität nach 12 Monaten in verschiedenen Schichten, oben: Straßenbaubitumen, unten: PmB

In der folgenden Abbildung 66 sind die gemessenen Daten von komplexen Schubmodul $|G^*|$ und Phasenwinkel δ bei einer Frequenz von 0,1 Hz über einen Temperaturbereich von -10 bis 80 °C dargestellt. Mit steigender Temperatur verringert sich der komplexe Schubmodul, d.h. der innere Widerstand des Stoffes gegen Deformation sinkt. Die Ergebnisse von allen vier Schichten zeigen bei tiefen Temperaturen fast die gleichen Werte. Mit Temperatursteigerung erweist die Schicht 1 einen höheren Schubmodul als die anderen drei Schichten. Der Phasenwinkel, der die Zeitdauer zwischen dem Zeitpunkt der Beanspruchung und der dadurch erzwungenen Deformation darstellt, zeigt größere Werte bei hohen Temperaturen und entsprechend werden geringere Werte bei niedrigen Temperaturen gemessen (Schicht 1 immer der kleinste Winkel).

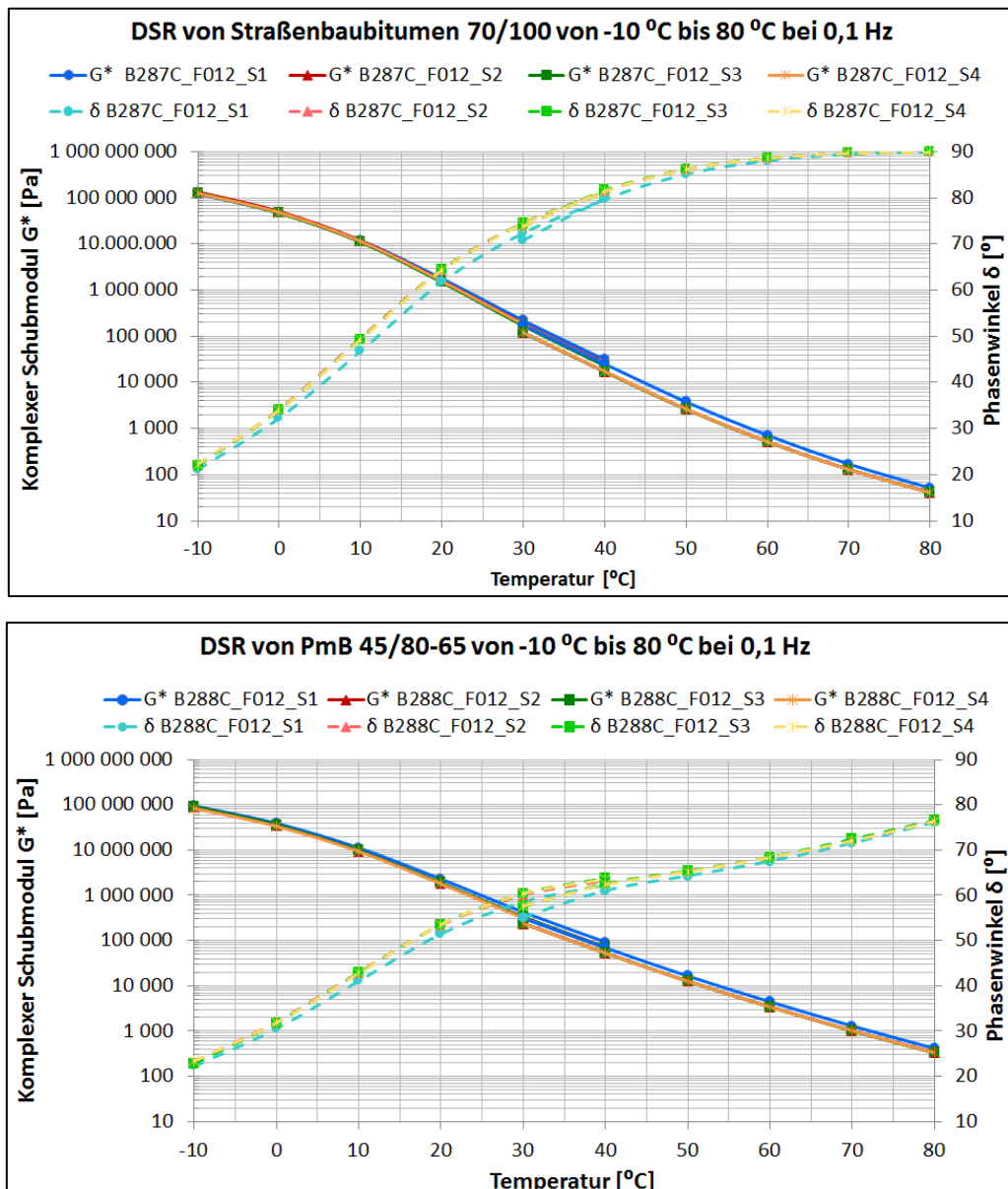


Abbildung 66: DSR von -10 °C bis 80 °C bei 0,1 Hz in verschiedenen Schichten, oben: Straßenbaubitumen, unten: PmB

Die Abbildung 67 veranschaulicht die Ergebnisse der BBR Biegekriechsteifigkeit und m-Wert vom 70/100 und 45/80–65 in den 4 Schichten nach 12 Monaten in Bezug auf das Bitumen mit dem geringsten PG (Schicht 1 immer maßgebend). Die Schicht 1 erweist bei beiden Bitumenarten die größte Biegekriechsteifigkeit. Eine kleine Verringerung der Biegekriechsteifigkeit und fast keine Veränderung des m-Werts sind mit der Einbautiefe erkennbar.

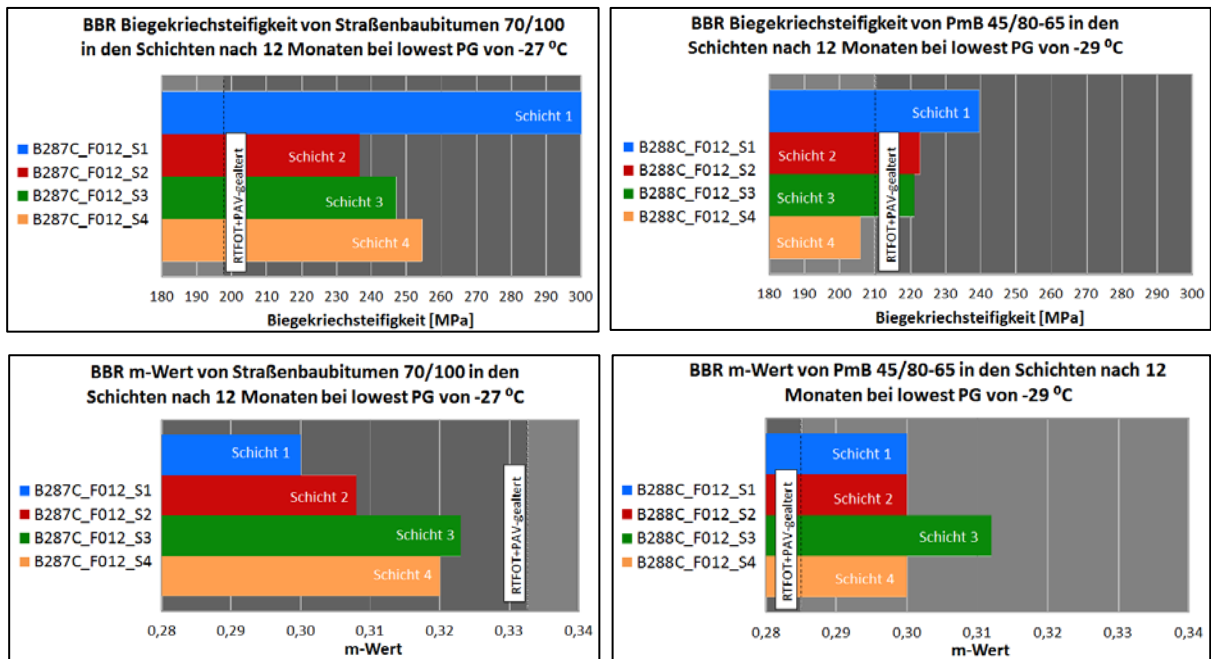


Abbildung 67: BBR Biegekriechsteifigkeit und m-Wert in verschiedenen Schichten bei unterer Gebrauchsspanne, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

5.4 Auswirkungen von Streusalz (Winterdienst)

In diesem Kapitel wird die Auswirkung von Streusalz auf Asphalt gezeigt. Das Hauptziel ist es festzustellen, ob Streusalz eine Rolle bei der Bitumenalterung spielt oder nicht.

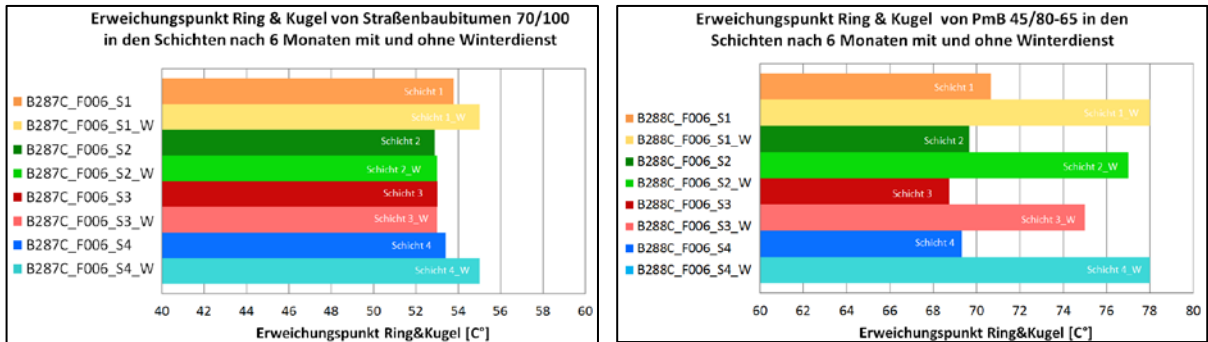


Abbildung 68: Erweichungspunkt Ring & Kugel in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

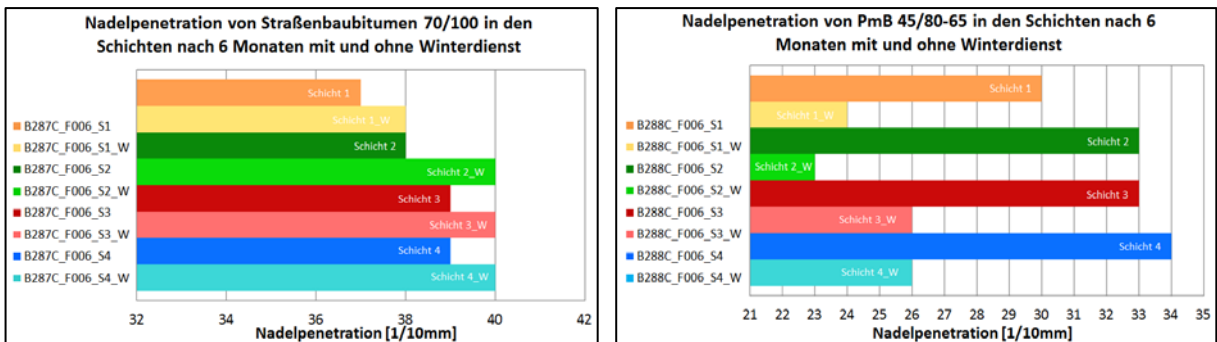


Abbildung 69: Nadelpenetration in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

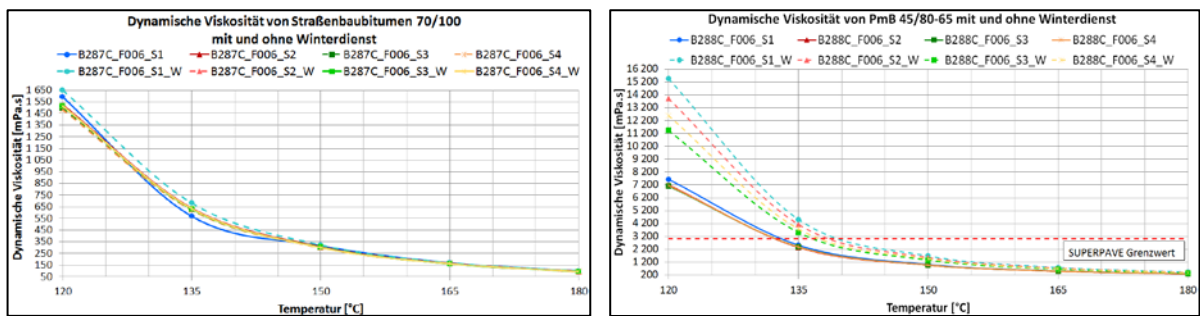


Abbildung 70: Dynamische Viskosität in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

