



Technische Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Straßenwesen

bi. IVWS

Diplomarbeit
Master's Thesis

Viennese Aging Procedure – Parameterstudie mit Bitumen unterschiedlicher Herkunft

Verfasser:

Daniel MASCHAUER

Vorgartenstraße 192/1/10, 1020 Wien
daniel_maschauer@gmx.net

Betreuung:

Ronald BLAB
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Bernhard HOFKO
Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Daniel STEINER
Univ.-Ass. Dipl.-Ing

Wien, November 2017

Kurzfassung

Das organische Bindemittel Bitumen verändert unter natürlichen und anthropogenen Einflüssen mit der Zeit seine gebrauchrelevanten Eigenschaften. Diese Prozesse werden allgemein „Alterung“ genannt. Das Material wird steifer und spröder, das führt zu schlechterem Tieftemperatur- und Ermüdungsverhalten. Aus diesem Grund ist es wichtig die Alterung des Materials im Labor beschleunigt zu simulieren, um die Veränderung des Materialverhaltens zu untersuchen und Schäden auf der Straße minimieren zu können. Auf Bitumenebene werden hier die genormten Methoden RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) und PAV (Pressure Aging Vessel) verwendet. In der Vergangenheit wurden auch verschiedene Methoden entwickelt, um Asphaltmischgut bzw. -probekörper künstlich zu altern. Aufgabe dieser Diplomarbeit ist die am Institut für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien entwickelte Alterungsmethode „Viennese Aging Procedure“ (VAPro) auf Anwendbarkeit mit Hilfe einer Parameterstudie mit Bitumen unterschiedlicher Herkunft zu beurteilen. Diese Methode bedient sich realitätsnaher Randbedingungen (Temperatur: +60°C; Druck: ~0,3 bar) und bewirkt die Alterung des Probekörpers mittels Durchströmung (1,0 l/min) für drei Tage mit ozon- und stickoxidangereicherter Luft. Beurteilt wird der Alterungszustand der Asphaltproben anhand von Spaltzug-Schwellversuchen und, nach Extraktion des Bindemittels, mit dem Dynamic Shear Rheometer (DSR). Dabei sind bei den Steifigkeitsversuchen große Unterschiede zwischen den einzelnen Bitumen festzustellen, die aber wohl auf ihre unterschiedlichen Ausgangssteifigkeiten zurückzuführen sind. Das erreichte Alterungsniveau auf Bitumenebene entspricht nach der Laborherstellung dem der RTFOT-Alterung und nach der anschließenden VAPro-Alterung mindestens dem der RTFOT+PAV-Alterung.

Abstract

Bitumen changes its properties in the course of time under natural and anthropogenic influences due to its organic origin. These processes are commonly called "aging". The material becomes stiffer and more brittle, resulting in less favorable low temperature and fatigue behavior. For this reason, it is important to simulate the aging of the material in the laboratory in an accelerated way to study the change in material behavior and minimize damage on the road. At the bitumen level, the standardized methods RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) and PAV (Pressure Aging Vessel) are used. Various methods have been developed in the past to simulate aging of asphalt mixes or test specimens. The task of this master's thesis is to evaluate the aging method "Viennese Aging Procedure" (VAPro) developed at the Institute of Transportation Sciences of the Vienna University of Technology for applicability with the aid of a parameter study with bitumen of different origin. VAPro uses realistic boundary conditions (temperature: +60°C, pressure: ~ 0.3 bar) and causes aging of the specimen by perfusing (1,0 l/min) with ozone and nitro oxides enriched air for three days. The state of aging of the asphalt samples is assessed by means of cyclic indirect tensile tests and, after extraction of the binder, with the Dynamic Shear Rheometer (DSR). In the stiffness tests, large differences between the different bitumen are determined, which is probably caused by their different initial stiffnesses. The achieved level of aging at the bitumen level corresponds after laboratory production to that of RTFOT-Aging and after subsequent VAPro-Aging at least to that of RTFOT+PAV-Aging

Danksagung

Ich möchte mich bei dem gesamten Team des Straßenbaulabors des Forschungsbereichs für Straßenwesen für die nette Aufnahme und Betreuung im Labor bedanken. Besonders bedanken möchte ich mich bei Thomas Riedmayer, Tina Strohmeier und David Valentin für die Unterstützung und Hilfe bei jeder Frage bezüglich der Laborgerätschaften.

Den größten Dank möchte ich aber an Ass.-Prof. Dipl.-Ing Dr. techn. Bernhard Hofko und Univ.-Ass. Dipl.-Ing Daniel Steiner aussprechen. Beide haben mich sehr gut bei meiner Arbeit betreut, waren stets geduldig mit mir und haben mein Interesse für den Bereich der Alterung von Bitumen und Asphaltmischgut geweckt. Auch Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab konnte mit seinem Input beim Abschluss der Arbeit sehr gut weiterhelfen.

Last but not least möchte ich mich auch bei all meinen Freunden, meinen Eltern und meiner Freundin Sandra für die Unterstützung im Studium bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
Danksagung	4
1 Einleitung	7
2 Stand der Technik	8
2.1 Asphalt	8
2.1.1 Definition	8
2.1.2 Asphaltmischgutttypen	8
2.2 Gesteinskörnungen	9
2.2.1 Arten der Gesteine	9
2.2.2 Stoffliche Eigenschaften	11
2.2.3 Füller	11
2.3 Bitumen	12
2.3.1 Definition	12
2.3.2 Gewinnung von Bitumen	12
2.3.3 Arten von Bitumen	12
2.3.4 Chemische Struktur von Bitumen	13
2.3.5 Rheologische Eigenschaften	14
2.3.6 Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip	15
2.3.7 Bitumenprüfungen	16
2.4 Alterung	22
2.4.1 Allgemeines	22
2.4.2 Atmosphärenchemie	22
2.4.3 Zeitlicher Verlauf der Alterung	26
2.4.4 Destillative Alterung	27
2.4.5 Oxidative Alterung	27
2.4.6 Strukturalterung	27
2.4.7 Laboralterungsmethoden für Bitumen	27
2.4.8 Alterungsmethoden für Asphaltmischgut	30
3 Vorbereitungen und verwendete Methoden	34
3.1 Materialien	34
3.1.1 Gestein	34
3.1.2 Füller	34
3.1.3 Bitumensorten	34

3.1.4	Asphaltkonzept.....	35
3.2	Probekörperherstellung	36
3.2.1	Herstellung des Mischguts und der Probekörper	36
3.2.2	Ermittlung der Probekörperkenngrößen	36
3.3	Prüfprogramm und Prüfmethode(n)	38
3.3.1	Ablauf	38
3.3.2	Auswahl der Probekörper für die Alterung	38
3.3.3	Alterung mit dem Viennese Aging Procedure – VAPro.....	38
3.3.4	Prüfmethode zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der Asphaltprobekörper	41
3.3.5	Prüfmethode zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der Bitumen	43
4	Ergebnisse und Interpretation	46
4.1	Asphalt – Diskussion der Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche	46
4.1.1	Materialeigenschaften vor der Alterung.....	46
4.1.2	Veränderung der Materialeigenschaften nach der VAPro-Alterung	48
4.2	Bitumen – Diskussion der Ergebnisse der Dynamic Shear Rheometer-Versuche.....	50
4.2.1	Vergleich der Veränderung des dynamischen Schubmoduls.....	51
4.2.2	Vergleich der Veränderung des Phasenverschiebungswinkels.....	59
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	63
	Literaturverzeichnis.....	64

1 Einleitung

Organische Materialien, wie bituminöse Bindemittel, verändern im Laufe der Zeit durch natürliche und anthropogene Einflüsse ihre Eigenschaften. Das Bitumen wird spröde und hart. Diese Alterung des Bindemittels führt zur Verschlechterung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltaufbauten. Anforderungen, die beim Einbau festgelegt wurden, werden nicht mehr eingehalten und es kommt zum Versagen der Asphaltdecke, zum Beispiel durch Tieftemperaturrisse.

Um das Langzeitverhalten von Bitumen bzw. Asphalt besser vorherzusagen und eine längere Lebensdauer von Asphaltstraßen zu gewährleisten, wurden im Laufe der Jahre zahlreiche Laboralterungsmethoden für Bitumen und Asphalt entwickelt. Viele dieser Methoden bedienen sich hohem Druck und/oder hoher Temperatur, um die chemischen Prozesse in kurzer Zeit im Labor zu simulieren. Diese Randbedingungen weichen aber teilweise stark von der Realität ab. Die erzielten Materialeigenschaften sind zwar mit den im Feld gealterten gut vergleichbar, jedoch sind die chemischen, und mikrostrukturellen Veränderungen unterschiedlich. Hier setzt die vom Institut für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien entwickelte Asphaltalterungsmethode „Viennese Aging Procedure“ (VAPro) an: Die Asphaltprobekörper werden, unter realen Bedingungen bezüglich Temperatur und Druck (+60°C; ~0,3 bar), mit einem hochreaktiven Gasgemisch, aus ozon- und stickoxidangereicherter Luft, durchströmt. So wird versucht die chemischen Prozesse der Alterung realitätsnah nachzubilden, um realitätsnah gealterte Asphaltprobekörper für weitere Untersuchungen zu erhalten.

Aufgabe dieser Diplomarbeit ist es die Anwendbarkeit von VAPro zu überprüfen. Dazu werden Asphaltmischgüter mit derselben Gesteinszusammensetzung und unterschiedlichen Bitumen anhand von Spaltzug-Schwellversuchen und, nach Rückgewinnung des Bindemittels, mit dem Dynamic Shear Rheometer untersucht und beurteilt.

2 Stand der Technik

2.1 Asphalt

2.1.1 Definition

Asphalt bezeichnet das Gemisch aus Erdölbitumen als Bindemittel und Gesteinskörnungen. Durch Einstellen der Zusammensetzung kann das Verhalten unter Einflüssen aus Witterung und Verkehr gesteuert werden. Asphalte im Straßenbau bestehen üblicherweise aus 93-96 M.-% Gestein und 4-7 M.-% Bindemittel [1].

2.1.2 Asphaltmischguttypen

Technische Asphalte können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten eingeteilt werden: Zum Beispiel nach ihrer Funktion im Straßenoberbau in Trag- und Deckschichten, nach ihrer Zusammensetzung oder anhand des Temperaturbereichs für die Verarbeitung [1],[2].

Asphaltbeton (AC)

Asphaltbeton oder Walzasphalt besitzt eine stetige Kornzusammensetzung. Die Korngrößenverteilung entspricht der einer Fuller-Parabel und ergibt damit die dichteste Lagerung der Gesteinskörnungen. Der Hohlraumgehalt liegt bei 2,5 bis 6,0% [1],[4].

Splittmastixasphalt (SMA)

Splittmastixasphalt wurde für Deckschichten mit sehr hohem Belastungspotential konzipiert. Seine hohe Standfestigkeit erreicht er neben seiner Kornzusammensetzung (ein hoher Grobsplittanteil und weitgehende Verringerung des Feinsplitt- und Sandanteils bei gleichzeitig hohem Füllergehalt) vor allem durch die Verwendung hochwertiger Gesteinskörnungen wie Hartsplitt. Aufgrund des erhöhten Bindemittelgehalts ist die Griffigkeit der Oberfläche niedriger als bei anderen Mischguttypen. Durch Abstreuen und Einwalzen von Splitt wird eine ausreichende Oberflächenrauheit erreicht [1],[2].