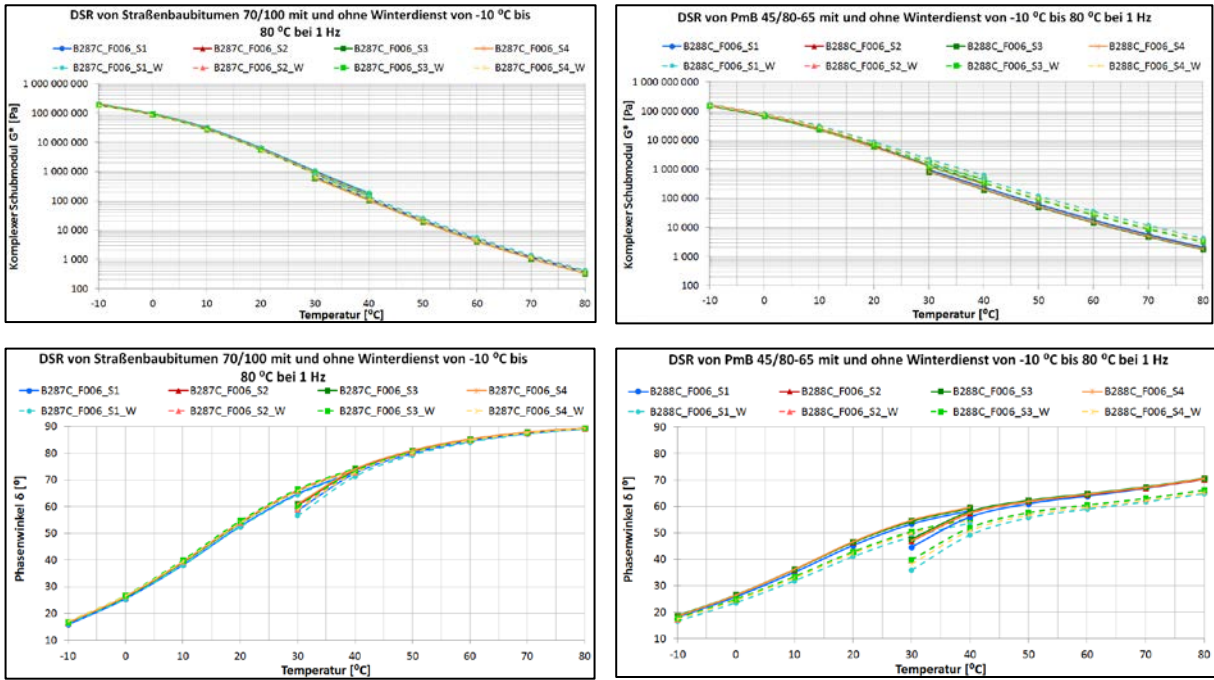


Abbildung 71: DSR in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

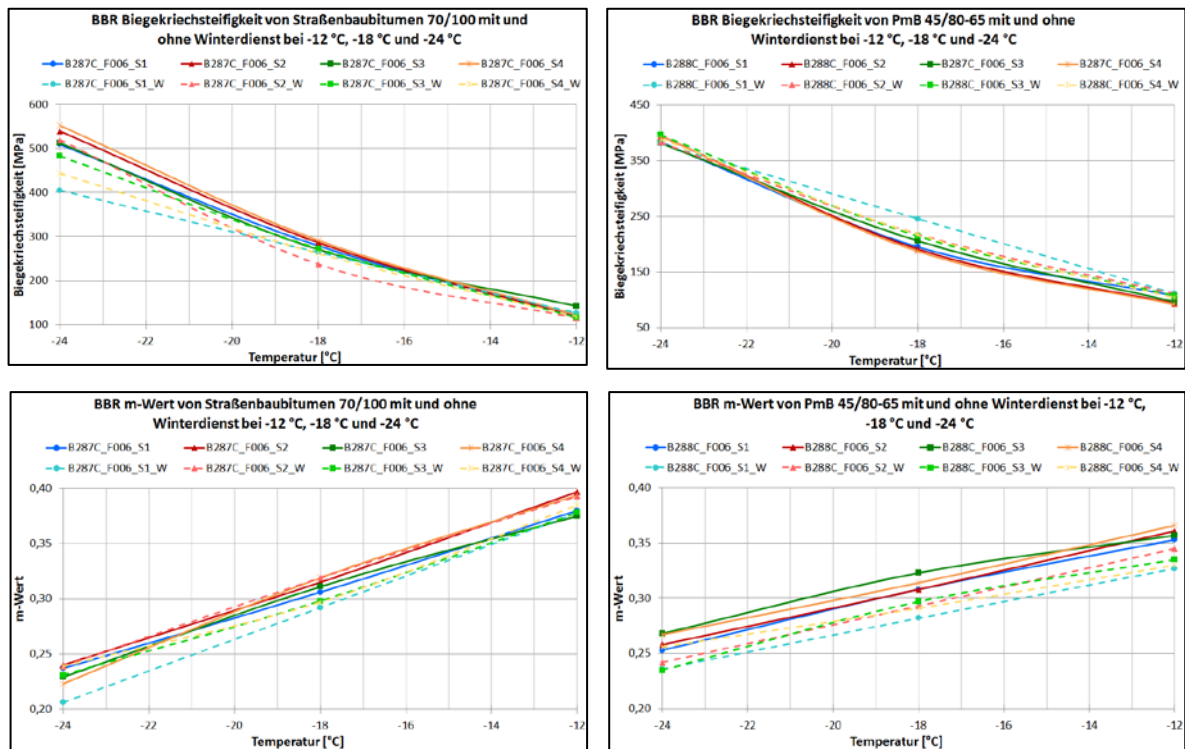


Abbildung 72: BBR in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB

Die oberen Ergebnisse von den Prüfungen in Abbildung 68 bis Abbildung 72 zeigen deutlich, dass es beim PmB einen großen Unterschied zwischen den Asphaltplatten, die mit und ohne Winterdienst behandelt wurden, gibt. Nämlich der Erweichungspunkt steigt im Schnitt mit etwa 9 %, die Nadelpenetration sinkt um 31 % niedriger geworden, die dynamische Viskosität unterscheidet sich bei 120 °C wesentlich (etwa 83 %), der komplexe Schubmodul $|G^*|$ erhöht sich mit 90 %, entsprechend sinkt der Phasenwinkel δ (etwa 5 %) und auch der m-Wert beim BBR (etwa 7 %). Die Biegekriechsteifigkeit verändert sich nur knapp im Vergleich zu den Proben ohne Winterdienst. D.h. das PmB mit Winterdienst altert schneller als ohne Winterdienst. Ob sich dieser Trend fortsetzt oder der Unterschied zwischen Straßenbaubitumen 70/100 und PmB 45/80-65 grundsätzlich bestätigt werden kann, zeigt sich erst mit der Entnahme der nächsten Probeplatten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einer vertiefenden Untersuchung der Auswirkung der Feldalterung auf das Bitumenverhalten nach 12 Monaten. Nach der Durchführung von 16 Extraktionen und 16 Destillationen von Straßenbaubitumen 70/100 und PmB 45/80-65 und insgesamt 68 Versuchen werden die Ergebnisse mit der vorhandenen Datenbasis verglichen und die folgenden Aussagen können gemacht werden:

- (1) Das PmB 45/80-65 erweist wegen der Modifizierung mit dem Polymer SBS eine größere Gebrauchsspanne, auch Plastizitätsspanne genannt, als das Straßenbaubitumen 70/100 auf.
- (2) Bereits nach der Asphaltplattenherstellung ist das Bitumen aus dem verwendeten Mischgut stark gealtert. Eine Vermutung für diese Tatsache ist die Verwendung zu hoher Temperaturen beim Mischen → dadurch Ergebnisse verfälscht.
- (3) Aufgrund der Daten von Kapitel 5.3 kann die Schlussfolgerung gemacht werden, dass die oberste Schicht, die im direkten Kontakt mit der Umwelt steht, am meisten gealtert ist. Die anderen drei Schichten altern auch, aber langsamer.
- (4) Anhand der Ergebnisse von Kapitel 5.4 erkennt man, dass der Winterdienst einen negativen Einfluss auf das PmB ausübt. Die mit Streusalz behandelten PmB-Asphaltplatten altern schneller als Nichtbehandelte. Beim Straßenbaubitumen ist fast kein Unterschied zwischen den Platten mit und ohne Winterdienstbehandlung ersichtlich.

I. Literaturverzeichnis

- [1] G. Neroth und D. Vollenschaar, Wendehorst Baustoffkunde, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2011.
- [2] ÖNORM EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie, Ausgabe: 01-2001.
- [3] Partl, Prof Dr. M. N., Asphalt und Bitumen - Werkstoffe I, ETHZ, Frühjahrsemester 2011.
- [4] „Trade.indiamart,“ [Online]. Available: <http://trade.indiamart.com/details.mp?offer=2016173530>. [Zugriff am 30 10 2013].
- [5] „Beaumont-trading,“ [Online]. Available: <http://www.beaumont-trading.ch/bitumen.html>. [Zugriff am 28 10 2013].
- [6] „Fotothing,“ [Online]. Available: <http://www.fotothing.com/alden/photo/81d226466fd4246211bb6bbd4aaa21d9/>. [Zugriff am 25 10 2013].
- [7] Entwurf und Bau von Straßen, Teil: Straßenbautechnik.
- [8] „Ölsand,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96lsand>. [Zugriff am 31 01 2014].
- [9] „Globales Ölfördermaximum,“ [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Globales_%C3%96lf%C3%B6rdermaximum . [Zugriff am 31 01 2014].
- [10] „Bp,“ [Online]. Available: <http://www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=3050323&contentId=3050412#3051161>. [Zugriff am 20 10 2013].
- [11] Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel, Werkstoffe des Bauwesens, Bituminöse Baustoffe, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenier- und Vermessungswesen, Wintersemester 2011.
- [12] M. Hospodka, Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor, Institut für Verkehrswesen, Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur, Universität für Bodenkultur Wien, 2013.

- [13] R. Çetinkaya, Bewertung der Einflussgrößen auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt, Bochum : Europ. Univ.-Verl. , 2011.
- [14] G.D.Airey, „Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens,“ *Journal of materials science* , 2004.
- [15] „Highly Modified Asphalt (HiMA): Next Generation in Asphalt Pavement Design,“ Kraton Performance Polymer, 2012.
- [16] H. Neumann, I. Rahimian, B. Paczynska-Lahme, „Zur Strukturalterung von Bitumen“.
- [17] J. LITZKA, R. STROBL, F. PASS und H. AUGUSTIN, Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung, Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 9, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, 1998.
- [18] Hase, Dr.-Ing. Manfred, *Neue rheologische Prüfverfahren für Bitumen: Bending Beam Rheometer (BBR)*, Pinneberg, 06.03.2002.
- [19] O. Baglieri, D. Dalmazzo, M. Barazia, H. A. Tabatabaee, H.U. Bahia, „Influence of Physical Hardening on the Low-Temperature Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures,“ 2012.
- [20] M. Evans, R. Marchildon and S.A.M. Hesp, „Effects of physical hardening on stress relaxation in asphalt cements“.
- [21] H. A. Tabatabaee, R. Vekasquez, H. U. Bahia, „Predicting low temperature physical hardening in asphalt binders,“ *Construction and Building Materials*, 2012.
- [22] H. Tabatabaee, S. Mangiafico, R. Velasquez, H. Bahia, „Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements,“ University of Wisconsin-Madison, Oktober, 2010.
- [23] ÖNORM EN 14771: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekiechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR), Ausgabe: 08-2012.
- [24] D. I. B. Hofko, *Towards an enhanced characterisization of the behavior of hot mix asphalt under cyclic dynamic compressive loading*, Wien, November, 2011.
- [25] „Zeit-Temperatur-Verschiebungsgesetz,“ [Online]. Available: <http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Zeit-Temperatur-Verschiebungsgesetz> . [Zugriff am 10 04 2014].

- [26] „Wikipedia,“ [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Extraktion_%28Verfahrenstechnik%29 . [Zugriff am 17 12 2013].
- [27] ÖNORM EN 12697-1: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 1 Löslicher Bindemittelgehalt, Ausgabe: 09-2012.
- [28] ÖNORM EN 12697-3: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 3 Rückgewinnung des Bindemittels Rotationsverdampfer, Ausgabe: 05-2005.
- [29] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rotationsverdampfer>. [Zugriff am 15 11 2013].
- [30] Högger, Copyright© Rosemary, *Schulungsunterlagen Destillation mit Rotationsverdampfer*, BÜCHI, 1998.
- [31] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/L%C3%B6sungsmittel>, . [Zugriff am 20 12 2013].
- [32] „M.schuelerlexikon,“ [Online]. Available: http://m.schuelerlexikon.de/che_abi2011/Loesungsmittel_und_ihre_Eigenschaften.htm . [Zugriff am 20 12 2013].
- [33] M. Pitts, *Alternatives Lösemittel und Verfahren für die Extraktion von Bitumen aus Asphalt*, Bitumen 1994, Heft 3.
- [34] P.-I. W. W.-I. K. Krüger, „Entwicklung eines Verfahrens zur Bindemittelrückgewinnung nach Asphaltextraktion mit alternativen Lösemitteln aus nachwachsenden Rohstoffe,“ Dessau-Roßlau, 18.06.2012.
- [35] „Asphaltanalytoren T/ PG/ VERTE,“ infraTest-Testing system.
- [36] Агенция „Пътна инфраструктура“, „Техническа спецификация,“ София, 2014.
- [37] „Strassenbau.uni-wuppertal,“ [Online]. Available: <http://www.strassenbau.uni-wuppertal.de/SeSb/Labor/Geraete/asphaltanalysator.html>. [Zugriff am 10 10 2013].
- [38] ÖNORM EN 13398: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen, Ausgabe: 10-2010.

- [39] ÖNORM EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, Ausgabe: 06-2007.
- [40] ÖNORM EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Ausgabe: 06-2007.
- [41] ÖNORM EN 12607-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren, Ausgabe: 06-2007.
- [42] ÖNORM EN 12593: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß, Ausgabe: 06-2007.
- [43] ÖNORM EN 13302: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der dynamischen Viskosität von bitumenhaltigem Bindemittel mit einem Viskosimeter mit rotierender Spindel, Ausgabe: 06-2010.
- [44] ÖNORM EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Ausgabe: 08-2012.
- [45] „Bitumen-gestein,“ [Online]. Available: http://www.bitumen-gestein.de/4_Modifizierte%20Bitumen.html. [Zugriff am 04 11 2013].
- [46] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bitumen>. [Zugriff am 03 10 2013].
- [47] „Driving Innovation with Kraton Polymer: High Performance Modifiers for Asphalt Paving,“ Kraton Polymers LLC, 2010.
- [48] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Destillation>. [Zugriff am 09 01 2014].
- [49] H. Bahia, D. Anderson, „Glass transition behavior and physical hardening of asphalt binders“.
- [50] „Baunetzwissen,“ [Online]. Available: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Flachdach_Geschichte-des-Bitumens_156015.html . [Zugriff am 31 01 2014].

- [51] Dipl.-Ing. Dr.techn.R.Blab und Projektassistent M. Wagner, „Bindemittelprüfung zur Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von "tecRoad Premium",“ Wien, Mai 2006.
- [52] „Asphalt,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Asphalt>. [Zugriff am 2014 02 17].
- [53] D. I. B. Hofko, „Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt,“ Herbst, 2013.
- [54] [Online]. Available: https://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news_detail/article/3451/. [Zugriff am 14 04 2014].
- [55] D.-I. T. Hagner, „Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischem Sher-Rheometer,“ Braunschweig, 2003.

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: links und rechts: Bitumen [4], [5], in der Mitte: Naturasphalt [6].....	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bitumenherstellung [10]	13
Abbildung 3: Hauptbestandteile von Bitumen [1]	13
Abbildung 4: Klassische vereinfachte Modellvorstellung zum Aufbau von Bitumen [3]	15
Abbildung 5: Modell der Mizellen im Bitumen [3].....	15
Abbildung 6: Deformation und Rückformung bei visko-elastischem Materialverhalten [12]	16
Abbildung 7: Terminologie der Kohlenwasserstoff-Bindemittel nach EN 12597 [2]	18
Abbildung 8: Modell der Struktur von APP und SBS [3].....	20
Abbildung 9: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen von Bitumen mit 4 M.-% SBS links: gut mischbar, rechts: schlecht mischbar [Institut für Materialchemie, TU Wien].....	21
Abbildung 10: Die Wirkung vom zunehmenden SBS Polymergehalt auf die Bitumen-Polymer Morphologie [15]	22
Abbildung 11: Die Wirkung vom zunehmenden SBS Polymergehalt auf den Erweichungspunkt Ring & Kugel [15]	23
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Alterungsverlaufs [12]	26
Abbildung 13: Physikalische Verhärtung und der Zusammenhang mit dem freien Volumen [22].....	29
Abbildung 14: Schemaskizze des Bending Beam Rheometer [17]	31
Abbildung 15: Messprinzip BBR [17]	31
Abbildung 16: Biegekiechsteifigkeit [17]	32
Abbildung 17: m-Wert [17]	33
Abbildung 18: Schema der Master-Curve-Konstrukt. durch „Zeit-Temperatur-Superposition“ [25]...	34
Abbildung 19: Asphaltanalysator der Fa. Infratest, Model: Verte [35]	40
Abbildung 20: Probefeld	43
Abbildung 21: Darstellung der Schichten.....	44
Abbildung 22: Asphaltanalysator der Fa. Infratest, Model: ecoTest	46
Abbildung 23: Ablauf der Extraktion von Asphaltmischgut	47
Abbildung 24: Rotationsverdampfer.....	47
Abbildung 25: Schema eines typischen Rotationsverdampfers [28]	48
Abbildung 26: links: R & K Automat, rechts oben: Messingringe, rechts unten: Bitumensack	50
Abbildung 27: Messprinzip für Erweichungspunkt Ring und Kugel [17].....	51
Abbildung 28: links: Nadelpenetrometer, rechts: Penetrationsnadel und -tiegel.....	52
Abbildung 29: Messprinzip für Nadelpenetration [1]	53
Abbildung 30: links: Brechpunktautomat und Metallplättchen, rechts: Aufschmelzgerät	53
Abbildung 31: Messprinzip für Brechpunkt nach Fraaß [1]	54
Abbildung 32: Duktilometer	55
Abbildung 33: Proben.....	56
Abbildung 34: Messprinzip für die elastische Rückstellung [1].....	56
Abbildung 35: Formen nach der Versuchsdurchführung.....	57
Abbildung 36: links: Rotational Viscometer, rechts: Aluminiumhülse und Spindeln.....	58
Abbildung 37: Schemaskizze eines Rotational Viscometers [17].....	59
Abbildung 38: Prinzipskizze von Messsensor für Rotational Viscometer [17]	60
Abbildung 39: links: Dynamic Shear Rheometer, rechts oben: Messköpfe, rechts unten: Silikongummiformen und Spachtel	61

Abbildung 40: Platte-Platte Messsystem [17].....	62
Abbildung 41: Versuchsvorbereitung.....	62
Abbildung 42: Oszillationszyklus [17].....	63
Abbildung 43: Verlauf von Spannung und Deformation beim elastischen (links) und viskosen (rechts) Verhalten [17]	64
Abbildung 44: Verlauf von Spannung und Deformation bei visko-elastischem Verhalten [17]	65
Abbildung 45: Phasenverschiebungswinkel [17].....	66
Abbildung 46: links: Bending Beam Rheometer, rechts: Bitumenbalkenform	67
Abbildung 47: Bitumenbalkenform [17]	68
Abbildung 48: BBR Versuchsanordnung.....	68
Abbildung 49: Elastische Rückstellung im Zustand A, Straßenbaubitumen vs. PmB.....	70
Abbildung 50: Dynamische Viskosität im Zustand A, Straßenbaubitumen vs. PmB	71
Abbildung 51: DSR von -10 °C bis 80 °C bei 1Hz im Zustand A, Straßenbaubitumen vs. PmB	72
Abbildung 52: links: Relative Veränderung des PmB Schubmoduls zum 70/100, rechts: Absolute Veränderung des PmB Phasenwinkels zum 70/100	72
Abbildung 53: $ G^* /\sin\delta$ für Straßenbaubitumen und PmB im A- und B-Zustand, links: Modell, rechts: gemessene Werte	73
Abbildung 54: Erweichungspunkt R & K im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB... 75	75
Abbildung 55: Nadelpenetration im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB.....	75
Abbildung 56: Elastische Rückstellung von PmB 45/80-65 im Laufe der Zeit.....	76
Abbildung 57: Dynamische Viskosität im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB..	76
Abbildung 58: Modell des komplexen Schubmoduls im Laufe der Zeit bei 0,1 Hz, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB.....	77
Abbildung 59: Phasenwinkel δ im Laufe der Zeit bei 0,1 Hz, oben: Straßenbaubitumen, unten: PmB	77
Abbildung 60: BBR der Schicht 1 bei -12, -18 und -24 °C im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB	78
Abbildung 61: BBR im Laufe der Zeit bei entsprechenden low PG, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB	79
Abbildung 62: Erweichungspunkt Ring & Kugel in verschiedenen Schichten, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB.....	80
Abbildung 63: Nadelpenetration in verschied. Schichten, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB....	80
Abbildung 64: Elastische Rückstellung von PmB in verschiedenen Schichten.....	81
Abbildung 65: Dynamische Viskosität nach 12 Monaten in verschiedenen Schichten, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB	81
Abbildung 66: DSR von -10 °C bis 80 °C bei 0,1 Hz in verschiedenen Schichten, oben: Straßenbaubitumen, unten: PmB	82
Abbildung 67: BBR Biegebiegesteifigkeit und m-Wert in verschiedenen Schichten bei unterer Gebrauchsspanne, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB.....	83
Abbildung 68: Erweichungspunkt Ring & Kugel in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB.....	84
Abbildung 69: Nadelpenetration in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB.....	84
Abbildung 70: Dynamische Viskosität in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB.....	84

Abbildung 71: DSR in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links:
Straßenbaubitumen, rechts: PmB..... 85

Abbildung 72: BBR in den Schichten nach 6 Monaten mit und ohne Winterdienst, links:
Straßenbaubitumen, rechts: PmB..... 85

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Begriffe aus EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel –Terminologie [2]	9
Tabelle 2: Systematik der Kohlenwasserstoffe in Bitumen [3]	14
Tabelle 3: Übersicht: Polymergruppen [12]	20
Tabelle 4: Spezifikation des Straßenbaubitumens 50/70 und 70/100	41
Tabelle 5: Spezifikation des PmBs 25/55-55 und 45/80-65	41
Tabelle 6: Laborcodierung für Proben [12]	44
Tabelle 7: Bitumenproben.....	45
Tabelle 8: Destillationsbedingungen verschiedenes Lösemittels nach EN 12697-3 [30], [36]	49
Tabelle 9: Obere PG für 70/100 und 45/80-65	73
Tabelle 10: Veränderung des „low Performance Grade“ im Laufe der Zeit	79

Laborcode	Teilstück	Datum	MA Extraktion	MA Destillation	Phase 1 (Einsaugen)	Phase 2	Phase 3	Phase 1 beendet	20 mbar erreicht auf 160 °C	160 °C erreicht	Phase 2 beendet	180 °C erreicht	Phase 3 beendet	GESAMTDAUER
B288C_F012_S1	I.	30.9.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	04:10	04:50	04:58	05:13	05:19	05:34	
	II.	1.10.2013						03:20	04:01	04:09	04:24	04:30	04:45	
B288C_F012_S2	I.	10.10.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	02:43	03:20	03:28	03:43	03:49	04:04	
	II.	11.10.2013						02:45	03:23	03:31	03:46	03:52	04:07	
B288C_F012_S3	I.	14.10.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	02:28	03:04	03:12	03:27	03:33	03:48	
	II.	14.10.2013						02:20	03:11	03:19	03:34	03:40	03:55	
B288C_F012_S4	I.	15.10.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	02:26	03:07	03:15	03:30	03:36	03:51	
	II.	15.10.2013						02:23	03:10	03:18	03:33	03:39	03:54	
B287C_F012_S1	I.	17.10.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	02:10	02:54	03:02	03:17	03:23	03:38	
	II.	17.10.2013						02:11	03:04	03:12	03:27	03:33	03:48	
B287C_F012_S2	I.	18.10.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	01:57	02:46	02:54	03:09	03:15	03:30	
	II.	21.10.2013						02:36	03:30	03:38	03:53	03:59	04:14	
B287C_F012_S3	I.	24.10.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	02:34	03:30	03:38	03:53	03:59	04:14	
	II.	24.10.2013						02:26	03:23	03:31	03:46	03:52	04:07	
B287C_F012_S4	I.	25.10.2013	MS	MS	110 °C 300 mbar	160 °C 20 mbar	180 °C 20 mbar	02:32	03:20	03:28	03:43	03:49	04:04	
	II.	25.10.2013						02:35	03:28	03:36	03:51	03:57	04:12	

Erweichungspunkt Ring & Kugel	Messung		Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[°C]	[°C]	[°C]
B287A	11.09.2012	46,33 46,26	46,30	46
B287B_LRTF	17.09.2012	50,11 49,90	50,01	50
B287B_F000	24.10.2012	55,47 55,47	55,47	55
B287C_LPAV	05.11.2012	58,66 58,33	58,50	58
B287C_L000	04.10.2013	50,92 51,06	50,99	51
B287C_F000	04.10.2013	54,98 55,23	55,11	55
B288A	11.09.2012	70,85 70,49	70,67	71
B288B_LRTF	12.09.2012	67,29 67,09	67,19	67
B288B_F000	24.10.2012	68,12 67,92	68,02	68
B288C_LPAV	28.05.2013	75,00 75,63	75,32	75
B288C_L000	04.10.2013	65,42 65,71	65,57	66
B288C_F000	04.10.2013	68,59 68,75	68,67	69
<p>Anmerkungen:</p> <p>Badflüssigkeit: H₂O_{dest.}</p> <p>Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Markus Hospodka</p> <p>Prüfgerät: Fröwag; Fröhlich+Wagner GmbH; Prüfanlage für Baustoffe und Umwelt</p>				

Erweichungspunkt Ring & Kugel	Messung		Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[°C]	[°C]	[°C]
B287C_F003_S1	21.02.2013	53,43 53,43	53,43	53
B287C_F003_S2	25.02.2013	52,42 52,72	52,57	53
B287C_F003_S3	25.02.2013	52,70 52,32	52,51	53
B287C_F003_S4	25.02.2013	52,29 52,51	52,40	52
B288C_F003_S1	26.02.2013	82,55 82,75	82,65	83
B288C_F003_S2	26.02.2013	78,97 78,83	78,90	79
B288C_F003_S3	26.02.2013	79,19 79,13	79,16	79
B288C_F003_S4	26.02.2013	73,20 73,53	73,37	73
<p>Anmerkungen: Prüfgerät: Fröwag; Fröhlich+Wagner GmbH; Badflüssigkeit: H₂O_{dest.} Prüfanlage für Baustoffe und Umwelt Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Markus Hospodka</p>				

Erweichungspunkt Ring & Kugel	Messung		Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[°C]	[°C]	[°C]
B287C_F006_S1	21.08.2013	53,81 53,76	53,79	54
B287C_F006_S2	21.08.2013	52,96 52,80	52,88	53
B287C_F006_S3	21.08.2013	52,91 53,12	53,02	53
B287C_F006_S4	23.08.2013	53,49 53,31	53,40	53
B288C_F006_S1	04.09.2013	70,93 70,38	70,66	71
B288C_F006_S2	04.09.2013	69,48 69,86	69,67	70
B288C_F006_S3	04.09.2013	68,80 68,68	68,74	69
B288C_F006_S4	04.09.2013	69,28 69,32	69,30	69
<p>Anmerkungen: Prüferät: Fröwag; Fröhlich+Wagner GmbH; Badflüssigkeit: H₂O_{dest.} Prüfanlage für Baustoffe und Umwelt Prüfer: ■ Thomas Riedmayer</p>				

Erweichungspunkt Ring & Kugel	Messung		Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[°C]	[°C]	[°C]
B287C_F006_S1_W	13.8.2013	54,61 54,61	54,61	55
B287C_F006_S2_W	13.8.2013	52,99 53,12	53,06	53
B287C_F006_S3_W	14.8.2013	53,34 53,42	53,38	53
B287C_F006_S4_W	14.8.2013	53,01 52,68	52,85	53
B288C_F006_S1_W	21.11.2013	78,00 77,96	77,98	78
B288C_F006_S2_W	21.11.2013	76,78 77,14	76,96	77
B288C_F006_S3_W	21.11.2013	75,04 75,10	75,07	75
B288C_F006_S4_W	21.11.2013	74,89 74,76	74,83	75
<p>Anmerkungen: Prüferät: Fröwag; Fröhlich+Wagner GmbH; Badflüssigkeit: H₂O_{dest.} Prüfanlage für Baustoffe und Umwelt Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Marina Stoyanova</p>				

Erweichungspunkt Ring & Kugel	Messung		Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[°C]	[°C]	[°C]
B287C_F012_S1	6.11.2013	55,64 55,86	55,75	55,8
B287C_F012_S2	6.11.2013	54,09 53,91	54,00	54,0
B287C_F012_S3	6.11.2013	53,57 53,53	53,55	53,6
B287C_F012_S4	6.11.2013	53,67 53,75	53,71	53,7
B288C_F012_S1	6.11.2013	71,34 71,70	71,52	71,5
B288C_F012_S2	6.11.2013	69,34 69,05	69,20	69,2
B288C_F012_S3	6.11.2013	69,93 69,93	69,93	69,9
B288C_F012_S4	6.11.2013	70,83 70,22	70,53	70,5
<p>Anmerkungen: Prüferät: Fröwag; Fröhlich+Wagner GmbH; Badflüssigkeit: H₂O_{dest.} Prüfanlage für Baustoffe und Umwelt Prüfer: Marina Stoyanova</p>				

Eindringtiefe Nadelpenetration	Messung		Gerundet	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]
B287A	14.9.2012	90,3 91,5	90 92	91,0	91
B287B_LRTF	3.6.2013	57,7 57,3 58,0	58 57 58	57,7	58
B287B_F000	3.6.2013	34,7 33,8 33,5	35 34 34	34,3	34
B287C_LPAV	5.11.2012	30,2 29,9 29,2	30 30 29	29,7	30
B287C_L000	4.10.2013	53,3 51,6 52,2	53 52 52	52,3	52
B287C_F000	4.10.2013	39,6 41,8	40 42	41,0	41
B288A	21.9.2012	67,8 66,1	68 66	67,0	67
B288B_LRTF	4.6.2013	51,2 50,5 49,6	51 51 50	50,4	50
B288B_F000	3.6.2013	38,3 38,3 38,8	38 38 39	38,5	38
B288C_LPAV	28.5.2013	30,0 28,6 28,2	30 29 28	28,9	29
B288C_L000	7.10.2013	40,9 40,9 41,6	41 41 42	41,1	41
B288C_F000	7.10.2013	33 31,9 32,5	33 32 33	32,5	33
Anmerkungen: nur mit 50 g Prüfgerät: FRÖWAG Nadelpenetrometer Typ 1.571 Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Markus Hospodka					

Eindringtiefe Nadelpenetration	Messung		Gerundet	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]
B287C_F003_S1	31.5.2013	39,4	39	39,7	40
		38,8	39		
		40,9	41		
B287C_F003_S2	31.5.2013	43,0	43	43,7	44
		44,0	44		
		43,5	44		
B287C_F003_S3	31.5.2013	42,1	42	41,3	41
		41,2	41		
		40,5	41		
B287C_F003_S4	31.5.2013	40,7	41	40,7	41
		40,6	41		
		39,6	40		
B288C_F003_S1	4.6.2013	20,7	21	20,3	20
		20,4	20		
		20,3	20		
B288C_F003_S2	4.6.2013	24	24	23,3	23
		22,4	22		
		23,5	24		
B288C_F003_S3	4.6.2013	23,1	23	23,7	24
		23,8	24		
		23,9	24		
B288C_F003_S4	5.6.2013	27,7	28	27,5	28
		26,9	27		
Anmerkungen: nur mit 50 g Prüfgerät: FRÖWAG Nadelpenetrometer Typ 1.571 Prüfer: ■ Markus Hospodka					

Eindringtiefe Nadelpenetration	Messung		Gerundet	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]
B287C_F006_S1	29.8.2013	37,4 36,8	37 37	37,0	37
B287C_F006_S2	29.8.2013	38,0 38,0	38 38	38,0	38
B287C_F006_S3	29.8.2013	39,2 38,5	39 39	39,0	39
B287C_F006_S4	29.8.2013	39,3 38,8	39 39	39,0	39
B288C_F006_S1	4.9.2013	30,5 29,1 29,7	31 29 30	30,0	30
B288C_F006_S2	4.9.2013	32,3 33,3 33,1	32 33 33	32,7	33
B288C_F006_S3	4.9.2013	33,8 32,7 33	34 33 33	33,3	33
B288C_F006_S4	4.9.2013	35,2 34,1 34	35 34 34	34,3	34
Anmerkungen: nur mit 50 g Prüfgerät: FRÖWAG Nadelpenetrometer Typ 1.571 Prüfer: ■ Thomas Riedmayer					

Eindringtiefe Nadelpenetration	Messung		Gerundet	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]
B287C_F006_S1_W	30.8.2013	38,0	38	38,0	38
		37,7	38		
B287C_F006_S2_W	30.8.2013	40,1	40	40,0	40
		39,9	40		
B287C_F006_S3_W	30.8.2013	40,1	40	40,0	40
		39,6	40		
B287C_F006_S4_W	30.8.2013	39,8	40	40,0	40
		39,5	40		
B288C_F006_S1_W	21.11.2013	24,9	25	23,8	24
		23,1	23		
		23,5	24		
		23,4	23		
B288C_F006_S2_W	21.11.2013	23,5	24	23,0	23
		22,9	23		
		22,7	23		
		22,0	22		
B288C_F006_S3_W	21.11.2013	24,8	25	26,0	26
		25,7	26		
		26,6	27		
		25,5	26		
B288C_F006_S4_W	21.11.2013	26,3	26	26,0	26
		25,0	25		
		26,4	26		
		27,3	27		
Anmerkungen: nur mit 50 g Prüfgerät: FRÖWAG Nadelpenetrometer Typ 1.571 Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Marina Stoyanova					

Eindringtiefe Nadelpenetration	Messung		Gerundet	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]	[10/mm]
B287C_F012_S1	8.11.2013	35,8 34,0 34,4 35,1	36 34 34 35	34,3	34
B287C_F012_S2	8.11.2013	40,4 41,0 39,0 42,4	40 41 39 42	40,5	41
B287C_F012_S3	8.11.2013	40,0 39,5 38,6 38,5	40 40 39 39	39,5	40
B287C_F012_S4	8.11.2013	39,2 38,9 38,8 39,1	39 39 39 39	39,0	39
B288C_F012_S1	7.11.2013	29,2 28,0 29,4	29 28 29	28,7	29
B288C_F012_S2	7.11.2013	32,4 31,0 32,0 32,3	32 31 32 32	31,8	32
B288C_F012_S3	7.11.2013	31,1 30,2 29,9 30,9	31 30 30 31	30,5	31
B288C_F012_S4	7.11.2013	31,0 31,3 31,9 30,6	31 31 32 31	31,3	31
Anmerkungen: nur mit 50 g Prüfgerät: FRÖWAG Nadelpenetrometer Typ 1.571 Prüfer: Marina Stoyanova					

Elastische Rückstellung	Messung		Ausziehlänge [cm]	Mittelwert [cm]	Ergebnis [%]
	Prüfdatum	[cm]			
B287A	21.09.2012	2,5 2,7	20	2,60	13
B287C_LPAV	12.12.2012	2,8 2,9	20	2,85	3
B288A	21.09.2012	18,5 18,4	20	18,45	92
B288B_LRTF	26.09.2012	17,4 17,4	20	17,40	87
B288B_F000	24.10.2012	16,2 16,1	20	16,15	81
B288C_LPAV	25.11.2013	16,2 16,3	20	16,25	81
B288C_L000	21.10.2013	17,0 17,0	20	17,00	85
B288C_F000	21.10.2013	15,5 15,3	20	15,40	77
Anmerkungen: Prüfgerät: BUEHL+FAUBEL Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Makrus Hospodka, ■ Marina Stoyanova					