Drainasphalt (PA)

Drainasphalt oder offenporiger Asphalt ist durch eine extreme Ausbildung der Korngrößenverteilung gekennzeichnet (Ausfallkörnung): Durch weitere Erhöhung des Grobsplittanteils im Vergleich zu SMA wird eine Hohlraummaximierung bei ausreichender

Stabilität erzielt. Dies führt zu Hohlraumgehalten von mehr als 17 Vol.-%. Drainasphalt besitzt durch seinen speziellen Aufbau zwei besondere Merkmale:

- Wasserableitung durch den Belag
- Lärminderung

Die offenporige Struktur bietet den Vorteil, dass die Schallabsorption der Schicht erhöht wird, was eine Lärminderung von 3-6 dB zufolge hat. Das auf der Fahrbahnoberfläche befindliche Wasser wird rasch durch den Drainasphalt hindurchgeleitet und auf einer darunterliegenden Abdichtung abgeleitet. Dadurch verringert sich die Sprühfahnenbildung hinter Fahrzeugen, was zur Verkehrssicherheit beiträgt. Gleichzeitig führt dies aber auch zu Nachteilen bezüglich des Winterdienstes: Präventives Salzstreuen wird nutzlos, es wird mehr Salz benötigt und es kann kein Splitt ausgebracht werden [1],[2],[4].

Gussasphalt (MA)

Gussasphalt zeichnet sich dadurch aus, dass alle Hohlräume mit Bindemittel ausgefüllt sind. Das ist nur mit einem speziell aufgebauten Gesteinsgerüst und einem höheren Bindemittelgehalt zu erreichen. In heißem Zustand ist er gieß- und streichbar und selbstverdichtend. Zur Ausbildung einer angemessenen Rauheit wird auf die Oberfläche des Gussasphalts Splitt aufgebracht und gegebenenfalls eingewalzt [1],[2].

2.2 Gesteinskörnungen

2.2.1 Arten der Gesteine

Ein Gemenge von einem oder mehreren natürlich entstandenen Mineralen bezeichnet man als Gestein. Man unterscheidet zwischen Festgesteinen (Fels) und Lockergesteinen (Steine, Kies, Sand, Schluff und Ton). Ein Mineral ist ein einheitlicher, natürlicher Bestandteil der Erdkruste und dort über mehrere Jahrtausende entstanden. Diese kann man, abhängig vom Entstehungsort, in drei große Gruppen einteilen:

- Magmatite (z.B.: Granit, Diabas, Basalt)
- Sedimente (z.B.: Dichte Kalke, Kiese, Dolomite)
- Metamorphite (z.B.: Gneise, Quarzit, kristalline Marmore)

Die *Magmatite* umfassen die Mineralien der Tiefengesteine (Plutonite) und der Ergussgesteine (Vulkanite). Der Unterschied liegt im Ort der Abkühlung des Magmas und in weiterer Folge der Erstarrung zum Mineral: Vulkanite entstehen, wenn das flüssige Magma aus der Tiefe bis zur Erdoberfläche vordringt und dort erstarrt. Plutonite dagegen entstehen in der Erdkruste, wenn Magma in die unteren Schichten der Erdkruste eindringt. Durch das langsame Abkühlen und der Überdeckung von mehreren tausend Metern Gestein kristallisieren die Minerale sehr gut aus und bilden besonders große Kristalle [5].

Sedimente dagegen entstehen aus Restmaterialien verwitterter Gesteine an der Oberfläche. Man unterscheidet zwei Arten der Verwitterung: die physikalische oder mechanische Verwitterung und die chemische Verwitterung. Dazu zählen Einflüsse wie Sonneneinstrahlung, Frost, Regen, aber auch Einwirkungen durch Säuren oder Organismen [5].

Die *Metamorphite*, auch metamorphe Gesteine, entstehen durch Umwandlung von Gesteinen durch Druck und hohen Temperaturen. Der feste Aggregatzustand bleibt dabei erhalten. Die Umwandlung stellt sich durch Strukturveränderung, Zu- bzw. Abfuhr von Stoffen und Umkristallisationen ein. Eine Schieferung, die durch einseitigen Druck eine blättrige Struktur entstehen lässt, ist charakteristisch für metamorphe Gesteine. Abb. 1 zeigt den natürlichen Kreislauf der Gesteine [5].

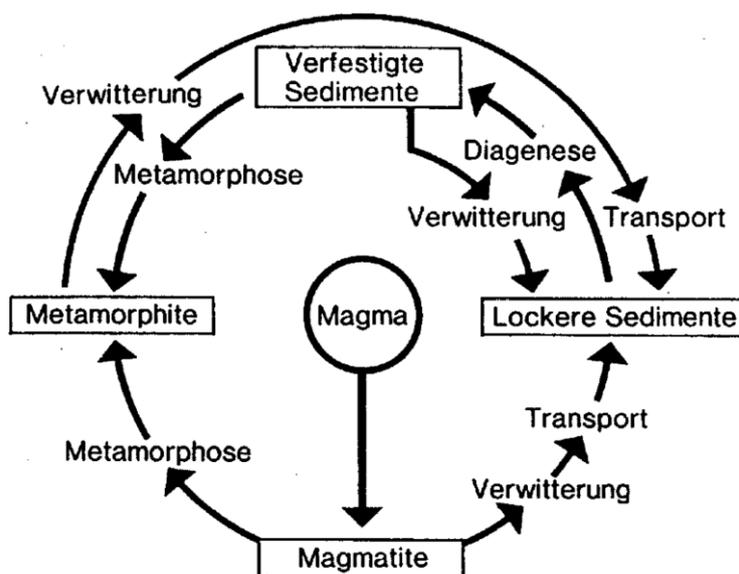


Abb. 1: Kreislauf der Gesteine [5]

Die natürlichen Gesteine kommen auf der Erde in großer Vielfalt vor und werden im Straßenbau als Natursteinwerke oder in zerkleinerter Form als Gesteinskörnung, wie Kies, verwendet. Daneben können auch industrielle Nebenprodukte, wie Hochofenschlacke, und recycelte Baustoffe eingesetzt werden [5].

2.2.2 Stoffliche Eigenschaften

Hinsichtlich der hohen Beanspruchung unter Verkehr sind an die stofflichen Eigenschaften der Gesteinskörnungen hohe Anforderungen zu stellen. Insbesondere gilt das für ihre [2]:

- Wetter-, Frost- und Tausalzbeständigkeit
- Schlag- und Druckfestigkeit
- Widerstandsfähigkeit gegen Hitzebeanspruchung
- Widerstandsfähigkeit gegen Polieren sowie ausreichende Lichtreflexion (Griffigkeit und Helligkeit)
- Affinität zum Bindemittel

2.2.3 Füller

Mit dem Begriff Füller werden die Korngruppen bezeichnet, welche einen Korndurchmesser von $<0,063$ mm aufweisen. Man unterscheidet dabei zwischen Eigenfüller und Fremdfüller:

Eigenfüller

Eigenfüller bezeichnet den Anteil der Sandfraktion $<0,063$ mm, der durch die Korngruppen mit größerem Korndurchmesser mitgeliefert wird. Eigenfüller darf nicht quellfähig sein oder sonstige schädliche Bestandteile besitzen. Ist dies nicht sichergestellt muss er durch Fremdfüller ersetzt werden.

Fremdfüller (Steinmehl)

Steinmehl ist eine industriell hergestellte Körnung, die einen bestimmten Anteil an Füller enthält. Sie wird dem Asphalt beigegeben, um den gewünschten Anteil an Füller zu erreichen.

Der Füller hat großen Einfluss auf die Mischguteigenschaften. Steigt das Verhältnis Füller : Bitumen über 2 : 1, erhöht sich die Steifigkeit bei gleichzeitiger Versprödung. Sinkt das Verhältnis unter 1 : 1 kommt es zu unerwünschten Verformungen unter Verkehrslast, da

das Bitumen in der verdichteten Asphaltsschichte als Schmiermittel wirken kann. Im idealen Fall sollte das Verhältnis Füller : Bitumen zwischen 1,5 : 1 und 1,8 : 1 liegen [1].

2.3 Bitumen

2.3.1 Definition

Bitumen ist ein schwerflüchtiges, klebriges und dunkelfarbiges Gemisch verschiedener organischer Substanzen. Es ist praktisch geruchslos und gegen viele Chemikalien und Wasser unanfällig. Aus diesem Grund wird es auch als Abdichtungsmaterial verwendet. Bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos oder nahezu fest [2],[6].

2.3.2 Gewinnung von Bitumen

Bitumen wird durch Destillation aus Rohöl gewonnen. Bei der fraktionierten Destillation werden als erstes die hochwertigen Bestandteile wie Treibstoffe und Öle gewonnen. Anschließend werden weitere Produkte wie Gas und Schmieröle entzogen. Der am Ende zurückbleibende Rückstand ist das Bitumen [2].

Bitumen, gewonnen aus unterschiedlichen Rohölquellen, kann sich in seiner chemischen Zusammensetzung unterscheiden. So variiert beispielsweise der Asphaltgehalt abhängig von der Rohölquelle. Auch ist nicht jede Quelle zur Bitumenproduktion geeignet [3].

2.3.3 Arten von Bitumen

Es gibt eine Reihe von Bitumen bzw. bitumenhaltigen Bindemitteln am Markt, im Wesentlichen unterscheiden sich diese durch die Art der Herstellung, ihre Anwendungsgebiete und ihre mechanischen Eigenschaften. Im Straßenbau werden hauptsächlich zwei Arten verwendet [2]:

- Straßenbaubitumen
- Modifiziertes Bitumen

Straßenbaubitumen

Die für den Bau und zur Erhaltung von Straßen eingesetzte Bitumensorte bezeichnet man als Straßenbaubitumen. Definiert ist jede Sorte von Straßenbaubitumen durch ihre

Nadelpenetration bei 25°C. In Österreich werden, in Abhängigkeit der Witterung, folgende Sorten am häufigsten verwendet: 35/50, 50/70, 70/100, 160/220 [6].

Modifizierte Bitumen

Bitumen, deren rheologische Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung chemischer Zusätze verändert wurden, werden als modifizierte Bitumen bezeichnet. Mögliche Zusätze sind zum Beispiel Wachse, Kohlenwasserstoffharze oder organische Polymere. Die Zugabe von Polymeren, wie Thermoplaste von ca. 3-5 M.-%, beeinflusst vor allem das Temperatur-Viskositäts-Verhalten des Bitumens. So wird beispielsweise der Erweichungspunkt deutlich erhöht [2],[6].

2.3.4 Chemische Struktur von Bitumen

Bitumen ist ein Gemisch aus höchst- bzw. nicht siedenden Rohölkomponenten. Da es aus einer großen Anzahl von Kohlenwasserstoffen besteht, ist die genaue chemische Zusammensetzung nicht bekannt [6].

Bitumen stellt ein kolloidales 2-Phasensystem dar: Die disperse Phase, bestehend aus Asphaltene umgeben von einem Harzmantel, ist in der kontinuierlichen Phase, bestehend aus Harzen, Aromaten und Paraffinen, dispergiert. Das Dispersionsmittel wird mit dem Begriff Maltene bezeichnet. Die nahezu kugelförmigen Kolloidteilchen nennt man Micellen. Für die Bestimmung der Zusammensetzung werden verschiedene Methoden, wie zum Beispiel die Säulenchromatographie oder die Hochleistungsflüssigkeitschromatographie, eingesetzt. Mit deren Hilfe kann das Bitumen in seine Bestandteile fraktioniert werden. Beschrieben wird die Zusammensetzung dann anhand der SARA-Fraktionen (siehe Abb. 2) [2],[4]:

- Gesättigte (Saturates)
- Aromaten (Aromatics)
- Harze (Resins)
- Asphaltene (Asphaltenes)

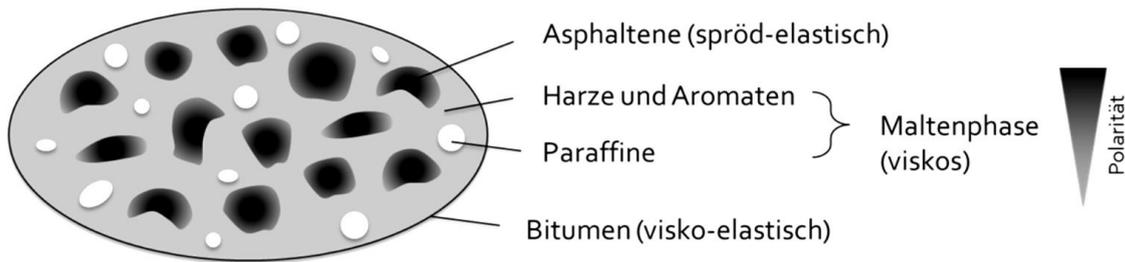


Abb. 2: Mikro-mechanisches Modell von Bitumen [4]

Das Verhältnis Asphaltene : Maltene bestimmt direkt die Eigenschaften des Bitumens, welche ihm sein visko-elastisches Verhalten verleihen und für die Haftung am Gestein verantwortlich sind [6].

2.3.5 Rheologische Eigenschaften

Die Rheologie ist die Wissenschaft von den Verformungen, die ein Material unter einer Belastung erfährt. Neben den mechanischen Beanspruchungen umfasst die Rheologie auch die mit der Verformung einhergehenden thermischen, elektromagnetischen und optischen Phänomene wie Wärmeleitfähigkeit oder Piezoelektrizität. Das Ziel ist die Entwicklung eines Modells zur mathematischen Beschreibung des Spannungs-/Dehnungsverhaltens unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften [2].

Visko-elastisches Verhalten

Bitumen besitzt ein sogenanntes visko-elastisches Materialverhalten. Seine Konsistenz und Steifigkeit hängt von seiner Viskosität, die sich je nach Bitumensorte unterscheidet, ab. Darüber hinaus beeinflussen Temperatur, Belastungsdauer und -geschwindigkeit die Viskosität des Materials. Bei tiefen Temperaturen ist es spröde und hart, beim Erwärmen wird das Bitumen weicher, bis es schließlich bei 150 bis 200°C flüssig wird. Kurze Belastungszeiten rufen überwiegend elastisches Verhalten hervor. Mit steigender Belastungszeit verhält sich das Bitumen viskoser und erfährt irreversible Verformungen. Im Vergleich dazu ist es bei schneller Belastung steifer als bei niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten [2].

Relaxationsvermögen

Bitumen hat, aufgrund seines elasto-viskosen Verhaltens die Eigenschaft sich einer aufgezwungenen Beanspruchung durch viskose Verformung zu entziehen. Der Spannungsabbau erfolgt dabei zeitabhängig. Die Geschwindigkeit des Spannungsabbaus

hängt dabei von der Viskosität ab: Je weicher das Bitumen ist, desto schneller baut sich die Spannung ab. Dieses Verhalten ermöglicht dem Bitumen beispielsweise bei starker Abkühlung in Verbindung mit verhinderter Verkürzung nicht zu reißen, solange die Spannungen nicht zu groß werden und die Temperaturen nicht zu tief absinken. Daher können Asphaltstraßen im Vergleich zu Betonstraßen fugenlos hergestellt werden [2].

2.3.6 Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip

Visko-elastische Materialien, wie Bitumen, zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Belastung und der dabei herrschenden Prüftemperatur. Wird ein visko-elastisches Material mit einer dynamischen Beanspruchung beaufschlagt, so verhält es sich bei hohen Frequenzen steifer als bei niedrigen. Hält man nun die Frequenz konstant und variiert die Temperatur, zeigt sich, dass bei Verringerung der Temperatur das Material steifer und bei Erhöhung weicher wird. Das Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip besagt, dass eine Änderung der Temperatur äquivalent zu einer Änderung der Frequenz ist. So kann, aufgrund dieser Zeit-Temperatur-Äquivalenz, mit Hilfe weniger Versuche, bei variierender Belastungsfrequenz und Temperatur, eine sogenannte „Mastercurve“ entwickelt werden, die alle interessanten Kombinationen aus Frequenz und Temperatur vorhersagen kann. Abb. 3 zeigt exemplarisch, anhand von Steifigkeitsversuchen, wie durch horizontales Verschieben der einzelnen Steifigkeitsmodul-Frequenzfunktionen (Isothermen) eine Mastercurve erstellt werden kann [17],[19],[21].

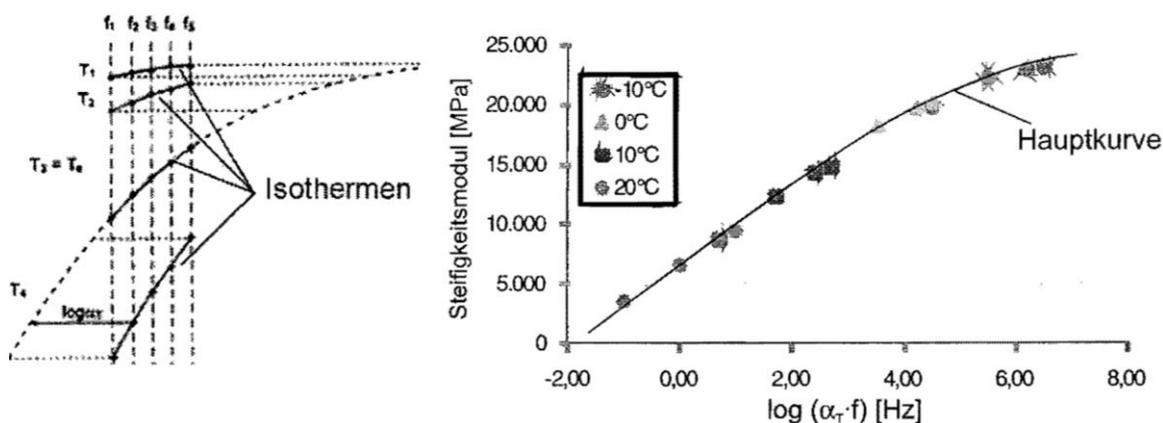


Abb. 3: Ermittlung der Mastercurve durch Verschieben der Isothermen[20]

2.3.7 Bitumenprüfungen

Konventionelle Prüfmethode

Diese Prüfmethode sind einfach durchzuführende, kostengünstige und rasche Methoden, um Bitumen zu beschreiben. Da bei diesen Prüfmethode, auch empirische Prüfmethode genannt, keine Aussage über die tatsächlichen Materialparameter wie Steifigkeit oder Phasenwinkel getroffen wird und das Bitumen auch nicht wie in der Realität beansprucht wird (Art der Belastung, Klimabedingungen), sind diese heute kritisch zu betrachten. Zu den empirischen Prüfmethode zählen [4],[6]:

- Penetration
- Erweichungspunkt Ring-Kugel
- Brechpunkt nach Fraaß
- Bestimmung der Duktilität
- Bestimmung der elastischen Rückstellung

Penetration (EN 1426)

Die Eindringtiefe einer genormten Nadel in eine auf 25°C temperierte Bitumenprobe, bei einer aufgetragenen Last von 100 g, wird nach 5 s gemessen. Der Mittelwert aus drei Einzelprüfungen ergibt das Ergebnis angegeben in Zehntelmillimetern. Damit wird die „Härte“ des Bitumens bestimmt. Diese dient als Grundlage für die Bitumenklassifizierung. Abb. 4 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchs [4],[6].

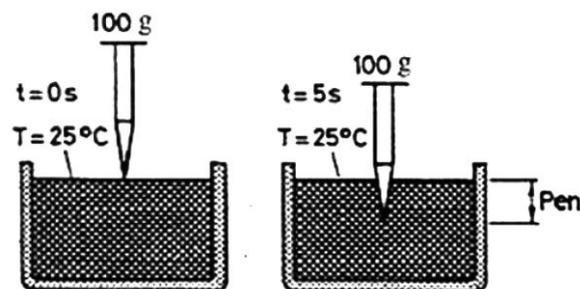


Abb. 4: Skizze des Penetrationsversuchs [4]

Erweichungspunkt Ring-Kugel (EN 1427)

Das Bitumen wird in Ringe aus Kupfer-Zink-Legierung gegossen und in einem Flüssigkeitsbad erwärmt, wobei die Bitumenschicht eine Stahlkugel trägt. Abb. 5 zeigt eine Skizze des Versuchs. Mit zunehmender Temperatur erweicht das Bitumen und die Kugel sinkt aufgrund

der Schwerkraft nach unten. Der Erweichungspunkt ist der Mittelwert jener Temperatur aus zwei Versuchen bei der die Stahlkugel eine Strecke von 25 mm zurückgelegt hat. Der Wert stellt die obere Grenze der Gebrauchsspanne dar [4],[6].

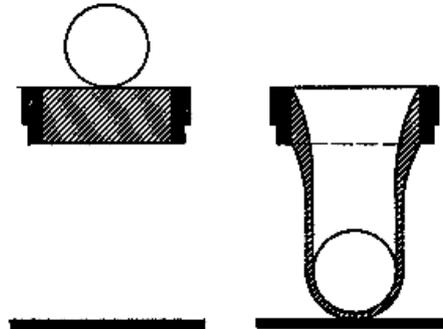


Abb. 5: Skizze des Versuchs Erweichungspunkt Ring-Kugel [4]

Brechpunkt nach Fraaß (EN 12593)

Es wird ein gleichmäßig dicker Bitumenfilm auf ein Metallblech aufgetragen, mit konstanter Geschwindigkeit abgekühlt und Biegungen ausgesetzt bis der Bitumenfilm bricht. Messwert ist jene Temperatur, bei der der erste Riss im Bitumen auftritt. Dieser Wert stellt die untere Grenze der Gebrauchsspanne dar. Abb. 6 zeigt das Prinzip des Versuchs [4],[6].

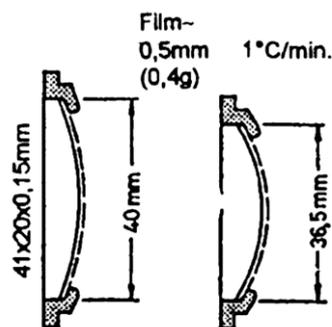


Abb. 6: Das Prinzip des Versuchs Brechpunkt nach Fraaß [4]

Bestimmung der Duktilität (DIN 52013)

Das Bitumen wird in eine Form aus einer Kupfer-Zink-Legierung, bestehend aus zwei Kopf- und zwei Seitenteilen, gegossen. Nach Erkalten des Bitumens werden die Seitenteile entfernt und die Bitumenprobe auseinander gezogen bis der Faden reißt. Abb. 7 zeigt die Form und die Zugrichtung des Versuchs. Die Dehnung wird gemessen und in Zentimetern als Wert für die Duktilität angegeben [4],[6].