Elastische Rückstellung	Messung		Ausziehlänge [cm]	Mittelwert [cm]	Ergebnis [%]
	Prüfdatum	[cm]			
B288C_F003_S1	02.09.2013	4,0 10,0	17	7,00	41
B288C_F003_S2	02.09.2013	4,0 3,0	16	3,50	22
B288C_F003_S3	03.09.2013	6,0 6,0	15,5	6,00	39
B288C_F003_S4	03.09.2013	11,0 11,0	14,5	11,00	76
Anmerkungen: Bitumen von PEN Versuch verwendet Prüfgerät: BUEHL+FAUBEL Prüfer: ■ Thomas Riedmayer					

Elastische Rückstellung	Messung		Ausziehlänge	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[cm]	[cm]	[cm]	[%]
B288C_F006_S1	05.09.2013	12,0 14,0	19 20	13,00	67
B288C_F006_S2	05.09.2013	13,5 14,0	20	13,75	69
B288C_F006_S3	06.09.2013	15,0 15,0	20	15,00	75
B288C_F006_S4	06.09.2013	14,5 14,5	20	14,50	73
Anmerkungen: Prüfgerät: BUEHL+FAUBEL Prüfer: ■ Thomas Riedmayer					

Elastische Rückstellung	Messung		Ausziehlänge	Gerisslänge	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[%]
B288C_F006_S1_W	22.11.2013	7,7 8,0	12	12	7,85	65
B288C_F006_S2_W	22.11.2013	8,9 9,0	12	11	8,95	75
B288C_F006_S3_W	22.11.2013	10,8 10,7	15	14	10,75	72
B288C_F006_S4_W	22.11.2013	11,2 11,4	16	15	11,30	71
Anmerkungen: Prüfgerät: BUEHL+FAUBEL Prüfer: ■ Marina Stoyanova						

Elastische Rückstellung	Messung		Ausziehlänge	Mittelwert	Ergebnis
	Prüfdatum	[cm]	[cm]	[cm]	[%]
B288C_F012_S1	08.11.2013	13,7 13,5 ^{*)}	20	13,60	68
B288C_F012_S2	08.11.2013	14,7 14,8	20	14,75	74
B288C_F012_S3	08.11.2013	14,9 14,9	20	14,90	75
B288C_F012_S4	08.11.2013	14,4 14,6	20	14,50	73
Anmerkungen: Bitumen von PEN Versuch verwendet, ^{*)} gerissen bei 20 cm Prüfgerät: BUEHL+FAUBEL Prüfer: ■ Marina Stoyanova					

Dynamische Viskosität

Anmerkungen:

Prüfgerät: BROOKFIELD DV-III Programmable Rheometer

Prüfprogramm: von 120 °C bis 180 °C in 15 °C Schritten

Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Markus Hospodka, ■ Marina Stoyanova

B287A Prüfdatum: 27.08.2012 Spindel: SC4-21				B287B_LRTF Prüfdatum: 17.09.2012 Spindel: SC4-21				B287B_F000 Prüfdatum: 19.10.2012 Spindel: SC4-21			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	870		020	120	1 183		020	120	1 860		020
	873	872	020		1 183	1 184	020		1 865	1 863	020
	873		020		1 188		020		1 865		020
135	393		020	135	510		020	135	760		020
	393	392	020		510	510	020		758	758	020
	390		020		510		020		758		020
150	200		020	150	250		020	150	358		020
	200	200	020		250	250	020		355	356	020
	200		020		250		020		355		020
165	113		020	165	138		020	165	188		020
	113	113	020		135	137	020		190	188	020
	113		020		138		020		188		020
180	068		020	180	083		020	180	110		020
	070	68	020		080	82	020		110	110	020
	068		020		083		020		110		020

B287C_LPAV Prüfdatum: 25.09.2012 Spindel: SC4-27				B287C_L000 Prüfdatum: 25.11.2013 Spindel: SC4-27				B287C_F000 Prüfdatum: 26.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	2025,0		020	120	1 363		020	120	1 725		020
	2012,5	2 017	020		1 350	1 358	020		1 713	1 717	020
	2012,5		020		1 363		020		1 713		020
135	800,0		020	135	588		020	135	700		020
	800,0	800	020		588	588	020		713	708	020
	800,0		020		588		020		713		020
150	362,5		020	150	300		020	150	350		020
	375,0	367	020		300	296	020		350	346	020
	362,5		020		288		020		338		020
165	187,5		020	165	163		020	165	188		020
	200,0	192	020		163	163	020		188	188	020
	187,5		020		163		020		188		020
180	112,5		020	180	100		020	180	113		020
	112,5	108	020		100	104	020		100	108	020
	100,0		020		113		020		113		020
B287C_F003_S1 Prüfdatum: 27.11.2013 Spindel: SC4-27				B287C_F003_S2 Prüfdatum: 27.11.2013 Spindel: SC4-27				B287C_F003_S3 Prüfdatum: 28.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	1 513		020	120	1 488		020	120	1 463		020
	1 488	1 504	020		1 513	1 496	020		1 463	1 463	020
	1 513		020		1 488		020		1 463		020
135	625		020	135	638		020	135	625		020
	638	629	020		638	634	020		625	625	020
	625		020		625		020		625		020
150	313		020	150	325		020	150	313		020
	313	308	020		300	317	020		325	317	020
	300		020		325		020		313		020
165	175		020	165	175		020	165	175		020
	163	171	020		163	171	020		188	179	020
	175		020		175		020		175		020
180	113		020	180	100		020	180	125		020
	100	108	020		100	104	020		113	121	020
	113		020		113		020		125		020

B287C_F003_S4 Prüfdatum: 28.11.2013 Spindel: SC4-27				B287C_F006_S1 Prüfdatum: 29.08.2013 Spindel: SC4-21				B287C_F006_S2 Prüfdatum: 29.08.2013 Spindel: SC4-21			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	1 263		020	120	1 598		020	120	1 525		020
	1 275	1 271	020		1 590	1 591	020		1 523	1 523	020
	1 275		020		1 585		020		1 520		020
135	550		020	135	660		020	135	635		020
	538	542	020		658	658	020		638	637	020
	538		020		658		020		638		020
150	275		020	150	315		020	150	308		020
	263	271	020		315	315	020		305	307	020
	275		020		315		020		308		020
165	150		020	165	168		020	165	165		020
	150	150	020		168	168	020		165	165	020
	150		020		168		020		165		020
180	088		020	180	100		020	180	098		020
	100	92	020		100	100	020		098	97	020
	088		020		100		020		095		020

B287C_F006_S3 Prüfdatum: 30.08.2013 Spindel: SC4-21				B287C_F006_S4 Prüfdatum: 02.09.2013 Spindel: SC4-21				B287C_F006_S1_W Prüfdatum: 12.08.2013 Spindel: SC4-21			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	1 490		020	120	1 480		020	120	1 648		020
	1 493	1 492	020		1 483	1 482	020		1 648	1 648	020
	1 493		020		1 483		020		1 650		020
135	625		020	135	620		020	135	683		020
	625	624	020		620	621	020		680	681	020
	623		020		623		020		680		020
150	300		020	150	298		020	150	323		020
	300	300	020		300	298	020		320	322	020
	300		020		298		020		323		020
165	163		020	165	163		020	165	170		020
	163	162	020		160	162	020		170	170	020
	160		020		163		020		170		020
180	095		020	180	095		020	180	100		020
	095	95	020		098	96	020		100	100	020
	095		020		095		020		100		020

B287C_F006_S2_W Prüfdatum: 12.08.2013 Spindel: SC4-21				B287C_F006_S3_W Prüfdatum: 13.08.2013 Spindel: SC4-21				B287C_F006_S4_W Prüfdatum: 13.08.2013 Spindel: SC4-21			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	1 523		020	120	1 513		020	120	1 518		020
	1 523	1 522	020		1 513	1 513	020		1 513	1 513	020
	1 520		020		1 515		020		1 510		020
135	635		020	135	630		020	135	633		020
	635	635	020		630	630	020		633	633	020
	635		020		630		020		633		020
150	303		020	150	303		020	150	300		020
	303	303	020		303	302	020		300	300	020
	303		020		300		020		300		020
165	163		020	165	160		020	165	160		020
	160	162	020		163	161	020		163	162	020
	163		020		160		020		163		020
180	095		020	180	095		020	180	095		020
	093	93	020		095	95	020		095	95	020
	093		020		095		020		095		020

B287C_F012_S1 Prüfdatum: 18.11.2013 Spindel: SC4-27				B287C_F012_S2 Prüfdatum: 19.11.2013 Spindel: SC4-27				B287C_F012_S3 Prüfdatum: 19.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	1 788		020	120	1 538		020	120	1 525		020
	1 788	1 788	020		1 538	1 533	020		1 525	1 525	020
	1 788		020		1 525		020		1 525		020
135	750		020	135	650		020	135	650		020
	750	746	020		663	654	020		638	646	020
	738		020		650		020		650		020
150	363		020	150	325		020	150	313		020
	350	358	020		325	321	020		313	308	020
	363		020		313		020		300		020
165	200		020	165	188		020	165	163		020
	188	196	020		188	183	020		163	163	020
	200		020		175		020		163		020
180	113		020	180	113		020	180	088		020
	113	113	020		113	117	020		100	96	020
	113		020		125		020		100		020

B287C_F012_S4 Prüfdatum: 20.11.2013 Spindel: SC4-27				B288A Prüfdatum: 28.08.2012 Spindel: SC4-21				B288B_LRTF Prüfdatum: 12.09.2012 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	1 563		020	120	4 255		010	120	7 013		020
	1 563	1 563	020		4 260	4 262	010		7 000	7 004	020
	1 563		020		4 270		010		7 000		020
135	675		020	135	1 865		020	135	2 413		020
	663	667	020		1 848	1 854	020		2 413	2 408	020
	663		020		1 850		020		2 400		020
150	338		020	150	870		020	150	1 075		020
	338	333	020		870	870	020		1 063	1 067	020
	325		020		870		020		1 063		020
165	188		020	165	465		020	165	588		020
	175	179	020		463	463	020		575	579	020
	175		020		463		020		575		020
180	113		020	180	275		020	180	363		020
	113	113	020		278	277	020		350	358	020
	113		020		278		020		363		020

B288B_F000 Prüfdatum: 19.10.2012 Spindel: SC4-21				B288C_LPAV Prüfdatum: 18.03.2014 Spindel: SC4-27				B288C_L000 Prüfdatum: 26.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	5 950		008	120	12 275		020	120	7 350		020
	5 950	5 952	008		12 275	12 275	020		7 363	7 358	020
	5 956		008		12 275		020		7 363		020
135	1 920		020	135	3 638		020	135	2 325		020
	1 920	1 921	020		3 625	3 629	020		2 325	2 325	020
	1 923		020		3 625		020		2 325		020
150	820		020	150	1 375		020	150	975		020
	818	818	020		1 363	1 367	020		963	967	020
	818		020		1 363		020		963		020
165	430		020	165	663		020	165	525		020
	428	428	020		650	654	020		513	517	020
	428		020		650		020		513		020
180	247		020	180	375		020	180	300		020
	247	247	020		363	371	020		313	308	020
	247		020		375		020		313		020

B288C_F000 Prüfdatum: 26.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F003_S1 Prüfdatum: 28.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F003_S2 Prüfdatum: 29.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	6 275		020	120	29 950		005	120	26 417		009
	6 288	6 279	020		30 000	30 000	005		26 417	26 426	009
	6 275		020		30 050		005		26 444		009
135	2 088		020	135	7 750		015	135	7 038		020
	2 063	2 075	020		7 750	7 744	015		7 025	7 029	020
	2 075		020		7 733		015		7 025		020
150	888		020	150	2 588		020	150	2 438		020
	863	875	020		2 588	2 583	020		2 425	2 425	020
	875		020		2 575		020		2 413		020
165	450		020	165	1 100		020	165	1 050		020
	463	454	020		1 100	1 100	020		1 050	1 050	020
	450		020		1 100		020		1 050		020
180	263		020	180	550		020	180	538		020
	263	263	020		550	546	020		538	538	020
	263		020		538		020		538		020

B288C_F003_S3 Prüfdatum: 29.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F003_S4 Prüfdatum: 29.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F006_S1 Prüfdatum: 05.09.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	17 865		013	120	12 694		018	120	7 625		020
	17 788	17 782	013		12 694	12 690	018		7 625	7 629	020
	17 692		013		12 681		018		7 638		020
135	5 063		020	135	3 838		020	135	2 525		020
	5 063	5 058	020		3 825	3 829	020		2 513	2 513	020
	5 050		020		3 825		020		2 500		020
150	1 850		020	150	1 450		020	150	1 013		020
	1 838	1 838	020		1 463	1 454	020		1 013	1 008	020
	1 825		020		1 450		020		1 000		020
165	838		020	165	688		020	165	500		020
	825	829	020		688	688	020		500	500	020
	825		020		688		020		500		020
180	450		020	180	388		020	180	288		020
	425	438	020		375	383	020		288	288	020
	438		020		388		020		288		020

B288C_F006_S2 Prüfdatum: 25.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F006_S3 Prüfdatum: 06.09.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F006_S4 Prüfdatum: 06.09.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	7 200		020	120	7 113		020	120	7 150		020
	7 188	7 196	020		7 113	7 113	020		7 150	7 154	020
	7 200		020		7 113		020		7 163		020
135	2 350		020	135	2 388		020	135	2 375		020
	2 338	2 342	020		2 375	2 379	020		2 375	2 367	020
	2 338		020		2 375		020		2 350		020
150	963		020	150	963		020	150	963		020
	950	958	020		963	963	020		963	963	020
	963		020		963		020		963		020
165	488		020	165	500		020	165	488		020
	475	488	020		500	496	020		488	488	020
	500		020		488		020		488		020
180	275		020	180	288		020	180	275		020
	275	275	020		288	288	020		275	279	020
	275		020		288		020		288		020

B288C_F006_S1_W Prüfdatum: 22.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F006_S2_W Prüfdatum: 22.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F006_S3_W Prüfdatum: 22.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	15 467		015	120	13 883		015	120	11 425		020
	15 433	15 450	015		13 900	13 906	015		11 425	11 429	020
	15 450		015		13 933		015		11 438		020
135	4 525		020	135	4 125		020	135	3 513		020
	4 513	4 513	020		4 125	4 121	020		3 513	3 508	020
	4 500		020		4 113		020		3 500		020
150	1 675		020	150	1 550		020	150	1 363		020
	1 663	1 667	020		1 538	1 542	020		1 338	1 350	020
	1 663		020		1 538		020		1 350		020
165	775		020	165	725		020	165	650		020
	775	771	020		725	725	020		650	650	020
	763		020		725		020		650		020
180	413		020	180	388		020	180	350		020
	413	413	020		388	388	020		363	354	020
	413		020		388		020		350		020

B288C_F006_S4_W Prüfdatum: 25.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F012_S1 Prüfdatum: 20.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F012_S2 Prüfdatum: 20.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	12 567		015	120	8 500		020	120	7 275		020
	12 583	12 583	015		8 513	8 513	020		7 275	7 279	020
	12 600		015		8 525		020		7 288		020
135	3 775		020	135	2 763		020	135	2 413		020
	3 763	3 767	020		2 750	2 750	020		2 413	2 404	020
	3 763		020		2 738		020		2 388		020
150	1 450		020	150	1 088		020	150	975		020
	1 438	1 442	020		1 075	1 079	020		975	971	020
	1 438		020		1 075		020		963		020
165	688		020	165	538		020	165	500		020
	688	683	020		538	538	020		500	496	020
	675		020		538		020		488		020
180	375		020	180	300		020	180	288		020
	388	379	020		300	300	020		288	288	020
	375		020		300		020		288		020

B288C_F012_S3 Prüfdatum: 21.11.2013 Spindel: SC4-27				B288C_F012_S4 Prüfdatum: 21.11.2013 Spindel: SC4-27			
Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]	Temp. [°C]	Viscosity [mPa.s]		Speed [RPM]
120	7 150		020	120	7 250		020
	7 163	7 158	020		7 263	7 254	020
	7 163		020		7 250		020
135	2 388		020	135	2 425		020
	2 375	2 375	020		2 400	2 404	020
	2 363		020		2 388		020
150	963		020	150	975		020
	963	963	020		975	975	020
	963		020		975		020
165	513		020	165	500		020
	500	508	020		500	500	020
	513		020		500		020
180	300		020	180	288		020
	288	296	020		275	283	020
	300		020		288		020

Dynamic Shear Rheometer DSR

Anmerkungen:

Prüfgerät: HAAKE MARS II Modular Rheometer

Prüfgeometrie: PP08, 2 mm Spalt

Prüfprogramm: -10 bis +40 °C bei 0,1; 1; 3; 5 und 10 Hz

Prüfer: ■ Markus Hospodka, ■ Marina Stoyanova

B287A										
Prüfdatum: 04.12.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	81 364 000	31,3	155 352 632	21,2	201 975 000	17,3	225 200 000	15,8	259 311 905	14,0
0	23 307 778	47,4	60 080 000	34,5	90 412 000	29,4	107 015 789	27,3	133 695 000	24,6
10	3 369 421	65,3	13 427 222	51,9	24 561 000	46,4	31 742 500	44,0	44 224 634	40,7
20	306 174	76,9	1 794 278	67,7	4 001 368	63,4	5 676 300	61,3	8 953 000	58,3
30	29 973	83,2	218 879	77,3	554 747	74,8	844 406	73,5	1 471 533	71,6
40	4 121	86,6	33 377	82,6	89 725	81,1	140 750	80,6	254 540	79,9

B287B_LRTF										
Prüfdatum: 03.12.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	108 960 000	25,9	189 285 000	18,2	239 383 333	15,0	263 694 737	13,9	299 158 140	12,4
0	37 436 000	39,4	82 356 250	29,4	117 961 111	25,2	137 110 526	23,6	166 926 190	21,3
10	7 249 833	56,1	22 778 235	44,2	38 220 000	39,6	47 632 778	37,6	63 229 024	35,0
20	831 411	69,7	3 850 412	59,4	7 703 316	55,2	10 434 000	53,3	15 393 902	50,7
30	91 699	78,1	561 174	70,3	1 302 400	67,3	1 899 000	65,8	3 109 476	63,7
40	12 740	83,5	92 380	77,3	233 416	75,0	354 747	74,2	614 967	72,8

B287C_PAV										
Prüfdatum: 03.12.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	137 057 895	20,5	215 715 789	15,4	263 368 421	13,0	286 211 765	12,1	320 272 093	11,0
0	56 330 000	30,7	105 247 368	24,0	142 161 111	21,0	161 533 333	19,7	190 975 000	18,1
10	15 027 368	44,5	36 353 333	35,7	55 358 947	32,2	66 402 000	30,7	83 920 455	28,8
20	2 353 474	59,3	8 037 211	49,4	14 215 556	45,7	18 186 842	44,3	24 943 571	42,2
30	318 422	69,7	1 485 444	60,6	3 044 053	57,4	4 179 389	55,9	6 317 488	53,9
40	48 873	77,1	286 206	68,8	652 158	66,2	944 695	65,0	1 538 930	63,4

B287C_F003_S1										
Prüfdatum: 12.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	123 215 000	22,6	199 052 941	16,6	246 485 000	14,0	269 733 333	13,0	303 126 829	11,8
0	46 575 263	34,5	92 321 111	26,4	127 030 000	22,9	145 863 158	21,5	173 963 158	19,7
10	10 675 556	49,8	28 814 706	39,3	45 666 500	35,3	55 649 500	33,6	71 825 581	31,4
20	1 468 579	64,4	5 765 111	53,9	10 754 000	49,8	14 075 000	48,2	19 885 854	45,8
30	174 163	74,3	935 232	65,6	2 041 737	62,3	2 886 100	60,7	4 516 721	58,6
40	24 616	81,0	164 167	73,5	395 742	70,9	588 416	69,8	989 544	68,3

B287C_F003_S2										
Prüfdatum: 12.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	115 560 000	23,0	190 263 158	16,9	235 477 778	14,3	258 105 263	13,2	290 212 195	12,0
0	43 064 000	34,9	87 892 778	26,8	121 757 895	23,2	140 010 526	21,8	167 376 744	20,0
10	9 888 500	50,3	27 037 778	39,8	43 061 667	35,7	52 599 444	34,0	68 004 500	31,7
20	1 337 111	65,0	5 342 000	54,3	10 031 765	50,3	13 164 211	48,6	18 645 238	46,2
30	156 667	74,9	857 928	66,1	1 886 389	62,8	2 676 800	61,3	4 211 462	59,0
40	21 761	81,4	146 594	74,1	355 483	71,6	530 505	70,5	894 990	68,9

B287C_F003_S3										
Prüfdatum: 13.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	110 860 000	23,9	184 123 529	17,5	229 795 000	14,7	252 220 000	13,6	285 909 524	12,3
0	40 008 421	36,3	82 588 947	27,7	115 230 000	24,0	133 152 632	22,6	160 628 947	20,6
10	8 772 526	51,9	24 849 412	41,1	40 136 471	36,9	49 266 842	35,2	64 178 974	32,9
20	1 128 105	66,3	4 690 474	55,8	8 953 737	51,7	11 858 947	50,0	17 017 727	47,5
30	130 378	75,8	738 706	67,4	1 649 947	64,1	2 361 722	62,6	3 757 548	60,4
40	18 531	82,0	127 922	75,0	314 000	72,6	471 468	71,5	802 378	70,0

B287C_F003_S4										
Prüfdatum: 13.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	101 941 500	23,9	170 044 444	17,6	212 455 556	14,8	233 584 211	13,8	264 044 186	12,5
0	37 111 579	36,0	76 742 222	27,6	107 236 842	24,0	123 940 000	22,6	148 826 829	20,7
10	8 353 167	51,5	23 452 222	40,7	37 723 889	36,6	46 258 000	35,0	60 320 000	32,6
20	1 107 474	65,9	4 542 947	55,3	8 625 789	51,2	11 387 000	49,5	16 277 317	47,1
30	126 400	75,5	706 867	67,0	1 571 389	63,7	2 242 650	62,2	3 557 342	60,0
40	17 540	81,9	119 833	74,8	293 033	72,3	439 247	71,2	745 526	69,7

B287C_F006_S1										
Prüfdatum: 07.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	130 405 263	21,1	203 847 368	15,8	249 935 000	13,3	273 233 333	12,4	308 527 907	11,3
0	49 787 000	33,1	96 138 500	25,5	131 127 778	22,1	149 545 000	20,8	178 690 244	19,0
10	12 175 263	48,3	31 850 000	38,1	49 713 000	34,1	60 192 778	32,6	77 435 676	30,4
20	1 717 842	63,3	6 526 000	52,7	11 990 000	48,6	15 593 500	46,9	21 908 333	44,6
30	199 561	73,7	1 055 667	64,8	2 277 895	61,4	3 205 500	59,8	5 002 780	57,6
40	27 799	80,6	182 322	73,0	436 795	70,3	648 000	69,2	1 088 211	67,6

B287C_F006_S2										
Prüfdatum: 10.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	125 795 000	22,2	201 441 176	16,4	248 857 895	13,8	271 652 632	12,9	307 039 024	11,7
0	46 741 000	34,4	93 318 889	26,3	129 036 842	22,8	148 068 421	21,4	176 836 585	19,5
10	10 777 059	49,9	29 153 889	39,3	46 186 000	35,2	56 223 000	33,5	72 765 349	31,3
20	1 447 833	64,8	5 741 500	54,0	10 731 053	49,9	14 074 000	48,2	19 975 682	45,9
30	163 589	74,8	894 222	66,1	1 962 250	62,7	2 783 500	61,2	4 389 119	59,0
40	22 556	81,4	152 200	74,1	369 450	71,6	552 190	70,1	934 280	68,9

B287C_F006_S3										
Prüfdatum: 10.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	121 835 000	22,8	198 355 000	16,7	245 742 105	14,0	269 321 053	13,0	303 344 186	11,8
0	46 579 474	34,6	93 161 875	26,3	128 920 000	22,8	148 020 000	21,4	176 854 762	19,6
10	10 840 526	49,9	29 351 667	39,3	46 479 444	35,2	56 637 000	33,5	73 161 395	31,2
20	1 481 947	64,7	5 869 105	54,0	10 962 222	49,9	14 362 632	48,1	20 335 116	45,7
30	167 737	74,8	917 395	66,1	2 015 368	62,7	2 858 600	61,1	4 496 909	58,9
40	23 403	81,4	158 163	74,1	383 900	71,5	572 447	70,4	969 305	68,8

B287C_F006_S4										
Prüfdatum: 10.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	124 236 842	22,7	202 000 000	16,6	249 531 579	13,9	272 785 000	12,9	306 717 073	11,7
0	46 901 000	34,6	93 888 421	26,3	129 352 941	22,8	148 242 105	21,4	177 148 780	19,5
10	11 070 526	49,9	30 060 000	39,3	47 663 158	35,2	58 077 368	33,5	74 866 136	31,2
20	1 508 333	64,8	5 987 500	54,0	11 206 316	49,9	14 674 000	48,2	20 769 524	45,8
30	172 447	74,8	943 621	66,0	2 072 211	62,7	2 941 211	61,2	4 627 190	58,9
40	24 137	81,4	163 641	74,0	397 615	71,5	594 141	70,4	1 006 405	68,7

B287C_F006_S1_W										
Prüfdatum: 13.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	126 480 000	21,9	204 461 111	16,2	251 089 474	13,6	273 675 000	12,7	307 041 026	11,5
0	49 277 895	33,1	97 191 000	25,5	132 688 889	22,1	151 436 842	20,8	180 204 878	19,0
10	12 026 111	48,1	31 312 105	38,0	48 833 158	34,1	59 155 789	32,5	75 617 674	30,3
20	1 724 316	63,1	6 506 667	52,4	11 915 263	48,4	15 489 500	46,7	21 615 714	44,5
30	207 337	73,4	1 081 222	64,4	2 324 737	61,0	3 262 263	59,4	5 048 190	57,2
40	29 160	80,3	189 700	72,6	452 735	70,0	669 453	68,8	1 117 625	67,1

B287C_F006_S2_W										
Prüfdatum: 13.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	117 770 000	23,1	195 305 263	16,9	241 720 000	14,2	264 377 778	13,2	296 304 651	11,9
0	44 953 500	34,7	91 319 474	26,6	126 044 444	23,0	144 715 789	21,6	172 338 636	19,8
10	10 326 316	50,0	28 035 000	39,5	44 478 333	35,4	54 233 500	33,8	69 963 256	30,7
20	1 407 056	64,7	5 580 158	54,0	10 442 105	50,0	13 692 000	48,2	19 354 286	45,9
30	163 900	74,6	891 428	65,9	1 952 368	62,5	2 763 250	61,0	4 341 098	58,8
40	22 716	81,3	152 738	73,9	369 689	71,3	550 842	70,2	928 026	68,6

B287C_F006_S3_W										
Prüfdatum: 13.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	117 060 000	23,3	193 468 421	16,9	240 760 000	14,2	264 322 222	13,1	296 976 744	11,9
0	45 009 500	35,1	90 336 316	26,7	125 061 111	23,1	143 900 000	21,7	170 886 047	19,8
10	10 321 111	50,7	28 461 765	39,9	45 395 000	35,8	55 446 316	34,1	71 701 714	31,8
20	1 376 105	65,3	5 559 211	54,7	10 486 842	50,5	13 799 474	48,8	19 573 636	46,4
30	158 826	75,2	878 717	66,5	1 942 421	63,2	2 763 250	61,6	4 354 744	59,4
40	22 545	81,6	154 471	74,4	376 806	71,8	562 816	70,7	954 693	69,1

B287C_F006_S4_W										
Prüfdatum: 13.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	111 615 000	23,1	182 710 526	17,0	226 921 053	14,3	248 747 368	13,3	278 990 000	12,1
0	42 624 000	34,6	84 881 111	26,6	117 177 778	23,1	134 530 000	21,7	159 202 439	19,9
10	9 986 526	49,9	27 056 316	39,4	42 843 684	35,4	52 211 000	33,8	67 397 250	31,5
20	1 372 474	64,6	5 419 722	53,9	10 120 000	49,8	13 260 526	48,1	18 738 293	45,8
30	158 689	74,6	861 600	65,9	1 887 474	62,5	2 676 550	60,9	4 193 500	58,7
40	22 036	81,3	147 900	73,9	358 147	71,3	533 900	70,2	897 488	68,6

B287C_F012_S1										
Prüfdatum: 21.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	122 231 579	21,1	191 005 000	16,0	233 595 000	13,5	254 461 111	12,7	284 966 667	11,6
0	47 195 000	32,3	90 933 889	25,0	123 521 053	21,8	140 673 684	20,6	167 095 349	18,9
10	11 958 947	46,8	30 227 000	37,1	46 736 316	33,4	56 345 000	31,8	71 800 000	29,8
20	1 779 737	61,8	6 465 737	51,2	11 676 000	47,3	15 089 000	45,7	20 936 341	43,5
30	219 168	72,4	1 109 722	63,3	2 354 059	59,8	3 276 850	58,3	5 044 463	56,0
40	31 236	79,6	198 600	71,7	468 417	69,0	688 955	67,8	1 144 698	65,7

B287C_F012_S2										
Prüfdatum: 21.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	134 740 000	22,1	215 594 444	16,2	265 695 000	13,6	290 311 111	12,6	325 563 415	11,4
0	50 675 500	34,2	100 085 000	26,0	137 917 647	22,5	157 978 947	21,1	187 838 095	19,2
10	11 881 053	49,6	31 988 750	39,1	50 608 889	35,0	61 622 105	33,4	79 224 524	31,1
20	1 611 579	64,5	6 340 105	53,8	11 827 222	49,8	15 494 737	48,1	21 880 465	45,7
30	188 547	74,6	1 024 550	65,8	2 241 632	62,4	3 174 474	60,8	4 980 488	58,6
40	26 639	81,2	179 395	73,8	434 995	71,2	648 220	70,1	1 094 410	68,5

B287C_F012_S3										
Prüfdatum: 24.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	125 460 000	22,0	200 300 000	16,3	246 421 053	13,7	268 857 895	12,8	304 207 143	11,6
0	46 516 842	34,0	92 742 632	26,0	127 180 000	22,6	145 494 444	21,2	174 371 429	19,4
10	11 025 556	49,4	29 470 625	38,9	46 430 526	34,9	56 448 000	33,2	72 962 000	31,0
20	1 500 889	64,4	5 872 368	53,6	10 917 895	49,5	14 279 500	47,8	20 203 171	45,5
30	173 984	74,5	940 050	65,7	2 052 053	62,2	2 904 200	60,7	4 559 100	58,4
40	23 857	81,2	160 005	73,8	386 010	71,2	575 500	70,1	970 850	68,5

B287C_F012_S4										
Prüfdatum: 24.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	125 805 263	22,3	201 950 000	16,4	248 685 000	13,7	271 978 947	12,7	306 070 000	11,6
0	48 314 737	34,0	94 872 105	26,0	130 221 053	22,5	149 270 000	21,1	177 602 381	19,3
10	11 521 111	49,3	30 750 556	38,8	48 436 111	34,8	58 882 632	33,1	75 588 372	30,9
20	1 581 556	64,3	6 178 000	53,5	11 480 000	49,4	14 987 222	47,7	21 092 326	45,4
30	183 421	74,4	991 088	65,6	2 159 944	62,2	3 057 053	60,6	4 777 024	58,3
40	25 609	81,2	171 529	73,7	414 732	71,1	616 379	70,0	1 039 692	68,3

B288A										
Prüfdatum: 05.12.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	45 120 000	32,8	88 752 632	25,2	120 850 000	21,8	137 905 263	20,5	163 617 073	18,7
0	12 748 889	45,2	32 073 529	36,3	49 230 556	32,5	59 081 111	31,0	75 699 250	28,9
10	2 248 941	57,5	7 567 941	48,7	13 395 000	45,2	17 153 000	43,7	23 873 250	41,6
20	320 259	64,1	1 353 389	59,2	2 743 368	56,8	3 752 100	55,7	5 665 619	54,1
30	53 470	64,5	236 968	64,2	521 630	64,0	749 526	63,7	1 215 419	63,0
40	12 615	63,2	52 336	64,0	115 095	65,8	166 853	66,7	273 805	67,5

B288B_LRTF										
Prüfdatum: 05.12.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	56 471000	28,1	104 463 158	22,1	137 868 421	19,3	155 510 000	18,2	182 100 000	16,7
0	19 408 500	37,8	42 141 176	31,1	61 210 000	28,1	72 215 882	26,8	89 539 000	25,2
10	4 452 889	49,3	12 216 111	41,7	19 925 000	38,7	24 700 000	37,6	32 830 000	35,8
20	751 021	58,5	2 648 389	52,1	4 887 400	49,6	6 404 158	48,5	9 141 357	47,1
30	132 800	62,8	547 841	59,4	1 124 294	57,9	1 554 600	57,1	2 386 442	55,9
40	30 235	62,5	126 016	62,2	271 158	62,5	386 265	62,5	618 014	62,2

B288C_PAV										
Prüfdatum: 06.12.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	77 872 000	23,8	132 838 889	19,3	169 725 000	17,0	188 760 000	16,1	218 392 308	15,0
0	29 993 158	31,8	57 954 211	27,0	80 383 889	24,5	93 050 500	23,5	113 150 000	22,2
10	8 206 667	42,0	19 132 941	36,2	29 354 706	33,8	35 404 500	32,9	45 506 047	30,5
20	1 645 316	51,4	4 773 526	45,7	8 116 105	43,7	10 248 421	42,9	13 985 581	41,8
30	328 817	57,3	1 153 222	52,8	2 171 200	51,1	2 882 750	50,4	4 197 500	49,4
40	79 481	60,1	306 513	57,2	615 328	56,4	845 868	56,0	1 290 116	55,4

B288C_F003_S1										
Prüfdatum: 13.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	100 043 000	19,1	155 766 667	16,3	192 405 000	14,6	211 094 737	13,9	238 870 000	13,0
0	46 135 789	25,0	78 427 500	22,2	103 273 684	20,4	116 765 000	19,8	137 610 000	18,8
10	16 394 118	32,7	31 862 778	29,2	45 123 500	27,4	52 668 500	26,8	64 742 093	25,9
20	4 419 556	41,3	10 032 941	37,1	15 386 000	35,5	18 573 000	35,0	23 804 048	34,3
30	1 050 105	48,5	2 868 278	44,0	4 806 947	42,5	6 042 053	42,0	8 196 045	41,3
40	271 032	53,0	848 482	49,1	1 529 684	48,0	1 997 158	47,6	2 844 205	47,0

B288C_F003_S2										
Prüfdatum: 14.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	109 130 000	19,7	172 242 105	16,5	212 850 000	14,6	233 555 000	14,0	265 397 500	13,0
0	47 853 333	26,3	84 161 765	22,9	111 890 000	20,9	126 747 368	20,2	150 300 000	19,2
10	15 872 105	34,7	31 973 500	30,5	46 029 412	28,6	54 092 500	27,9	67 021 591	26,8
20	3 974 944	43,8	9 540 833	39,1	14 965 263	37,3	18 234 000	36,7	23 651 220	35,8
30	890 083	50,9	2 584 222	46,2	4 450 350	44,6	5 667 100	44,0	7 812 364	43,2
40	221 874	55,2	734 979	51,2	1 363 389	50,1	1 805 211	49,7	2 605 000	49,0

B288C_F003_S3										
Prüfdatum: 14.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	89 128 000	20,8	144 168 421	17,4	180 460 000	15,5	199 020 000	14,8	226 834 146	13,8
0	38 642 632	27,5	69 388 889	23,9	92 724 211	21,9	105 294 737	21,1	126 443 182	20,0
10	12 629 474	36,1	26 185 294	31,6	38 143 000	29,7	45 068 947	28,9	56 214 146	27,8
20	3 056 211	45,3	7 589 632	40,3	12 094 737	38,4	14 841 000	37,8	19 443 182	36,8
30	663 812	52,3	1 999 882	47,5	3 504 056	45,8	4 495 737	45,2	6 257 356	44,3
40	162 089	56,4	555 750	52,5	1 045 950	51,4	1 394 750	51,0	2 038 976	50,3

B288C_F003_S4										
Prüfdatum: 14.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	90 235 500	21,9	146 833 333	18,0	185 885 000	15,8	205 110 526	15,0	234 636 585	14,0
0	38 069 000	29,3	69 486 667	25,0	94 617 500	22,8	108 536 842	21,9	129 864 286	20,6
10	11 845 556	38,7	25 915 294	33,5	38 530 000	31,2	45 878 500	30,3	57 802 273	28,4
20	2 722 368	48,2	7 259 526	42,6	11 888 000	40,5	14 772 632	39,7	19 614 524	38,7
30	587 576	54,9	1 904 611	49,9	3 441 600	48,1	4 478 700	47,4	6 341 500	46,4
40	138 663	58,7	506 700	54,9	983 670	53,9	1 331 278	53,4	1 985 683	52,7

B288C_F006_S1										
Prüfdatum: 11.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	89 881 500	22,5	147 016 667	18,2	185 320 000	15,9	205 330 000	15,1	236 011 905	14,0
0	36 376 842	30,7	67 747 500	25,8	92 866 842	23,4	106 440 000	22,4	128 556 818	21,0
10	10 403 333	41,3	23 819 000	35,1	36 048 000	32,6	43 212 105	31,6	55 195 946	29,9
20	2 094 316	51,8	6 075 800	45,2	10 257 000	42,9	12 909 500	41,9	17 483 256	40,6
30	384 453	58,9	1 377 526	53,3	2 600 722	51,4	3 451 750	50,6	5 021 023	49,4
40	83 427	62,5	335 611	58,4	680 956	57,4	940 940	56,9	1 446 024	56,2

B288C_F006_S2										
Prüfdatum: 11.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	95 599 000	23,2	159 511 111	18,5	201 885 000	16,1	223 788 889	15,2	256 397 500	14,0
0	37 754 211	31,8	73 037 368	26,5	100 889 474	23,8	116 177 778	22,7	140 100 000	21,3
10	10 208 421	42,7	24 058 235	36,1	36 870 000	33,4	44 441 000	32,4	56 900 000	30,8
20	1 983 944	53,1	5 961 684	46,4	10 219 444	44,0	12 945 000	43,0	17 665 814	41,6
30	355 384	59,9	1 312 421	54,5	2 516 833	52,6	3 370 350	51,8	4 942 591	50,5
40	76 297	63,2	313 918	59,4	645 972	58,5	899 080	58,0	1 395 636	56,7

B288C_F006_S3										
Prüfdatum: 11.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	89 726 500	23,6	149 782 353	18,8	190 517 647	16,4	211 565 000	15,5	243 250 000	14,3
0	35 887 500	32,2	68 807 895	26,7	95 566 471	24,1	109 905 000	23,0	132 728 205	21,6
10	9 711 944	43,1	23 125 500	36,4	35 550 556	33,6	42 907 895	32,6	55 015 122	31,0
20	1 938 368	53,5	5 874 250	46,6	10 091 053	44,1	12 803 684	43,1	17 474 762	41,7
30	369 653	60,1	1 377 222	54,6	2 643 500	52,6	3 535 300	51,7	5 186 523	50,4
40	79 968	63,5	331 695	59,6	683 668	58,6	952 684	58,1	1 477 244	57,3

B288C_F006_S4										
Prüfdatum: 12.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	92 691 500	23,1	153 431 579	18,5	194 610 000	16,1	215 661 111	15,2	248 043 590	14,1
0	36 671 579	31,8	69 753 889	26,5	96 367 778	23,9	111 026 316	22,8	134 439 535	21,4
10	9 789 000	42,9	23 148 421	36,2	35 517 000	33,5	42 835 500	32,4	54 914 773	30,9
20	1 890 632	53,5	5 714 526	46,7	9 817 150	44,1	12 432 500	43,1	16 999 302	41,8
30	337 511	60,3	1 256 882	54,8	2 419 150	52,8	3 240 842	52,0	4 763 841	50,7
40	71 912	63,5	298 411	59,7	615 785	58,8	858 478	58,3	1 332 190	57,6

B288C_F006_S1_W										
Prüfdatum: 11.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	108 588 889	19,9	168 438 889	16,6	209 857 895	14,7	230 710 526	13,9	261 443 182	13,0
0	45 586 842	27,5	80 560 526	23,6	108 100 000	21,5	123 210 526	20,7	146 280 488	19,5
10	14 661 111	36,7	30 795 263	31,9	44 897 895	29,7	53 038 421	28,9	66 144 524	27,7
20	3 432 263	46,4	8 744 667	41,0	14 035 789	39,0	17 278 500	38,3	22 662 857	37,3
30	716 495	53,7	2 234 632	48,6	3 964 111	46,8	5 117 053	46,1	7 159 674	45,2
40	169 763	57,9	602 510	53,7	1 152 650	52,6	1 546 842	52,1	2 282 822	51,4

B288C_F006_S2_W										
Prüfdatum: 11.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	100 273 000	21,4	162 094 118	17,5	203 868 421	15,4	225 263 158	14,6	256 526 829	13,5
0	42 187 000	29,0	76 901 053	24,7	104 521 053	22,4	119 626 316	21,5	142 990 244	20,2
10	12 974 706	38,7	28 325 789	33,4	42 097 222	31,1	50 073 684	30,2	62 970 526	28,9
20	2 878 421	48,5	7 728 700	42,8	12 681 053	40,7	15 761 111	39,9	20 909 286	38,8
30	574 961	55,6	1 887 056	50,4	3 431 444	48,7	4 486 800	47,9	6 361 929	46,9
40	133 356	59,4	494 812	55,4	967 330	54,3	1 315 947	53,9	1 968 143	53,2

B288C_F006_S3_W										
Prüfdatum: 12.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	91 825 000	21,7	149 316 667	17,8	188 473 684	15,7	208 405 882	14,9	237 968 293	13,8
0	38 518 947	29,2	70 475 789	24,9	96 114 444	22,6	110 200 000	21,8	131 904 651	20,5
10	11 518 333	38,8	25 114 211	33,5	37 359 000	31,2	44 476 000	30,4	56 031 860	29,1
20	2 533 526	48,6	6 805 316	42,9	11 171 579	40,7	13 893 158	40,0	18 504 318	38,9
30	504 478	55,7	1 657 500	50,5	3 020 053	48,7	3 947 650	48,0	5 608 116	47,0
40	115 918	59,5	430 900	55,5	842 137	54,5	1 145 000	54,0	1 718 452	53,3

B288C_F006_S4_W										
Prüfdatum: 12.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	97 562 500	21,1	155 895 000	17,4	195 178 947	15,3	215 505 000	14,5	245 539 024	13,5
0	41 381 579	28,6	74 188 421	24,5	100 211 765	22,2	114 410 000	21,4	136 351 220	20,2
10	12 780 526	38,1	27 556 316	33,0	40 705 000	30,7	48 359 000	29,9	60 696 591	28,6
20	2 870 263	47,9	7 594 947	42,2	12 380 000	40,2	15 350 000	39,4	20 330 000	38,3
30	581 784	55,0	1 882 263	49,8	3 395 474	48,1	4 416 650	47,4	6 244 146	46,4
40	135 567	58,8	495 205	54,9	960 489	53,8	1 300 650	53,4	1 938 884	52,7

B288C_F012_S1										
Prüfdatum: 24.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	94 540 000	22,2	154 116 667	18,0	194 094 444	15,8	214 568 421	14,9	245 355 000	13,8
0	38 858 889	30,5	72 405 000	25,6	99 127 368	23,1	113 794 444	22,2	135 704 878	20,8
10	11 163 333	41,0	25 476 000	34,9	38 472 000	32,4	46 064 211	31,4	58 514 186	29,9
20	2 284 684	51,5	6 566 550	45,0	11 047 368	42,6	13 889 474	41,7	18 708 095	40,4
30	424 912	58,6	1 508 526	53,0	2 836 722	51,1	3 761 000	50,3	5 448 864	49,1
40	92 598	62,2	370 700	58,2	749 865	57,1	1 035 474	56,7	1 585 829	55,9

B288C_F012_S2										
Prüfdatum: 25.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	90 503 000	23,3	151 877 778	18,6	193 442 105	16,2	214 917 647	15,4	247 555 000	14,1
0	35 295 263	32,0	67 972 941	26,7	94 437 647	24,1	109 150 000	23,0	132 334 884	21,6
10	9 636 059	43,0	22 892 500	36,4	35 182 500	33,8	42 432 000	32,7	54 466 190	31,2
20	1 846 842	53,4	5 590 684	46,8	9 610 800	44,4	12 198 000	43,4	16 705 000	42,1
30	332 328	60,0	1 233 375	54,8	2 376 700	52,9	3 184 600	52,1	4 685 186	50,9
40	71 997	63,2	297 053	59,5	612 380	58,7	851 335	58,3	1 322 795	57,1

B288C_F012_S3										
Prüfdatum: 25.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	91 715 000	22,9	150 742 105	18,3	190 963 158	16,0	211 066 667	15,2	242 138 095	14,0
0	35 735 789	31,8	68 128 947	26,5	93 796 316	23,9	108 147 368	22,8	130 239 024	21,4
10	9 831 167	42,9	23 276 667	36,2	35 677 368	33,5	42 979 474	32,4	55 062 250	30,9
20	1 891 526	53,5	5 717 438	46,7	9 826 000	44,2	12 478 333	43,1	17 021 220	41,8
30	333 979	60,4	1 247 882	54,9	2 402 158	52,9	3 225 700	52,1	4 740 881	50,8
40	70 988	63,8	296 306	59,8	612 335	58,9	854 310	58,5	1 325 947	57,7

B288C_F012_S4										
Prüfdatum: 25.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
-10	83 567 000	23,4	140 115 789	18,7	178 500 000	16,4	198 244 444	15,5	227 779 070	14,3
0	33 518 947	31,9	64 287 647	26,6	89 030 526	24,0	102 717 647	22,9	124 250 000	21,5
10	9 321 167	42,8	22 056 500	36,2	33 790 526	33,5	40 702 000	32,4	52 166 977	30,9
20	1 793 111	53,5	5 435 684	46,6	9 337 000	44,1	11 840 000	43,1	16 182 500	41,7
30	316 656	60,3	1 182 278	54,8	2 278 941	52,9	3 054 850	52,0	4 491 341	50,8
40	67 154	63,5	278 421	59,8	576 139	58,9	803 160	58,5	1 248 769	57,7

Dynamic Shear Rheometer DSR

Anmerkungen:

Prüfgerät: HAAKE MARS II Modular Rheometer

Prüfgeometrie: PP25, 1 mm Spalt

Prüfprogramm: +30 bis +80 °C bei 0,1; 1; 3; 5 und 10 Hz

Prüfer: ■ Markus Hospodka, ■ Marina Stoyanova

B287A										
Prüfdatum: 19.08.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	21 782	83,6	169 842	76,0	443 255	70,2	682 174	66,2	1 209 767	59,0
40	3 330	87,0	28 846	82,6	79 577	80,2	126 216	78,9	234 350	76,3
50	597	88,9	5 513	86,2	15 714	84,8	25 523	84,2	48 606	83,1
60	144	89,8	1 307	88,3	3 805	87,4	6 263	87,1	12 087	86,5
70	45	89,9	380	89,5	1 117	89,2	1 843	89,1	3 595	88,9
80	18	89,3	135	89,6	392	89,4	646	89,1	1 253	88,9

B287B_LRFT										
Prüfdatum: 19.08.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	52 642	78,9	350 088	67,9	834 875	59,7	1 220 550	54,5	2 027 750	46,0
40	7 824	84,3	61 676	77,6	158 737	74,1	245 720	72,2	437 093	68,5
50	1 290	87,5	11 372	83,1	31 247	81,0	49 479	79,9	91 564	78,3
60	272	89,2	2 548	86,4	7 238	85,0	11 741	84,4	22 207	83,3
70	73	89,9	692	88,5	2 008	87,5	3 302	87,2	6 338	86,5
80	25	89,8	226	89,8	663	89,4	1 094	89,4	2 112	89,1

B287C_PAV										
Prüfdatum: 20.08.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	212 547	67,9	1 017 778	50,8	1 985 150	39,7	2 581 450	34,2	-	-
40	33 622	77,0	204 311	67,1	471 433	61,4	685 155	58,1	1 107 738	52,3
50	5 375	82,2	39 026	75,6	98 095	72,5	149 084	70,9	257 935	68,3
60	1 044	83,3	8 355	80,9	22 428	78,8	35 103	77,8	63 270	76,2
70	260	83,2	2 103	84,5	5 871	83,1	9 394	82,4	17 477	81,2
80	81	83,1	627	86,7	1 791	86,1	2 913	85,7	5 528	84,8

B287C_F003_S1										
Prüfdatum: 21.08.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	111 050	74,0	630 244	59,5	1 373 263	49,3	1 908 789	43,4	-	-
40	16 184	81,4	113 437	72,9	279 689	68,4	420 405	65,7	712 767	60,9
50	2 484	86,1	20 531	80,3	54 403	77,5	84 594	76,2	151 476	74,1
60	489	88,6	4 398	84,7	12 314	82,7	19 712	81,9	36 411	80,5
70	125	89,7	1 140	87,5	3 273	86,1	5 338	85,5	10 110	84,6
80	41	89,9	350	89,3	1 024	88,4	1 686	88,2	3 224	87,4