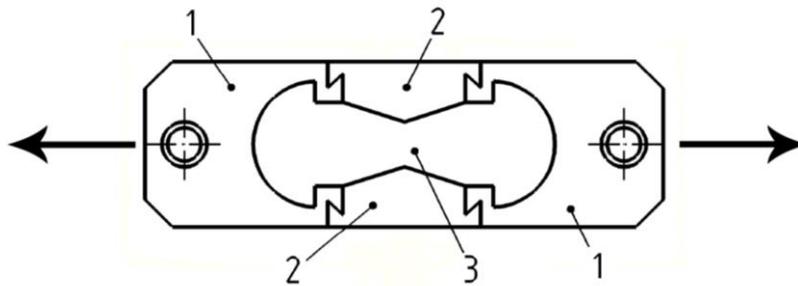


Abb. 7: Versuchsform zur Bestimmung der Duktilität: 1: Kopfteil; 2: Seitenteil; 3: Aussparung zum Eingießen des Bitumens [nach DIN 52013]

Bestimmung der elastischen Rückstellung (EN 13398)

Der Versuch dient zur Bestimmung des Modifizierungsgrades von polymermodifizierten Bitumen. Das Bitumen wird in ähnliche Formen wie in Abb. 7 gegossen. Nach entfernen der Seitenteile wird es in einem Wasserbad mit konstanter Geschwindigkeit auf 20 cm gezogen. Der Bitumenfaden ist in der Mitte zu zerschneiden und die elastische Rückverformung nach 30 min zu messen. Die auf die Ausziehlänge von 20 cm bezogene Dehnung in Prozent wird als Messwert angegeben [4],[6].

Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode (GVO)

Die GVO-Prüfmethode haben zum Ziel das Bitumen unter Beanspruchungen zu prüfen, die der in Realität vorliegenden Belastungen entsprechen. Im Gegensatz zu den empirischen Methoden findet also eine praxisrelevantere Beurteilung statt. Entwickelt wurden diese Methoden im Zuge des amerikanischen Straßenforschungsprogramms SHRP (Strategic Highway Research Program) unter dem Namen SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) [4],[6].

Zu den GVO-Prüfmethode zählen unter anderen:

- Rotational Viskometer (RV)
- Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- Bending Beam Rheometer (BBR)
- Direct Tension Test (DTT)
- Asphalt Binder Cracking Device (ABCD)

Rotational Viskometer (EN 13302)

Dieses Verfahren dient zur Bestimmung der dynamischen Viskosität des Bitumens mit Hilfe eines Gerätes mit einer rotierenden Spindel. Das Prinzip ist in Abb. 8 dargestellt. Das Drehmoment, das aufgebracht werden muss, um eine konstante Drehgeschwindigkeit aufrecht zu halten, wird gemessen und daraus die dynamische Viskosität abgeleitet. Üblicherweise wird der Versuch bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Die dynamische Viskosität ist ein Maß für die Verarbeitbarkeit des Bitumens beim Pumpen, Mischen und Einbau. Zu hohe Werte bedeuten einen hohen Energieeinsatz beim Pumpen oder schlechte Mischbarkeit mit der Gesteinskörnung [4],[6],[29].

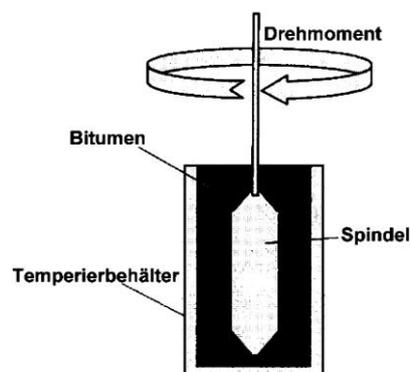


Abb. 8: Funktionsprinzip des Rotational Viskometers [29]

Dynamic Shear Rheometer (EN 14770)

Mit diesem Versuch wird das visko-elastische Materialverhalten von Bitumen untersucht. Das Bitumen wird kraftschlüssig zwischen zwei temperierbaren Platten eingebracht. Dazu werden in der Praxis Silikonformen zur Probevorbereitung verwendet. Die obere Platte führt oszillierende Bewegungen bei verschiedenen Temperaturen aus. In Abb. 9 ist das Versuchsprinzip dargestellt. Aus den Messparametern kann der Komplexe Schubmodul $|G|^*$, der sich aus dem Realteil G' (elastischer Anteil) und dem Imaginärteil G'' (viskoser Anteil) zusammensetzt, und der Phasenwinkel δ , der die Phasenverschiebung der resultierenden Deformation infolge der aufgetragenen Scherspannung beschreibt, abgeleitet werden. Die Messköpfe haben üblicherweise einen Durchmesser von 8 oder 25 mm. Diese Messkopfgeometrien eignen sich gut, um das Verhalten zwischen 0°C und 80°C zu beschreiben. Neuste Entwicklungen zeigen, dass sich mit einer 4 mm-Prüfgeometrie das Verhalten im Tieftemperaturbereich bis unter -30°C sehr gut beschreiben lässt. Ein weiterer Vorteil ist, dass weniger Bitumen pro Untersuchung gebraucht wird [26],[4],[6],[29].

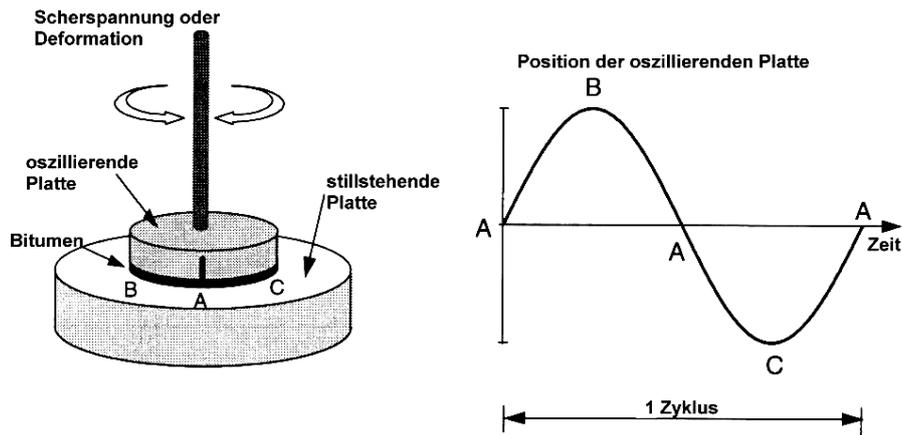


Abb. 9: Skizze des Versuchsprinzips des Dynamic Shear Rheometers [29]

Bending Beam Rheometer

Mit dem Bending Beam Rheometer wird das Tieftemperaturverhalten von Bitumen unter Zugspannungen beurteilt. Dazu wird ein Balken aus Bitumen in ein Kältebad eingebracht und in einem Drei-Punkt-Biegeversuch 240 s lang mittig belastet und damit eine Biegespannung im Bitumenbalken erzeugt. Das Messprinzip ist in Abb. 10 zu sehen. Die Durchbiegung wird gemessen und daraus die Steifigkeit ermittelt. Weiters wird die Steigung der Steifigkeitskurve (m-Wert), die die Kriechfähigkeit des Bitumens beschreibt, berechnet. Das Tieftemperaturverhalten ist besser, je geringer die Steifigkeit und je höher der m-Wert ist [4],[6],[29].

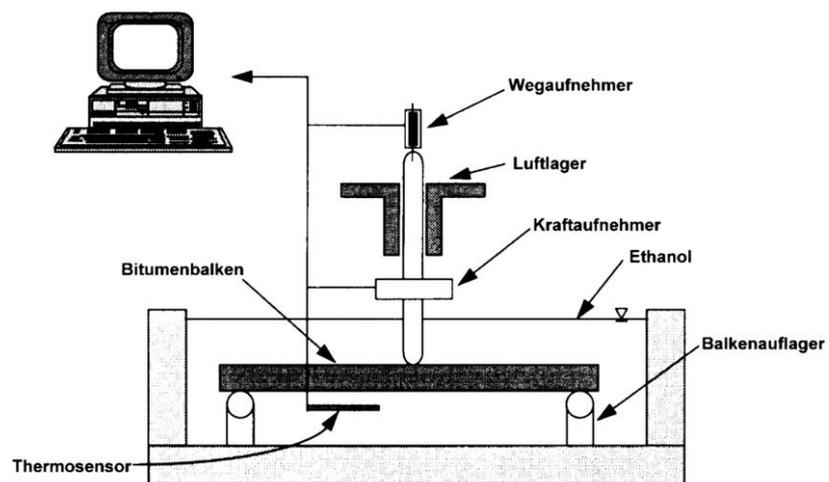


Abb. 10: Prinzip des Bending Beam Rheometers [29]

Direct Tension Test

Der Direct Tension Test ist ein Zugversuch bei tiefen Temperaturen. Viele Untersuchungen zeigen einen starken Zusammenhang zwischen Steifigkeit und Bruchdehnungen von

Bitumen. Hinsichtlich der Vermeidung von Kälterissen ist es wichtig, dass das Bitumen eine bestimmte Mindestdehnung erfahren kann bevor es reißt. Abb. 11 zeigt das Messprinzip. Die Ergebnisse des Versuchs, die Bruchdehnung und -spannung, sind also ein Maß für das Tieftemperaturverhalten. Ist die Bruchdehnung groß, so gilt das Bitumen als duktil bei niedrigen Temperaturen [4],[6],[29].

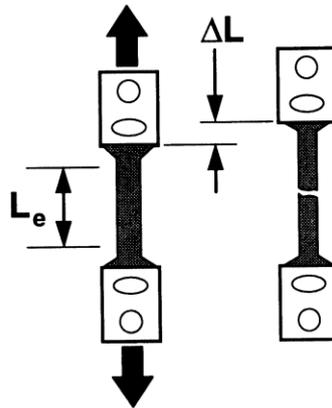


Abb. 11: Messprinzip des Direct Tension Tests [29]

Asphalt Binder Cracking Device

Dieser Versuch ist eine verhältnismäßig neue Methode zur Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen. Kern des Gerätes sind runde Silikonformen, in welchen ein innerer Metallring mit eingebauten Messsensoren sitzt. Der Ring besteht aus einer Eisen-Nickel-Legierung (Invar), die einen sehr geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzt. In den Spalt zwischen Silikon und Invarring wird das Bitumen eingefüllt. Eine Foto des Aufbaus ist in Abb. 12 zu sehen. Die Probenform samt eingegossenem Bitumen wird nun im Kälteschrank abgekühlt. Das Bitumen zieht sich aufgrund der fallenden Temperatur mehr zusammen als die Eisen-Nickel-Legierung und wird beim Erreichen der Bruchspannung reißen. Als Ergebnis des Versuchs erhält man die Bruchspannung, die zur Bruchspannung gehörende Temperatur und den Wärmeausdehnungskoeffizienten, der erstmals bei einem Standardtest ermittelt wird. Zudem liefert der Versuch zuverlässige Aussagen über die Einflüsse von polymermodifizierten Bitumen im Tieftemperaturbereich [27],[28].