B287C_F003_S2										
Prüfdatum: 02.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	100 944	74,8	594 432	60,8	1 314 118	50,7	1 833 944	45,0	-	-
40	14 673	82,1	105 047	73,7	260 637	69,4	394 647	66,8	678 702	62,0
50	2 263	86,5	19 142	80,8	51 106	78,2	79 781	76,9	144 526	74,8
60	452	88,7	4 171	85,1	11 677	83,2	18 769	82,3	35 127	81,0
70	115	89,7	1 090	87,8	3 146	86,4	5 136	85,9	9 821	85,0
80	36	89,9	338	89,3	989	88,7	1 628	88,4	3 152	88,0

B287C_F003_S3										
Prüfdatum: 03.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	98 453	75,0	581 437	61,0	1 289 611	51,0	1 814 650	45,3	-	-
40	14 383	82,2	103 195	73,9	255 400	69,6	386 985	67,0	670 095	62,3
50	2 224	86,5	18 716	81,0	49 768	78,3	77 952	77,0	141 525	75,0
60	444	88,8	4 079	85,2	11 436	83,3	18 363	82,5	34 437	81,1
70	114	89,7	1 068	87,8	3 078	86,5	5 041	86,0	9 639	85,1
80	37	89,9	331	89,4	970	88,7	1 599	88,5	3 094	88,1

B287C_F003_S4										
Prüfdatum: 03.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	102 870	74,8	597 847	60,7	1 314 150	50,4	1 847 500	44,7	-	-
40	14 614	82,2	105 217	73,9	261 484	69,5	394 605	66,9	680 066	62,1
50	2 246	86,6	18 934	81,0	50 438	78,3	79 011	77,0	143 484	74,9
60	444	88,8	4 097	85,2	11 483	83,3	18 459	82,5	34 590	81,1
70	113	89,7	1 061	87,8	3 077	86,5	5 027	86,1	9 623	85,1
80	37	89,9	330	89,4	968	88,7	1 594	88,5	3 092	88,1

B287C_F006_S1										
Prüfdatum: 09.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	122 055	73,5	688 994	58,6	1 479 944	48,1	2 031 368	42,3	-	-
40	17 601	81,2	122 772	72,5	300 945	67,8	450 379	65,0	768 773	60,0
50	2 704	86,0	22 208	79,9	58 754	77,1	91 218	75,8	164 179	73,6
60	529	88,5	4 797	84,5	13 339	82,5	21 311	81,5	39 734	80,1
70	132	89,6	1 225	87,4	3 536	85,9	5 762	85,3	10 954	84,4
80	41	89,9	375	89,1	1 099	88,3	1 804	88,0	3 490	87,4

B287C_F006_S2										
Prüfdatum: 09.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	104 125	74,7	609 389	60,5	1 339 059	50,3	1 849 842	44,5	-	-
40	15 058	82,0	107 822	73,6	266 084	69,2	400 895	66,6	689 795	61,7
50	2 311	86,4	19 424	80,8	51 943	78,1	81 077	76,8	146 534	74,6
60	459	88,7	4 222	85,0	11 811	83,1	18 950	82,3	35 410	80,9
70	116	89,7	1 090	87,7	3 151	86,4	5 143	85,9	9 823	84,9
80	38	89,9	338	89,3	988	88,6	1 630	88,4	3 147	87,9

B287C_F006_S3										
Prüfdatum: 09.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	99 559	75,1	590 417	61,0	1 302 938	50,9	1 813 842	45,1	-	-
40	14 509	82,2	104 884	73,9	259 928	69,5	392 965	66,9	675 924	62,1
50	2 243	86,6	18 958	80,9	50 404	78,3	79 059	77,0	143 258	74,9
60	446	88,8	4 097	85,2	11 482	83,3	18 485	82,4	34 641	81,2
70	114	89,7	1 067	87,8	3 090	86,5	5 045	86,0	9 623	85,1
80	37	89,9	333	89,4	973	88,7	1 605	88,5	3 100	88,0

B287C_F006_S4										
Prüfdatum: 10.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	100 203	75,1	594 672	61,0	1 313 737	50,6	1 824 350	45,0	-	-
40	14 547	82,3	104 559	74,0	259 261	69,6	393 747	66,9	677 705	62,2
50	2 236	86,6	18 913	81,0	50 462	78,4	79 115	77,1	143 286	75,0
60	443	88,9	4 084	85,3	11 484	83,4	18 483	82,6	34 637	81,2
70	114	89,7	1 067	87,9	3 088	86,6	5 042	86,0	9 649	85,2
80	36	89,9	332	89,4	970	88,7	1 600	88,6	3 094	88,1

B287C_F006_S1_W										
Prüfdatum: 31.03.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	145 868	72,2	794 163	56,5	1 669 882	45,7	2 259 000	39,9	-	-
40	21 025	80,5	142 672	71,3	344 522	66,4	515 775	63,4	868 908	58,1
50	3 192	85,6	25 882	79,2	67 447	76,3	104 583	74,9	187 100	72,5
60	615	88,3	5 535	84,1	15 328	81,9	24 418	81,0	45 320	79,4
70	150	89,6	1 405	87,2	4 030	85,6	6 555	85,0	12 441	83,9
80	47	89,9	423	89,0	1 236	88,1	2 030	87,8	3 914	87,2

B287C_F006_S2_W										
Prüfdatum: 01.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	117 395	73,8	670 532	59,2	1 456 294	48,9	1 999 056	43,1	-	-
40	17 129	81,4	119 926	72,8	293 253	68,2	439 474	65,5	754 309	60,5
50	2 599	86,1	21 548	80,2	57 229	77,4	89 174	76,1	160 600	73,9
60	509	88,6	4 629	84,7	12 914	82,7	20 694	81,9	38 621	80,4
70	128	89,7	1 195	87,6	3 460	86,2	5 624	85,6	10 749	84,7
80	40	89,9	366	89,3	1 072	88,5	1 762	88,2	3 411	60,5

B287C_F006_S3_W										
Prüfdatum: 01.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	107 230	74,4	622 439	60,1	1 365 889	50,0	1 915 211	44,3	-	-
40	15 725	81,8	111 647	73,3	274 953	68,9	413 400	66,2	710 550	61,4
50	2 418	86,4	20 153	80,5	53 547	77,9	83 681	76,6	151 071	74,4
60	478	88,7	4 361	85,0	12 203	83,0	19 589	82,1	36 616	80,8
70	123	89,7	1 130	87,7	3 261	86,3	5 321	85,8	10 167	84,8
80	40	89,9	349	89,3	1 021	88,6	1 682	88,3	3 258	87,9

B287C_F006_S4_W										
Prüfdatum: 02.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	121 900	73,7	690 694	58,8	1 498 111	48,4	2 064 000	42,6	-	-
40	17 502	81,4	122 284	72,7	299 837	68,0	450 570	65,2	772 244	60,3
50	2 644	86,1	21 883	80,1	57 802	77,4	89 924	76,0	162 378	73,8
60	516	88,6	4 701	84,7	13 105	82,7	21 005	81,8	39 181	80,3
70	129	89,7	1 198	87,5	3 455	86,1	5 618	85,5	10 751	84,6
80	40	89,9	367	89,2	1 076	88,4	1 768	88,2	3 404	87,7

B287C_F012_S1										
Prüfdatum: 18.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	174 485	70,8	907 156	54,2	1 852 000	43,1	2 467 053	37,3	-	-
40	25 116	79,6	164 961	70,0	393 800	64,8	583 711	61,6	973 366	56,1
50	3 792	85,1	30 059	78,3	77 692	75,3	119 735	73,8	213 300	71,2
60	714	88,1	6 345	83,5	17 388	81,2	27 627	80,2	51 195	78,6
70	170	89,5	1 581	86,8	4 511	85,2	7 303	84,4	13 895	83,4
80	51	89,9	468	88,9	1 367	87,8	2 246	87,4	4 330	86,8

B287C_F012_S2										
Prüfdatum: 18.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	119 425	73,8	679 950	58,9	1 467 947	48,5	2 027 000	42,7	-	-
40	17 223	81,4	121 367	72,8	297 595	68,1	446 460	65,3	761 726	60,3
50	2 649	86,2	21 955	80,2	58 003	77,4	90 646	76,0	163 438	73,8
60	519	88,6	4 737	84,7	13 217	82,7	21 161	81,8	39 595	80,4
70	130	89,7	1 216	87,6	3 496	86,1	5 705	85,6	10 916	84,6
80	41	89,9	373	89,3	1 089	88,5	1 791	88,2	3 477	87,8

B287C_F012_S3										
Prüfdatum: 19.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	119 615	73,8	680 747	59,0	1 481 529	48,4	2 039 450	42,7	-	-
40	17 204	81,6	120 556	72,9	296 332	68,2	444 700	65,4	765 833	60,5
50	2 614	86,2	21 763	80,3	57 583	77,5	89 769	76,2	162 574	73,9
60	513	88,6	4 670	84,8	13 085	82,8	20 923	81,9	39 248	80,5
70	129	89,7	1 207	87,6	3 487	86,2	5 686	85,7	10 890	84,8
80	41	89,9	371	89,2	1 085	88,5	1 783	88,2	3 461	87,9

B287C_F012_S4										
Prüfdatum: 19.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	120 170	73,8	680 300	58,8	1 469 944	48,4	2 044 789	42,6	-	-
40	17 412	81,4	121 579	72,7	298 237	68,1	448 122	65,3	767 093	60,3
50	2 652	86,2	21 961	80,2	58 123	77,4	90 509	76,1	163 048	73,8
60	516	88,6	4 702	84,7	13 106	82,7	21 013	81,8	39 257	80,4
70	129	89,7	1 204	87,5	3 461	86,1	5 651	85,6	10 812	84,6
80	41	89,9	367	89,2	1 074	88,4	1 768	88,2	3 423	87,8

B288A										
Prüfdatum: 19.08.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	46 948	63,7	213 742	62,0	474 883	58,8	685 055	56,3	1 105 143	51,4
40	12 346	62,0	51 769	62,9	114 670	64,0	167 205	64,1	280 588	63,4
50	3 676	61,3	15 119	61,6	32 356	63,2	46 591	64,2	76 924	65,4
60	1 294	58,4	5 261	62,1	11 334	63,0	16 204	63,6	26 258	64,7
70	540	53,5	2 047	62,5	4 473	63,8	6 445	64,3	10 419	64,8
80	285	49,1	936	59,3	2 004	62,8	2 880	63,9	4 663	64,9

B288B_LRTF										
Prüfdatum: 14.08.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	91 663	61,6	382 811	56,3	794 142	51,0	1 096 706	47,6	1 657 364	41,9
40	22 058	61,5	92 036	61,1	198 488	60,5	284 611	59,7	458 208	57,6
50	6 309	61,6	25 499	60,9	54 554	62,3	78 629	62,9	128 002	63,2
60	2 046	63,8	8 594	61,0	18 079	61,9	25 676	62,6	41 273	63,7
70	733	65,7	3 270	62,5	6 955	62,3	9 872	62,7	15 672	63,3
80	302	66,5	1 382	64,1	2 997	63,7	4 294	63,8	6 859	63,9

B288C_PAV										
Prüfdatum: 02.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	266 550	53,7	897 939	43,5	1 595 667	36,5	2 035 474	33,1	-	-
40	66 227	58,0	247 788	53,6	490 095	50,6	666 200	48,6	997 698	45,2
50	17 759	60,1	69 615	57,8	143 237	57,2	200 065	56,7	314 783	55,5
60	5 390	62,2	21 968	59,7	45 979	59,9	65 251	60,1	103 767	60,0
70	1 767	65,3	7 641	61,3	16 167	61,6	22 943	61,8	36 779	62,1
80	618	69,5	2 915	63,6	6 308	63,3	9 058	63,5	14 603	63,7

B288C_F003_S1										
Prüfdatum: 03.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	852 547	39,9	-	-	-	-	-	-	-	-
40	233 537	49,2	693 989	42,0	911 584	47,7	1 062 789	50,0	1 284 902	51,3
50	64 298	54,2	214 859	50,0	404 311	47,8	538 853	46,4	787 272	44,0
60	19 228	57,6	69 071	54,0	135 040	53,3	184 337	52,9	279 507	52,0
70	6 111	61,1	23 576	56,7	47 394	56,4	65 564	56,4	101 426	56,2
80	2 021	65,7	8 634	59,6	17 780	59,1	24 907	59,1	39 200	59,1

B288C_F003_S2										
Prüfdatum: 04.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	772 390	41,1	1 932 611	29,4	2 905 167	23,0	3 414 947	20,3	-	-
40	210 200	49,9	637 616	42,9	1 114 938	38,3	1 426 053	35,8	1 945 200	31,8
50	57 764	54,6	195 132	50,6	368 729	48,6	493 721	47,4	725 232	45,1
60	17 165	57,9	62 278	54,4	122 163	53,7	166 958	53,4	254 076	52,6
70	5 420	61,5	21 152	57,1	42 583	56,8	59 059	56,8	91 422	56,7
80	1 783	66,4	7 698	60,1	15 947	59,5	22 373	59,5	35 132	59,4

B288C_F003_S3										
Prüfdatum: 07.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	512 740	47,3	1 483 941	35,5	2 397 647	28,3	2 922 684	25,2	-	-
40	127 661	54,6	433 889	48,3	807 600	44,2	1 065 050	41,8	1 530 568	37,7
50	33 014	58,5	122 759	54,7	242 605	53,2	332 365	52,2	506 768	50,4
60	9 429	61,7	37 450	57,9	76 533	57,5	106 917	57,3	167 424	56,8
70	2 881	65,7	12 440	60,6	26 021	60,2	36 720	60,3	58 531	60,2
80	931	70,6	4 509	63,7	9721	62,9	13 882	62,8	22 313	62,7

B288C_F003_S4										
Prüfdatum: 07.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	363 715	51,8	1 172 000	40,2	2 004 813	32,8	2 507 200	29,2	-	-
40	87 274	57,8	320 850	52,1	624 505	48,4	845 205	46,1	1 245 024	42,2
50	22 113	61,0	87 823	57,5	179 721	56,4	250 589	55,7	390 563	54,1
60	6 336	63,9	26 638	60,2	55 927	60,0	78 990	59,9	125 687	59,6
70	1 944	67,6	8 833	62,6	18.973	62,3	27 052	62,4	43 719	62,5
80	632	72,3	3 221	65,5	7 097	64,8	10 235	64,7	16 703	64,7

B288C_F006_S1										
Prüfdatum: 10.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	263 850	56,3	945 294	44,7	1 709 722	37,0	2 190 850	33,0	-	-
40	59 259	61,8	240 461	56,0	489 576	52,6	675 728	50,4	1 022 463	46,5
50	14 150	65,2	62 143	61,0	132 353	60,0	188 353	59,4	299 021	58,0
60	3 793	68,8	18 064	63,9	39 437	63,5	56 689	63,3	92 236	63,0
70	1 089	72,9	5 753	66,8	12 970	66,1	18 892	65,9	31 147	65,8
80	344	77,5	2 059	70,4	4 805	69,0	7 078	68,7	11 847	68,3

B288C_F006_S2										
Prüfdatum: 11.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	223 600	57,9	836 394	46,9	1 555 421	39,3	2 015 053	35,4	-	-
40	49 762	62,8	207 289	57,4	428 244	54,3	596 895	52,3	919 425	48,6
50	11 920	65,7	53 272	61,8	114 500	61,1	163 368	60,5	263 483	59,4
60	3 229	69,0	15494	64,4	33 984	64,1	49 207	64,1	80 637	63,9
70	960	72,7	5 050	67,0	11 389	66,4	16 584	66,4	27 454	66,4
80	312	77,1	1 835	70,3	4 262	69,1	6 285	68,8	10 527	68,5

B288C_F006_S3										
Prüfdatum: 14.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	212 410	58,6	811 817	47,7	1 526 438	40,1	1 990 474	36,1	-	-
40	47 038	63,3	198 358	58,0	412 605	55,0	574 870	53,1	896 912	49,4
50	11 103	66,2	50 258	62,3	108 747	61,6	156 111	61,1	252 553	59,9
60	3 008	69,3	14 603	64,8	32 224	64,5	46.746	64,5	76 707	64,3
70	894	73,1	4 766	67,4	10 800	66,8	15 764	66,7	26 154	66,7
80	290	77,3	1 728	70,6	4 043	69,4	5 976	69,1	10 035	68,9

B288C_F006_S4										
Prüfdatum: 14.10.2013										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	221 075	58,1	832 884	47,0	1 555 056	39,4	2 018 895	35,4	-	-
40	49 293	62,9	205 616	57,6	425 700	54,5	596 079	52,5	913 290	48,8
50	11 747	66,0	52 643	61,9	113 379	61,2	161 770	60,7	260 761	59,5
60	3 169	69,3	15 283	64,5	33 583	64,2	48 762	64,2	79 785	64,0
70	940	73,1	4 992	67,2	11 260	66,6	16 411	66,5	27 209	66,5
80	303	77,4	1 803	70,5	4 218	69,3	6 230	69,0	10 436	68,7

B288C_F006_S1_W										
Prüfdatum: 02.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	510 205	48,3	1 514 222	35,9	2 481 278	28,6	3 024 316	25,2	-	-
40	124 532	55,7	433 287	49,2	815 347	44,8	1 085 150	42,3	1 550 368	38,2
50	31 232	59,8	119 881	55,7	240 128	54,1	331 295	53,2	506 667	51,2
60	8 761	63,0	35 974	59,0	74 391	58,5	104 384	58,3	164 375	57,7
70	2 637	66,9	11 755	61,7	24 955	61,3	35 423	61,3	56 657	61,2
80	837	71,9	4 209	64,8	9 195	63,9	13 204	63,8	21 407	63,7

B288C_F006_S2_W										
Prüfdatum: 02.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	379 430	51,6	1 211 294	39,8	2 066 389	32,4	2 582 778	28,8	-	-
40	89 841	58,0	332 484	52,0	643 721	48,0	866 160	45,8	1 271 927	41,9
50	22 419	61,5	89 908	57,6	183 982	56,4	255 432	55,6	397 738	54,0
60	6 272	64,5	26 722	60,5	56 347	60,2	80 232	60,1	127 200	59,7
70	1 898	68,3	8 810	63,0	18 971	62,7	27 051	62,6	43 756	62,7
80	607	73,4	3 174	66,2	7 033	65,2	10 183	65,1	16 636	65,0

B288C_F006_S3_W										
Prüfdatum: 03.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	404 516	51,1	1 286 833	39,2	2 180 111	31,6	2 718 947	28,2	-	-
40	95 137	57,7	348 561	51,7	675 740	47,8	907 175	45,4	1 337 750	41,4
50	23 605	61,0	93 697	57,4	191 778	56,2	267 389	55,4	415 990	53,8
60	6 645	64,1	28 041	60,1	58 864	59,9	83 071	59,8	131 890	59,4
70	2 002	68,1	9 208	62,6	19 735	62,3	28 125	62,3	45 463	62,4
80	645	73,2	3 355	65,8	7 392	64,8	10 659	64,7	17 392	64,7

B288C_F006_S4_W										
Prüfdatum: 03.04.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	424 505	50,3	1 321 105	38,2	2 209 263	30,9	2 729 650	27,4	-	-
40	102 174	57,0	368 225	50,8	705 326	46,9	939 789	44,4	1 372 732	40,5
50	25 524	60,5	100 149	56,7	202 739	55,5	280 625	54,6	433 237	52,9
60	7 238	63,6	30 187	59,6	62 888	59,3	88 962	59,2	140 460	58,8
70	2 200	67,3	9 926	62,2	21 159	61,9	30 056	61,9	48 270	61,9
80	704	72,4	3 578	65,3	7 886	64,4	11 304	64,3	18 403	64,2

B288C_F012_S1										
Prüfdatum: 19.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	311 170	55,2	1 092 167	43,0	1 941 316	34,8	2 461 556	31,2	-	-
40	69 282	61,1	276 406	55,1	558 076	51,5	767 528	49,1	1 161 114	45,0
50	16 477	64,3	71 061	60,4	150 470	59,4	212 630	58,7	339 360	57,2
60	4 446	67,5	20 478	63,2	44 448	62,8	63 654	62,7	103 805	62,5
70	1 296	71,5	6 577	65,7	14 626	65,2	21 198	65,2	34 960	65,2
80	414	76,2	2 364	69,0	5 411	67,8	7 928	67,6	13 229	67,5

B288C_F012_S2										
Prüfdatum: 20.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	239 563	57,3	880 200	46,3	1 627 579	38,7	2 109 300	34,8	-	-
40	53 193	62,2	218 689	57,0	449 832	53,9	625 670	51,9	967 500	48,2
50	12 651	65,1	55 693	61,5	119 311	60,8	169 694	60,2	273 883	59,1
60	3 459	68,3	16 221	63,9	35 395	63,7	50 876	63,6	83 794	63,5
70	1 027	72,0	5 304	66,3	11 880	65,8	17 199	65,8	28 483	65,9
80	338	76,4	1 938	69,5	4 462	68,4	6 569	68,2	10 968	68,0

B288C_F012_S3										
Prüfdatum: 20.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	239 285	57,5	886 261	46,3	1 636 737	38,7	2 129 895	34,6	-	-
40	52 843	62,5	218 112	57,2	449 775	54,0	627 570	52,0	965 937	48,2
50	12 583	65,4	55 709	61,6	119 547	60,9	170 700	60,4	275 203	59,1
60	3 402	68,5	16 139	64,1	35 373	63,9	50 994	63,9	83 527	63,7
70	1 011	72,4	5 238	66,7	11 730	66,1	17 127	66,1	28 350	66,1
80	330	76,6	1 912	69,9	4 424	68,7	6 508	68,5	10 896	68,3

B288C_F012_S4										
Prüfdatum: 20.02.2014										
Freq. [Hz]	0,1		1		3		5		10	
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
30	238 050	57,6	886 722	46,5	1 647 833	38,8	2 136 350	34,8	-	-
40	52 639	62,3	217 563	57,3	448 871	54,2	627 826	52,2	961 790	48,4
50	12 564	65,3	55 403	61,6	119 035	60,9	169 605	60,4	273 458	59,3
60	3 429	68,4	16 175	63,9	35 367	63,8	50 946	63,8	83 624	63,7
70	1 028	72,0	5 292	66,4	11 824	65,9	17 197	65,9	28 479	66,0
80	335	76,4	1 932	69,6	4 462	68,4	6 560	68,2	10 970	68,1

Dynamic Shear Rheometer DSR

Anmerkungen:

Prüfgerät: HAAKE MARS II Modular Rheometer

Prüfgeometrie: PP25, 1 mm Spalt

Prüfprogramm: +46 bis +82 °C bei 1,592 Hz

Prüfer: ■ Marina Stoyanova

B287A			B287B_LRTF		
Prüfdatum: 08.04.2014			Prüfdatum: 09.04.2014		
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]
46	17 049	83,9	46	36 081	79,4
52	7 123	85,7	52	14 676	82,2
58	3 155	87,1	58	6 274	84,2
64	1 471	88,2	64	2 806	85,6
70	710	89,0	70	1 314	86,5
76	369	89,7	76	658	87,2
82	201	89,7	82	347	87,9

B288A			B288B_LRTF		
Prüfdatum: 08.04.2014			Prüfdatum: 09.04.2014		
Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]	Temp. [°C]	G* [Pa]	δ [°]
46	31 667	62,5	46	66 225	61,6
52	16 719	62,1	52	33 102	61,5
58	9 224	62,4	58	17 574	61,4
64	5 267	63,1	64	9 698	61,5
70	3 016	63,8	70	5 438	62,0
76	1 814	64,1	76	3 195	62,7
82	1 141	62,9	82	1 939	63,4

Bending Beam Rheometer BBR	Prüfdatum	Biegezugsteifigkeit S [MPa]			m-Wert [-]		
		-12	-18	-24	-12	-18	-24
		B287A	11,06,18.09.2012	58,000	146,000	289,000	0,506
B287B_LRTF	17,18,18.09.2012	66,000	168,000	364,000	0,480	0,383	0,269
B287B_F000	24,29,30.10.2012	90,000	179,000	351,000	0,398	0,322	0,263
B287C_LPAV	25,26,28.09.2012	103,000	217,000	351,000	0,390	0,321	0,289
B287C_L000	27.09.02,16.10.2013	102,667	216,031 ^{*)}	395,566	0,410	0,279 ^{*)}	0,261
B287C_F000	10,11,16.10.2013	128,096	281,248 ^{*)}	472,036	0,381	0,304 ^{*)}	0,274
B288A	11,06,12.09.2012	34,000	81,000	186,000	0,466	0,420	0,364
B288B_LRTF	19,18,14.09.2012	45,000	103,000	210,000	0,419	0,364	0,338
B288B_F000	24,29,30.10.2012	61,000	131,000	246,000	0,412	0,369	0,308
B288C_LPAV	06,06,05.12.2013	89,823	184,435	335,501	0,340	0,294	0,236
B288C_L000	27.09.02,16.10.2013	62,052	149,153	277,323	0,418	0,350	0,272
B288C_F000	10,11,16.10.2013	87,027	189,619	320,563	0,378	0,322	0,265

Anmerkungen: ^{*)} nur eine Messung

Prüfgerät: COESFELD Materialtest Bending Beam Rheometer

Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Markus Hospodka, ■ Marina Stoyanova

Bending Beam Rheometer BBR	Prüfdatum	Biegezugsteifigkeit S [MPa]			m-Wert [-]		
		-12	-18	-24	-12	-18	-24
B287C_F006_S1	17,16,19.09.2013	121,138	279,162	509,196	0,380	0,306	0,237
B287C_F006_S2	17,16,19.09.2013	117,514	286,312	539,264	0,397	0,315	0,240
B287C_F006_S3	17,16,20.09.2013	142,360	270,787	512,384	0,375	0,311	0,229
B287C_F006_S4	17,16,20.09.2013	122,409	291,536	552,118	0,394	0,319	0,223
B288C_F006_S1	24,18,23.09.2013	107,825	195,376	383,471	0,353	0,308	0,253
B288C_F006_S2	24,18,23.09.2013	93,514	191,527	394,771	0,361	0,308	0,258
B288C_F006_S3	24,23,20.09.2013	96,556	206,292	381,686	0,357	0,323	0,268
B288C_F006_S4	24,23,20.09.2013	91,973	187,535	394,911	0,366	0,314	0,267

Anmerkungen:

Prüfergerät: COESFELD Materialtest Bending Beam Rheometer

Prüfer: Thomas Riedmayer

Bending Beam Rheometer BBR	Prüfdatum	Biegezugsteifigkeit S [MPa]			m-Wert [-]		
		-12	-18	-24	-12	-18	-24
B287C_F006_S1_W	10,11.09.2013	126,668	264,368	-	0,378	0,292	-
B287C_F006_S2_W	10,11.09,16.12.2013	115,287	237,357	519,484	0,393	0,319	0,239
B287C_F006_S3_W	17,18,16.12.2013	116,836	272,589	482,752	0,378	0,298	0,231
B287C_F006_S4_W	17,18,16.12.2013	118,709	261,576	443,620	0,385	0,297	0,239
B288C_F006_S1_W	02,12.12.2013	111,188	-	380,837	0,327	-	0,236
B288C_F006_S2_W	02,12.12.2013	110,918	218,205	382,711	0,345	0,293	0,242
B288C_F006_S3_W	17,11,12.12.2013	107,707	214,691	396,362	0,335	0,297	0,235
B288C_F006_S4_W	17,11,12.12.2013	103,924	217,467	389,198	0,330	0,291	0,256
Anmerkungen:							
Prüferät: COESFELD Materialtest Bending Beam Rheometer							
Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Marina Stoyanova							

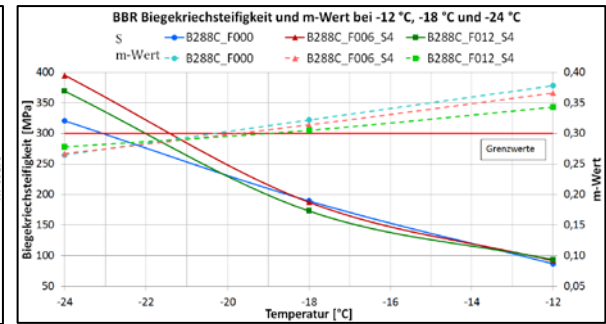
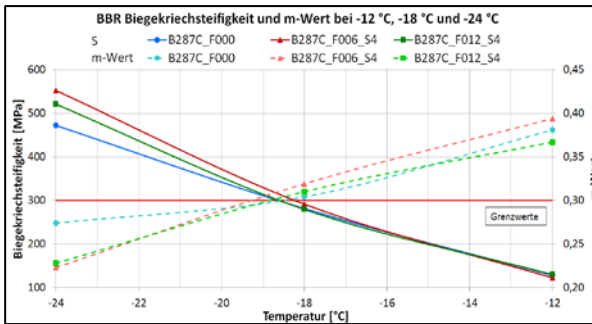
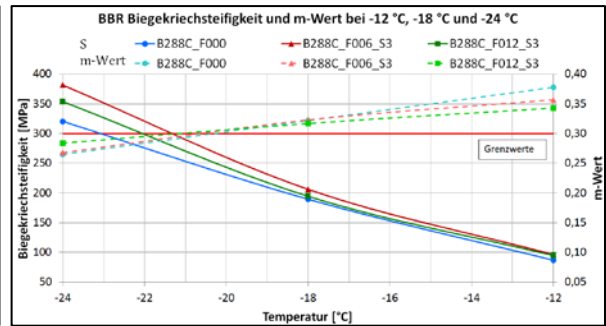
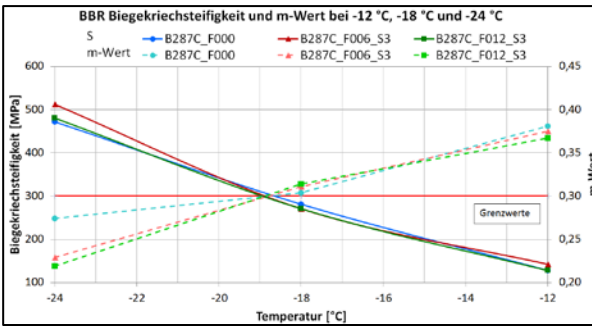
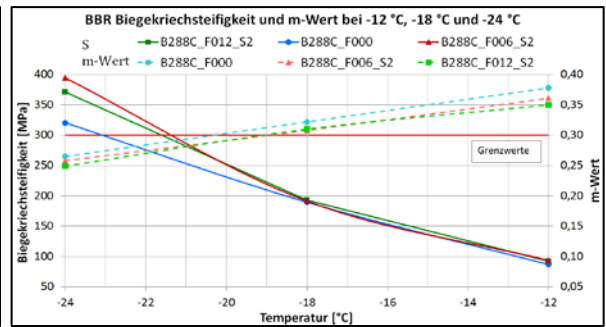
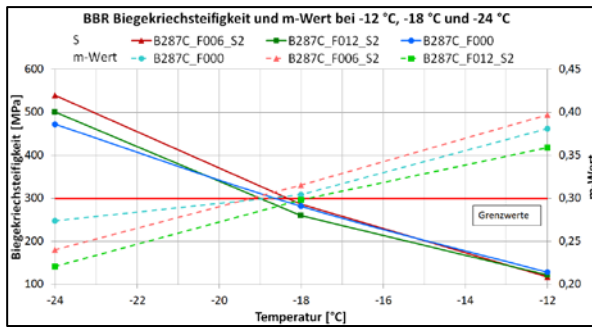
Bending Beam Rheometer BBR	Prüfdatum	Biegezugsteifigkeit S [MPa]			m-Wert [-]		
		-12	-18	-24	-12	-18	-24
B287C_F012_S1	09,10.12.2013	137,673	-	548,777	0,347	-	0,229
B287C_F012_S2	09,11,10.12.2013	121,153	259,639	500,231	0,359	0,298	0,221
B287C_F012_S3	09,11,10.12.2013	127,873	270,854	480,660	0,367	0,314	0,219
B287C_F012_S4	09,11,10.12.2013	130,024	279,332	520,767	0,367	0,310	0,228
B288C_F012_S1	09.12,18,17.10.2013	102,831	210,265	385,678	0,330	0,309	0,248
B288C_F012_S2	09.12,18,17.10.2013	91,998	192,997	371,476	0,350	0,310	0,249
B288C_F012_S3	09.12,18,17.10.2013	94,864	194,565	353,908	0,343	0,317	0,284
B288C_F012_S4	09.12,18,17.10.2013	93,717	173,217	368,965	0,343	0,305	0,278

Anmerkungen:

Prüfgerät: COESFELD Materialtest Bending Beam Rheometer

Prüfer: ■ Thomas Riedmayer, ■ Marina Stoyanova

Grafiken von BBR der Schicht 2,3 und 4 bei -12, -18 und -24 °C im Laufe der Zeit, links: Straßenbaubitumen, rechts: PmB



Zusammenwirken der SHRP-Prüfungen