Abb. 12: Probeneinbau beim Asphalt Binder Cracking Device [28]

2.4 Alterung

2.4.1 Allgemeines

Die Alterung beschreibt den Prozess der Veränderung der Eigenschaften des Bitumens mit der Zeit aufgrund von Faktoren wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, verschiedener reaktiver Gase in der Atmosphäre (u. a. Sauerstoff, Ozon oder Stickoxide) und der Verkehrsbelastung (mechanische Belastung sowie emittierte Schadstoffe). Es lassen sich drei Alterungsmechanismen unterscheiden [2],[8]:

- Destillative Alterung
- Oxidative Alterung
- Strukturalterung

Mit dem Altern tritt eine Verschlechterung der Gebrauchseigenschaften ein, das Bitumen wird spröde und hart. Diese Versteifung und Versprödung des Bindemittels hat auch direkten Einfluss auf die Eigenschaften von Asphalt: So kann dieser beispielsweise weniger Zugspannungen aufnehmen bzw. durch Relaxation abbauen. Bemerkbar ist das durch schlechtere Kälteflexibilität bei tiefen Temperaturen. Dagegen ist ein Asphalt mit gealtertem Bindemittel aufgrund einer höheren Steifigkeit verformungsbeständiger [9]:

2.4.2 Atmosphärenchemie

Aufbau der Atmosphäre

Anhand der Temperaturverteilung lässt sich die Atmosphäre in vier Schichten einteilen: Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Atmosphäre, die sich bis zu einer Höhe von circa 12 km erstreckt. Sie enthält 80% der gesamten Luftmasse und praktisch den gesamten

atmosphärischen Wasserdampf. Darüber befindet sich die Stratosphäre bis zu einer Höhe von circa 50 km. Aufgrund der Absorption der UV-Strahlung durch die Ozonschicht nimmt die Temperatur zu. Die nächsthöher gelegene Schicht heißt Mesosphäre und reicht bis circa 90 km. Mit steigender Höhe nimmt hier die Temperatur wieder ab. Am oberen Ende der Mesosphäre lassen sich die tiefsten Temperaturen der Atmosphäre messen. Der äußerste Teil der Atmosphäre bildet die Thermosphäre. Die Sonnenstrahlung ist hier so stark, dass es zu einem starken Anstieg der Temperatur kommt. Unterbrochen werden die vier Schichten durch die Zwischenschichten Tropopause, Stratopause und Mesopause. Der Aufbau der Atmosphäre ist in Abb. 13 dargestellt [23],[24].

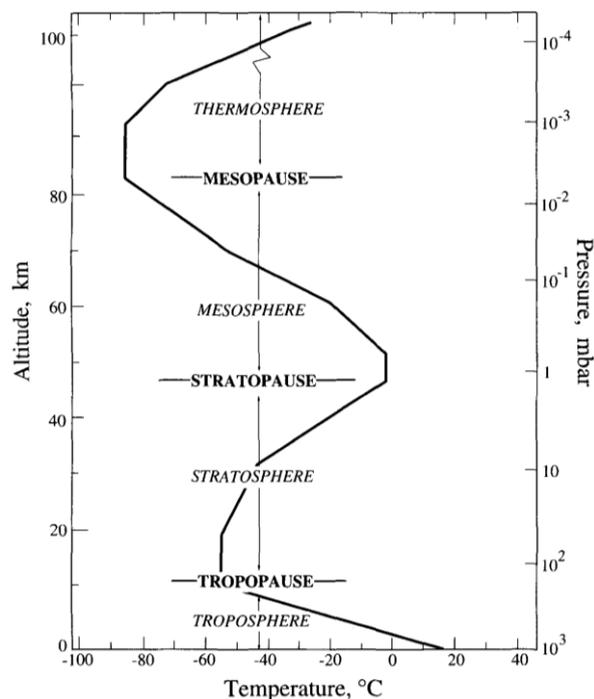


Abb. 13: Aufbau der Atmosphäre [22]

Reaktionszyklen in der Troposphäre

Im Wesentlichen ist die Troposphärenchemie eine Photochemie der Spurengase der Atmosphäre unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung. Sie ist stark verknüpft mit den Vorgängen in der Biosphäre, wobei der Mensch immer mehr Einfluss auf die natürlichen chemischen Prozesse hat. Kennzeichnend für Troposphäre ist eine rasche Durchmischung der Luftmassen. Neben den Hauptbestandteilen N₂ und O₂ beinhaltet sie auch einige sogenannte Spurengase, von denen viele für die Reaktionszyklen in der Troposphäre, aber auch für die für uns interessante Alterung von Bedeutung sind. In Tab. 1 sind einige dieser

Spurengase aufgeführt. Wegen des hohen Sauerstoffgehaltes in der Atmosphäre kommt es hauptsächlich zu Oxidationsprozessen. Da die Temperatur und die Sauerstoffkonzentration aber zu gering sind, besteht die einzige Möglichkeit für eine Oxidationsreaktion in der bereits erwähnten Photochemie bzw. Photooxidation, das heißt durch Sonnenlicht ausgelöste chemische Reaktionen [25].

Tab. 1: Zusammenstellung einiger Spurengase der Troposphäre und deren Herkunft [25]

Spurengas	Quelle	
	anthropogen	natürlich
CO ₂	fossile Brennstoffe, Waldrodungen	Respiration
H ₂ O-Dampf	vernachlässigbar gering	Verdampfung aus Gewässern
O ₃	Photochemie von Kfz-Abgasen	photochemische Prozesse
N ₂ O	Stickstoffdüngung	Bakterielle Aktivität
CH ₄	Reisanbau, Viehhaltung, Mülldeponie	Bakterien (anaerob), Waldbrände
FCKW (gesamt)	Treib-, Kühl-, Lösungs- und Schäummittel	keine
NH ₃	Viehhaltung, Düngung, Kläranlagen	Bakterielle Aktivität
CO	Verbrennung fossiler Brennstoffe	Oxidation von Kohlenwasserstoffen, Waldbrände
NO, NO ₂	Verbrennung fossiler Brennstoffe	Blitze (Gewitter)
SO ₂ *	Verbrennung Erdöl und Erdgas	Sümpfe, Vulkane, Ozeane
KW**	Kraftfahrzeuge, Lösungsmittel	Bäume (Terpene, Isoprene)
HCl	Verbrennung chlorhaltiger Substanzen	keine
CKW***	Lösungsmittel	keine

* alle Schwefelverbindungen, umgerechnet auf SO₂; ** KW = Kohlenwasserstoffe ohne Methan *** CKW = Chlorkohlenwasserstoffe

Die Gase, die einen wesentlichen Einfluss auf die Asphaltalterung in den oberen Zentimetern des Straßenquerschnittes haben, sind:

- Stickoxide (NO_x)
- Ozon (O₃)
- Hydroxyl-Radikal (OH)

Wasserlösliche Gase wie

2.4.3 Zeitlicher Verlauf der Alterung

Der Alterungsprozess lässt in drei Stufen einteilen:

- Ungealtert – Frischbitumen (A-Zustand)
- Kurzzeitgealtert – Der Zustand verursacht durch Herstellung, Transport und Einbau (B-Zustand)
- Langzeitgealtert – Der Zustand nach einer Liegedauer von 5-10 Jahren (C-Zustand)

Die Alterung wirkt sich nicht nur auf die Eigenschaften des Bitumens aus, wie in Abb. 15 zu sehen, kann auch eine Strukturveränderung beobachtet werden. In Abb. 16 ist der zeitliche Verlauf der Alterung aufgezeichnet. Der Alterungsindex beschreibt dabei das Verhältnis der Viskosität des gealterten zu der des ungealterten Materials, welches mit der Zeit ansteigt. Das bedeutet die Viskosität des Bitumens nimmt mit dem Alterungszustand zu. Außerdem erkennt man, dass die Kurzzeitalterung einen großen Teil des gesamten Alterungsprozesses ausmacht [4],[6],[8].

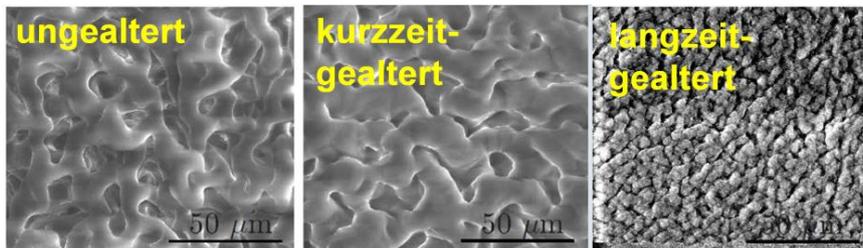


Abb. 15: Die Veränderung der Mikrostruktur von Bitumen mit der Zeit, beobachtet im Elektronenmikroskop (ESEM) [4]

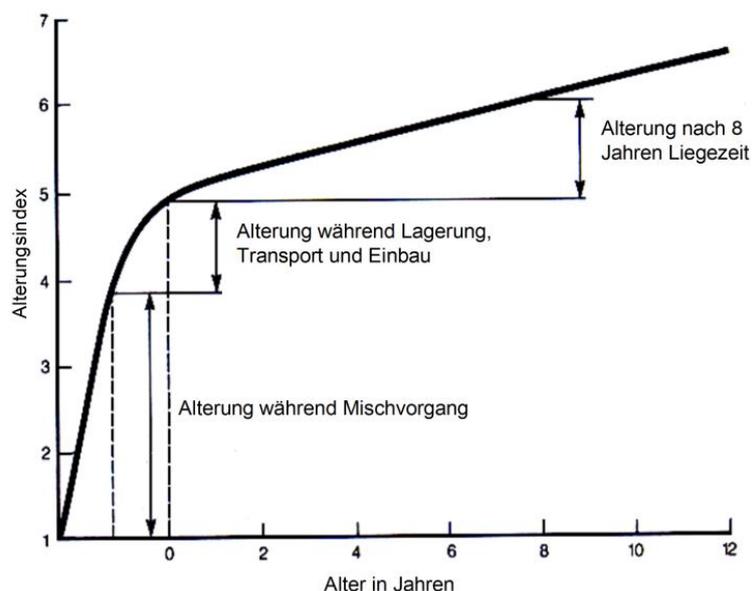


Abb. 16: Zeitlicher Verlauf der Alterung [4]

2.4.4 Destillative Alterung

Durch hohe Temperaturen kommt es zu einem Abdampfen weicherer Ölteile aus dem Bitumen. Diese Art der Alterung kommt daher vor allem bei der Asphaltherstellung und -verarbeitung vor. Faktoren, die die destillative Alterung bestimmen sind [2]:

- Bitumensorte: Weiches Bitumen enthält mehr Ölteile und ist daher alterungsanfälliger
- Temperatur: Mit steigender Temperatur erhöht sich die Menge der verdampfenden Ölteile
- Spezifische Oberfläche: Je größer Oberfläche, desto größer ist die Alterung

2.4.5 Oxidative Alterung

Durch Einwirkung von u.a. Sauerstoff, Ozon oder Stickoxiden kommt es zur Oxidation des Bitumens. Sowohl bei der Herstellung und Verarbeitung, als auch während der Nutzungsdauer kommt es zur oxidativen Alterung. Deren Ausmaß und Geschwindigkeit wird durch folgende Faktoren beeinflusst [2]:

- Luftzutrittsmöglichkeiten: Bei unbehindertem Luft- bzw. Sauerstoffzutritt hält die Reaktion unvermindert an
- Temperatur: Mit steigender Temperatur steigt auch die Reaktionsgeschwindigkeit
- UV-Lichtintensität: Höhere Intensitäten bewirken eine Beschleunigung der Oxidation

2.4.6 Strukturalterung

Die Strukturalterung beschreibt die Veränderung der kolloidalen Struktur des Bitumens aufgrund von destillativen und oxidativen Effekten. Eine Strukturalterung bedeutet immer eine Vergrößerung der kolloidal dispergierten Teilchen. Die Teilchen verklumpen und treten zu größeren Aggregaten zusammen. Das Bitumen geht vom Sol- zum Gelzustand über. Der Anteil der Asphaltene steigt, das Bitumen wird härter und durch fortschreitende Strukturierung gewinnt es an innerer Festigkeit (Strukturviskosität) [10].

2.4.7 Laboralterungsmethoden für Bitumen

Exkurs: Chemische Reaktionen

Chemische Reaktionen sind Vorgänge, die Stoffumwandlungen im Material bewirken. Es verändern sich dabei einerseits die relative Lage der Atomkerne und andererseits die

Struktur der dabei beteiligten Atome, Ionen und Moleküle. Einfluss auf den zeitlichen Verlauf von chemischen Reaktionen haben dabei die Parameter Konzentration und Temperatur [30]:

Da die Chance eines Teilchenzusammenstoßes umso höher ist, desto mehr Teilchen im Raum vorhanden sind, hat die Teilchenkonzentration maßgebenden Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Aufgrund dieser Erkenntnis resultiert aus einer Druckerhöhung im System eine schnellere Reaktionsgeschwindigkeit, da es zu einer Verdichtung der Teilchen kommt [30].

Die Teilchenbewegung in einem Gas erhöht sich mit steigender Temperatur. Damit bei einer Kollision von Teilchen eine Reaktion stattfindet, muss diese mit einer bestimmten, minimalen kinetischen Energie aufeinanderstoßen. Erhöht man nun die Temperatur, erhöht sich also die kinetische Energie der Teilchen und ebenso die Reaktionsgeschwindigkeit. Die RGT-Regel (Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel) nach VAN'T HOFF besagt, dass die kinetische Energie um das Zwei- bis Vierfache ansteigt, wenn die Temperatur um 10 K erhöht wird. Das bedeutet eine zwei- bis vierfache Reaktionsgeschwindigkeit. [30].

Diese Grundlagen dienen zur Entwicklung von Laboralterungsmethoden, da man bei der Laboralterung in kurzer Zeit Alterungsprozesse simulieren möchte, die im Feld Monate bis Jahre brauchen.

Laboralterungsmethoden für Bitumen

Man unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Arten der Laboralterung: Die Kurzzeitalterung und die Langzeitalterung. Alle Methoden haben gemeinsam, dass keine Ergebnisse über Eigenschaften geliefert werden, sondern gealterte Proben, die mit anschließenden Prüfmethoden beurteilt werden können. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die vorhandenen Methoden [8]:

◆ Kurzzeitalterung

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

◆ Langzeitalterung

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

Die in Österreich am meisten verwendeten Methoden sind der RTFOT und das PAV. Im Weiteren werden diese beiden Methoden näher beschrieben.

Rolling Thin Film Oven Test–RTFOT

Für die Durchführung des Versuchs ist ein spezieller, elektrisch beheizbarer Ofen notwendig. Im Inneren herrschen konstante Temperaturen von 163°C. An der Rückseite im Innenraum ist eine rotierende Flaschentrommel montiert, die acht sogenannte „RTFOT-Flaschen“ mit je 35 g Bitumen aufnehmen kann. Durch das Rotieren der Trommel entsteht in den Flaschen ein dünner, kontinuierlich fließender Bitumenfilm. Dadurch wird die Oxidationsoberfläche maximiert. Zusätzlich wird die Oxidation durch eine Luftdüse mit ebenfalls 163°C, die durch die Flaschenöffnung bläst, verstärkt. Die Flaschen verweilen für 75 min im Ofen. Abb. 17 zeigt eine schematische Skizze des Versuchs [6],[29].

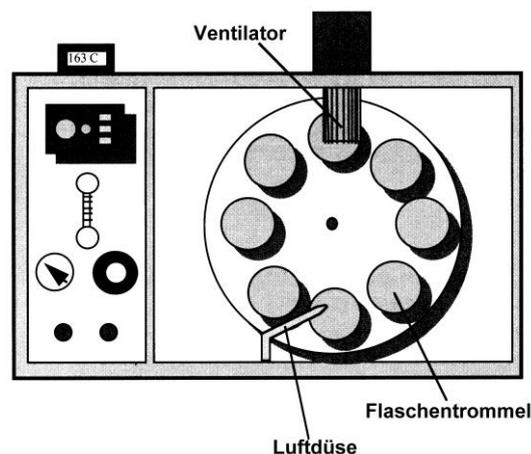


Abb. 17: Schema des RTFOT [29]

Pressure Aging Vessel–PAV

Mit Hilfe des PAV wird eine Liegedauer des Asphalts von 5-10 Jahren simuliert. Um den gesamten Lebenszyklus des Bitumens von Herstellung über Einbau bis eingebauten Zustand abzubilden, werden die Proben zunächst mit dem RTFOT kurzzeitgealtert und anschließend mit dem PAV langzeitgealtert [6].

Das Bitumen wird in dünnen Schichten auf Blechschalen verteilt, in den Schalenhalter gestellt und dieser in den Druckkessel hineingestellt. Das Prinzip des PAV ist in Abb. 18 dargestellt. Die Temperatur im Druckkessel wird je nach klimatischen Verhältnissen aus 85, 90, 100 oder 110°C eingestellt. Für Österreich sind 100°C einzustellen. Nach dem Schließen des Kessels wird dieser mit 2,10 MPa beaufschlagt. Nach 20 Stunden ist der Versuch beendet und das Bitumen kann entnommen werden [29].

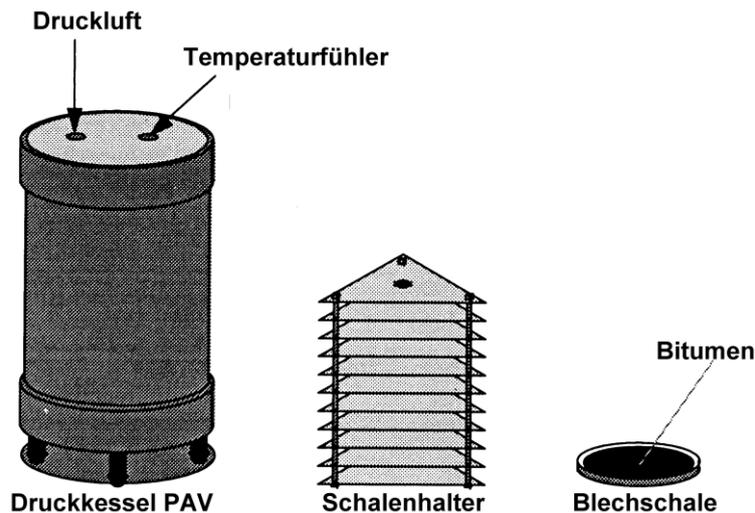


Abb. 18: Skizze des Versuchsaufbaus des PAV [29]

2.4.8 Alterungsmethoden für Asphaltmischgut

Allgemeines

Mehr als 30 verschiedene Alterungsmethoden für Asphaltmischgut wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt. Zwei grundsätzliche Herangehensweisen lassen sich dabei unterscheiden: Zum einen wird das lose Asphaltmischgut gealtert und dann zu Probekörpern verdichtet. Das bietet den Vorteil jede beliebige Probekörperform herzustellen, erfasst aber eventuell den Alterungsprozess im Asphaltgefüge nicht realitätsnah. Zum anderen werden die bereits hergestellten Probekörper gealtert. Dabei ist zu beachten, mit welchem Medium gealtert wird: Wird beispielsweise mit hoher Temperatur und Druck, ähnlich dem PAV, gealtert, weicht der Probekörper auf und muss nachverdichtet werden, was wiederum eine Unsicherheit in der Erfassung der Materialparameter mit sich bringt. Die Art des Alterungsmedium ist dabei sehr vielfältig. Die am meisten verwendeten sind nachfolgend aufgelistet [9],[13]:

- Luft bei Temperaturen zwischen 40 bis 165°C

- Sauerstoff
- Stickstoff
- UV-Licht
- Wasserstoffperoxid
- Ozon
- Druck
- Wasser bzw. Wasserdampf

Vorhandene Laboralterungsmethoden für Asphaltmischgut

In Tab. 2 sind einige der vorhandenen Asphaltalterungsmethoden aufgelistet. Anschließend wird das Bewitterungsschranksystem (BSS) und das Alterungsverfahren PAV-A näher erläutert. Die im Zuge dieser Arbeit verwendete Viennese Aging Procedure (VAPro) wird in 3.3.3 vorgestellt.

Tab. 2: Übersicht über vorhandene Asphaltalterungsmethoden [13],[14],[15]

Alterungsmethode	Temperatur in °C	Dauer in h	Probenart	Alterungsmedium
Alterung im Wärmeschrank	135 - 175	Apr.24	loses Material	Licht & Stickstoff
Bewitterungsschranksystem (BSS)	48	672	Probekörper	UV-Licht, Wasser &Luft
Bochumer Alterungsverfahren (BAV)	100	72	Probekörper	Luft
Braunschweiger Alterung (BSA)	80	96	loses Material	Luft
BRRC long term Re Road	60	24, 72, 216, 336	loses Material	Sauerstoff
Khalid & Walsh	60	bis 600	Probekörper	Luft
Kumar & Goetz	60	24 - 240	Probekörper	Luft und Wasser
Long-Term Aging	60	120 - 240	Probekörper	Druck & Luft
Low-Pressure Oxidation (LPA)	60 - 85	120	Probekörper	Sauerstoff
Modelltopf nach Potschka	140	1	loses Material	Sauerstoff-Stickstoff Gemisch
PAV-A	50	20	Probekörper	Druck & Luft
Saruration Aging tensile stiffness conditioning Test (SATS)	85	65	Probekörper	Wasser und Luft
UV (LCPC) long term	60	336	loses Material	UV-Licht
Warmboldscher Alterungstisch	40	720 - 1440	Probekörper	Luft & UV-Licht

Bewitterungsschranksystem (BSS)

Dieses Verfahren kommt ursprünglich aus der Kunststoffindustrie zur Simulation der Alterung von Kunststoffen insbesondere durch Sonneneinstrahlung, Wärme und Feuchtigkeit. Zur Alterung von Asphaltprobekörpern kommen veränderte Parameter zum Einsatz: Die Temperatur im Schrank liegt bei 48°C und die Luftfeuchte bei 65%. Es kommen verdichtete Probekörper zum Einsatz. Mittels Xenonbogenlampen, die Licht bis ins

ultraviolette Spektrum erzeugen, wird in hell/dunkel-Zyklen beleuchtet, wobei die Probekörper immer bei Dunkelheit mit Sprühwasser beregnet werden. Wie in 2.4.2 beschrieben, entstehen dabei durch Photooxidation Ozon und Stickoxide. Die Versuchsdauer ist auf vier Wochen festgelegt. Während dieser Dauer werden die Probekörper kontinuierlich den Beanspruchungszyklen unterzogen. Abb. 19 zeigt den Probenträger des Bewitterungsschranks [9].



Abb. 19: Probenträger des BSS mit prismatischen Probekörper [9]

Alterungsverfahren PAV-A

Das PAV-A entspricht dem Langzeitalterungsversuch PAV für bitumenhaltige Bindemittel. Mit entsprechend angepassten Parametern können im PAV Asphaltprobekörper gealtert werden. So können, wie in Abb. 20 zu sehen, mit einem modifizierten Gestell vier prismatische Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm in dem Druckbehälter untergebracht werden. Diese werden bei 50°C und einem Druck von 2,1 MPa 20 Stunden gealtert [9].



Abb. 20: Probengestell des PAV-A mit prismatischen Probenkörpern [9]

3 Vorbereitungen und verwendete Methoden

3.1 Materialien

3.1.1 Gestein

Als Gesteinskörnung für die Herstellung der Probekörper werden Gesteine mit der Handelsbezeichnung Loja des Hartsteinwerkes Loja Betriebs GmbH verwendet. Der Steinbruch liegt in einem von Nordwest nach Südost verlaufenden Gebietes in Niederösterreich nahe Persenbeug, das Lojagraben genannt wird. Geologisch betrachtet grenzen hier die Böhmisches Masse an die südlich anschließenden tertiären und quartären Lockergesteine des Alpenvorlandes an. Laut geologischem Gutachten handelt es sich bei den Gesteinen um Porphyrit. Das geförderte Ganggestein zeichnet sich durch außergewöhnliche Härte, Zähigkeit und hohe Druck- bzw. Schlagfestigkeit aus. In Brech-, Sieb- und Transportanlagen wird das Gesteinsmaterial aufbereitet, klassifiziert, gelagert und verladen. [11],[12].

3.1.2 Füller

Für die Herstellung der Probekörper wird als Fremdfüller Kalksteinmehl verwendet. Dieser besteht aus gewaschenem, gemahlenem und feuergetrocknetem Kalkstein mit einem maximalen Feuchtegehalt von 0,1%. Die Untersuchung der Korngrößenverteilung zeigt, dass 99,8 M.-% des Materials kleiner als 0,25 mm, 95 M.-% kleiner als 0,125 mm und 76,5 M.-% kleiner als 0,063 mm Korndurchmesser sind.

3.1.3 Bitumensorten

Es werden sechs verschiedene Bitumensorten ausgesucht, um den Einfluss der Laboralterung auf unterschiedliche Bindemittel zu untersuchen. Dabei werden sowohl Straßenbaubitumen verschiedener Herkunft, als auch polymermodifizierte Bitumen verwendet. Die verwendeten Bitumensorten, zusammen mit Herkunft, Laborcode und Penetrationswert, sind in Tab. 3 aufgelistet.

Tab. 3: Verwendete Bitumensorten und deren Kennwerte

Bitumensorte	Herkunft	Laborcode	Penetration in 1/10 mm
70/100	A	B655A	88
70/100	B	B637A	79
70/100	C	B501A	64
70/100	D	B502A	55
PmB 45/80-65	A (2012)	B288A	67
PmB 45/80-65	A (2017)	B642A	65

3.1.4 Asphaltkonzept

Da vorrangig die oberste Schicht, die Deckschicht, des Straßenquerschnittes den Umwelteinflüssen ausgesetzt ist, fällt die Wahl des zu untersuchendes Asphaltmischguts auf einen Asphaltbeton des Typs AC 11 deck A1. Nach ÖNORM B 3580-1 und ONR 23580, Anhang C wird die Zusammensetzung dieses Asphaltmischguts gewählt. Tab. 4 zeigt die Rezeptur des Asphaltmischguts anhand der prozentualen Massenanteile der Gesteinskörnungen und des Bitumens. Verwendete Materialien sind der Füller, wie in 3.1.2 beschrieben, und die Loja-Gesteinskörnungen der Korngruppen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/11. Eine Darstellung der Sieblinie mit Grenzsieblinienbereichen nach ONR 23580, Anhang C ist in Abb. 21 zu sehen.

Tab. 4: Massenanteile der einzelnen Komponenten des Asphaltmischguts

Material	Handelsbezeichnung	Laborcode	Massenanteil in %
Füller	Kalksteinmehl	F053	5,80
0/2	Loja	G762	36,84
2/4	Loja	G764	15,18
4/8	Loja	G669	14,05
8/11	Loja	G726	22,93
		Bitumen	5,20
			∑ 100,00

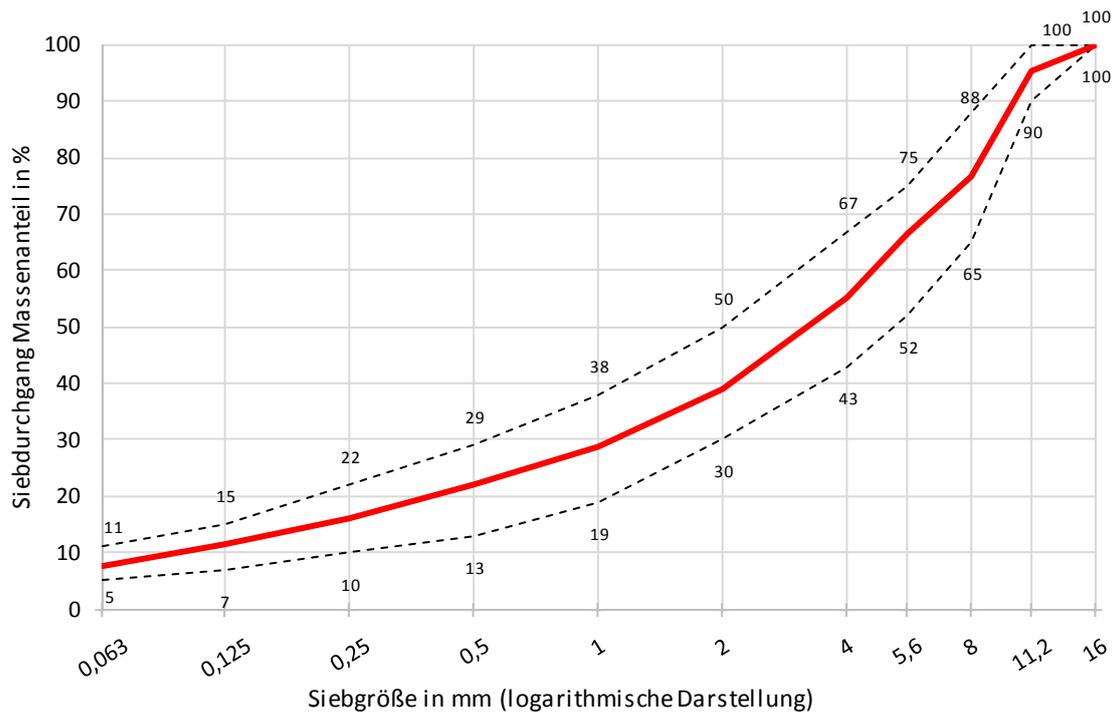


Abb. 21: Darstellung der IST-Sieblinie (rot) mit den Grenzen nach ONR 23580, Anhang C

3.2 Probekörperherstellung

3.2.1 Herstellung des Mischguts und der Probekörper

Für die Durchführung des Prüfprogramms werden zylindrische Probekörper mit 100 mm Durchmesser und 40 mm Höhe hergestellt. Dazu werden zunächst die Mischgutkomponenten, wie in 3.1 beschrieben, vorbereitet und in einem Gegenlaufzwangsmischer nach EN 12697-35 gemischt. Anschließend wird das Mischgut mit einem Walzsegmentverdichter der Firma Freundl nach EN 12697-33 zu Platten, mit den Abmessungen 500x260x40 mm, verdichtet. Aus diesen Platten können schlussendlich acht Probekörper ausgebohrt werden. Es werden insgesamt sechs Platten, mit den in 3.1.3 ausgewählten Bitumen, hergestellt. Je Bitumen stehen also acht Probekörper zur Verfügung. Parallel zur Herstellung der Platten wird auch die Rohdichte des Mischguts, mit Hilfe eines Pyknometers nach EN 12697-5, Verfahren A, bestimmt. Diese ist in weiterer Folge zur Bestimmung der Probekörperkenndaten erforderlich.

3.2.2 Ermittlung der Probekörperkenngrößen

Zur Berechnung der Hohlraumgehalte der Probekörper, nach EN 12697-8, wird neben der Rohdichte des Mischguts auch die Raumdichte der einzelnen Probekörper benötigt. Nach

EN 12697-6 stehen vier verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte zur Verfügung:

- Verfahren A: Raumdichte trocken
- Verfahren B: Raumdichte-gesättigte Oberfläche trocken (SSD)
- Verfahren C: umhüllter Probekörper
- Verfahren D: Raumdichte durch Ausmessen

Verfahren A ist für sehr dichte Probekörper geeignet. Die Probekörperoberfläche sollte glatt und die inneren Hohlräume schwer zu erreichen sein. Aus diesem Grund kommt dieses Verfahren nicht in Frage, da für die verwendete Alterungsmethode durchlässige Probekörper verwendet werden müssen. Verfahren C wird aufgrund der Schwierigkeit von den anschließenden Untersuchungen ausgeschlossen.

Verfahren B eignet sich für Asphaltbetone bis 5% Hohlraumgehalt. Wird zu viel Feuchtigkeit aus den Unebenheiten des Probekörpers abgetupft führt dieses Verfahren führt zu einer Überschätzung der Raumdichte bzw. Unterschätzung des Hohlraumgehaltes. Verfahren D ist besonders für Probekörper mit regelmäßiger Oberfläche und Geometrie vorzuziehen. Dieses Verfahren tendiert zu einer Unterschätzung der Raumdichte bzw. Überschätzung des Hohlraumgehaltes, da durch Unebenheiten der Probekörperoberfläche Volumina einbezogen werden, die kein Material enthalten [13].

Die hergestellten Probekörper weisen eine unregelmäßige Oberfläche bzw. Geometrie auf, das spricht für das Verfahren B. Allerdings werden aufgrund der nötigen Durchlässigkeit für die Alterungsversuche Hohlraumgehalte über 5% angestrebt. Der Einfachheit halber werden alle Raumdichten bzw. Hohlraumgehalte in weiterer Folge auf das Verfahren B bezogen.

3.3 Prüfprogramm und Prüfmethoden

3.3.1 Ablauf

Nachdem alle Probekörper hergestellt, beschriftet und alle Kenndaten ermittelt wurden, kann das Prüfprogramm durchlaufen werden. Das Prüfprogramm dieser Arbeit gestaltet sich wie folgt:

- Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der Probekörper vor der Alterung
- Alterung der Probekörper mittels VAPro
- Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der Probekörper nach der Alterung
- Rückgewinnung des Bindemittels der Plattenreste (kurzzeitgealterter Zustand) und der VAPro-gealterten Probekörper (langzeitgealterter Zustand)
- Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des kurz- und langzeitgealterten Bitumens

3.3.2 Auswahl der Probekörper für die Alterung

Die Steifigkeit von Asphalt wird durch seinen Hohlraumgehalt beeinflusst. Untersuchungen zeigen, je höher der Hohlraumgehalt ist, desto niedriger ist die Steifigkeit. Daher sind in der Praxis auch maximale Hohlraumgehälter vorgeschrieben, um gewissen Mindeststeifigkeiten einzuhalten. Aus diesem Grund werden, um eine bessere Vergleichbarkeit der Steifigkeitsuntersuchungen zu erzielen, die Probekörper anhand ihres Hohlraumgehaltes ausgewählt. Zusätzlich ist ein gewisser Mindesthohlraumgehalt zur Sicherstellung der Durchlässigkeit der Probekörper für die Alterung vonnöten. Daher werden für die Alterung und wiederholte Steifigkeitsprüfung Probekörper gewählt deren Hohlraumgehälter zwischen 6-7% liegen Insgesamt werden 18 Probekörper gealtert (drei je Bitumen) [13],[16].

3.3.3 Alterung mit dem Viennese Aging Procedure – VAPro

Versuchsbeschreibung

Das Prinzip des Viennese Aging Procedure (VAPro), nach ONR CEN/TS 12697-52, ist, dass ein Probekörper mit ozon- und stickoxidangereicherter Luft durchströmt wird. Angereichert wird die Luft mit Hilfe eines Ozongenerators. Der Versuch läuft in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von 60°C ab, was die Temperatur auf der Straßenoberfläche im Sommer realitätsnah erfassen soll. Um die Reaktivität des durchströmenden Gases zu erhöhen und so

die Alterung zu beschleunigen wird das Gas, mit Hilfe einer Spirale in einem Ölbad, auf 70°C vorgewärmt [18].

Versuchsaufbau

Der Versuch besteht im Wesentlichen aus den nachstehend aufgelisteten Komponenten, die in weiterer Folge genauer erklärt werden. Abb. 22 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchs.

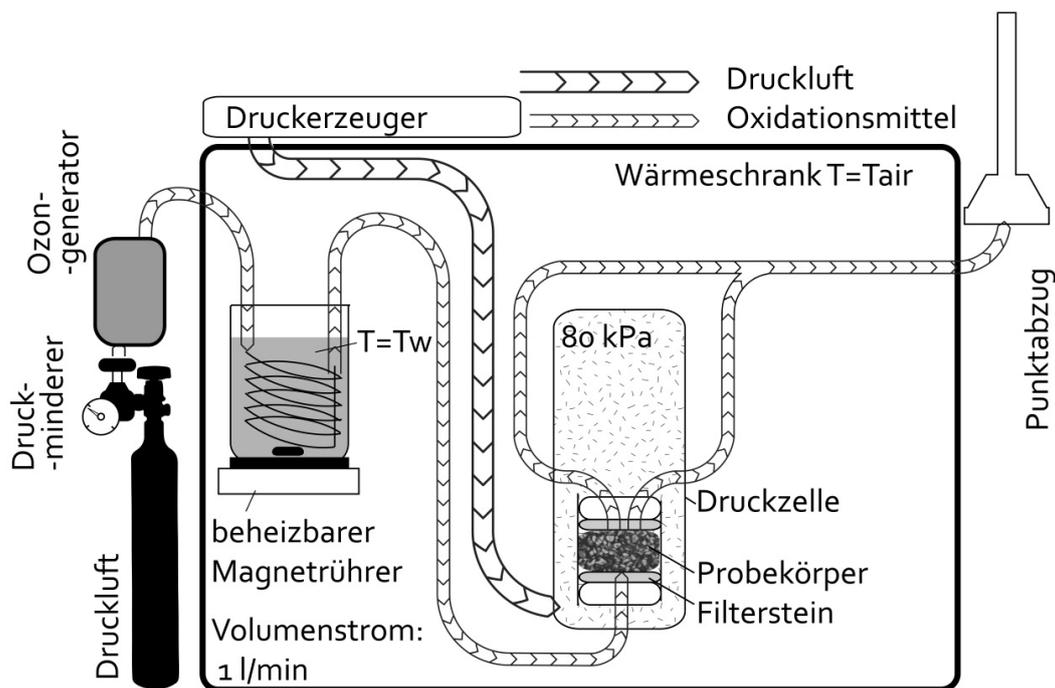


Abb. 22: Schematischer Versuchsaufbau [13], [18]

Druckzelle

Der Probekörper wird zwischen zwei Filtersteinen, umschlossen mit einer Membran in der Druckzelle eingebaut. An beiden Enden befinden sich Aufsätze an denen Schläuche angebracht sind, um das Gas ein- bzw. abzuführen. In der Zelle wird ein Druck von 0,8 bis 0,9 bar aufgebracht, um die Membran an den Probekörper zu pressen und damit sicherzustellen, dass das Gas durch den Asphaltprobekörper strömt und nicht um ihn herum. Die Druckluft wird vom Labordruckluftsystem bereitgestellt. Durchströmt wird der Probekörper von unten nach oben mit einem Volumenstrom von 1,0 l/min bei einem Druck von etwa 0,25 bar, der von der Durchlässigkeit der Probekörper abhängt.

Ozongenerator

Das Gerät der Firma Anseros dient der Anreicherung der Druckluft mit Ozon bzw. Stickoxiden, mit Hilfe einer Hochspannungs-Entladungsröhre. Dabei wird zwischen zwei Elektroden eine Hochspannung erzeugt, die den in der Luft vorhandenen Sauerstoff spaltet. Die hoch reaktiven Sauerstoffatome reagieren mit dem Sauerstoff zu Ozon bzw. durch Reaktion mit dem in der Luft vorhandenen Stickstoff zu Stickoxiden. Damit der Generator effizient arbeitet, ist es wichtig, das Ausgangsgas vorher aufzubereiten: Durch Einschalten einer Filterstrecke werden Staub, Verunreinigungen und übermäßige Feuchtigkeit entfernt. Dies erhöht zudem die Lebensdauer des Ozongenerators. Vor den Generator ist ein Durchflussregulator und ein Druckminderer geschaltet, um einerseits den Durchfluss auf 1,0 l/min einstellen zu können und andererseits den Druck auf maximal 1 bar beschränken zu können, da sonst der Ozongenerator Schaden nimmt. Ein Foto des Ozongenerators ist in Abb. 23 zu sehen.

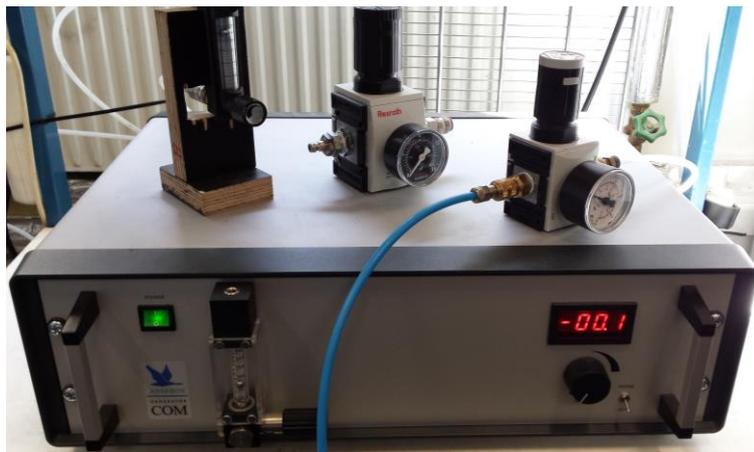


Abb. 23: Der Ozongenerator. On top: Durchflussregulator und Druckminderer

Anwärmspirale

Die Spirale, welche in einem Ölbad (Rapsöl) liegt, das durch einen Magnetrührer mit Heizplatte auf 70°C gehalten wird, dient dazu das Gas vor dem Durchströmen des Probekörpers reaktiver zu machen um damit die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen.

Versuchsablauf

Die Druckluft wird in den Ozongenerator geleitet und dort mit Ozon und Stickoxiden angereichert. Anschließend wird es in den Wärmeschrank geleitet, wo es zunächst durch die Anwärmspirale fließt und schließlich durch den Probekörper geleitet wird. Am Ende wird das

Oxidationsmittel durch einen Punktabzug abgezogen. Ein Foto des Versuchsaufbaus ist in Abb. 24 zu sehen.



Abb. 24: Der Versuchsaufbau im Wärmeschrank (links: Anwärmspirale, rechts: Druckzelle)

3.3.4 Prüfmethode zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der Asphaltprobekörper

Spaltzug-Schwellversuch – IT-CY

Der Spaltzug-Schwellversuch dient dazu die Steifigkeit zylindrischer Probekörper, bei verschiedenen Temperaturen und Belastungsfrequenzen, zu untersuchen. Um die Veränderungen in den Materialparametern zu beurteilen, werden die Probekörper vor und nach der Alterung geprüft. Daher müssen die Versuchsbedingungen so festgelegt werden, dass es zu keiner Schädigung der Probekörper infolge der Belastung kommt. Dazu werden in Vorversuchen die maximalen Oberspannungen je Frequenz so festgelegt, dass die resultierenden horizontalen Dehnungen zwischen 0,05 und 0,10% liegen, wobei man jedoch versucht sich an die untere Grenze von 0,05% anzunähern. Diese Randbedingungen wurden in [13] und [16] nachgewiesen. Die zu prüfenden Frequenzen werden zu 0,1 Hz, 1,0 Hz, 5,0 Hz, 10,0 Hz und 20,0 Hz gewählt. Die festgelegten Oberspannungen je Bitumensorte und die verwendeten Lastwechselzahlen je Frequenz sind in Tab. 5 aufgelistet. Die Unterspannung wird zur Lagesicherung mit 35 kPa festgelegt und ist für alle Versuche gleich groß. Der Probekörper wird mit einer kraftgesteuerten, sinusförmigen

Druckschwellkraft belastet. Dadurch wird im Probekörper ein zweiachsiger Spannungszustand induziert. In horizontaler Richtung entstehen Zugspannungen und in vertikaler Richtung Druckspannungen. Das Verhältnis Zugspannung zu Druckspannung in der Mitte des Probekörpers beträgt dabei 1 : 3. In Abb. 25 ist die Spannungsverteilung im Probekörper dargestellt [13],[16],[20].

Tab. 5: Prüfparameter des Spaltzug-Schwellversuchs bei 10°C

Frequenz in Hz	Lastwechsel	Unterspannung in kPa	Oberspannungen je Bitumen in kPa					
			B655A	B637A	B501A	B502A	B642A	B288A
0,1	9	35	120	115	135	130	100	105
1,0	15	35	165	150	210	200	135	145
5,0	50	35	220	195	280	270	180	190
10,0	100	35	250	220	305	300	200	220
20,0	100	35	190	255	355	360	235	250

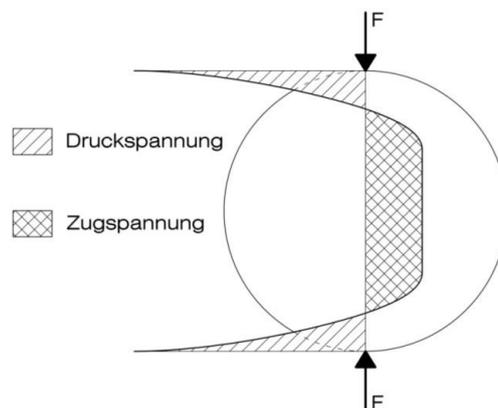


Abb. 25: Horizontaler Spannungsverlauf im Probekörper beim Spaltzug-Schwellversuch ([13], nach [20])

Zur Versuchsdurchführung wird ein servohydraulisches Prüfsystem der Firma Wille Geotechnik mit der Software GEOSys verwendet. Die in Abb. 26 gezeigte Belastungsvorrichtung ist in einem Klimaschrank eingebaut und wird von oben von der Maschine belastet. Als Prüftemperatur wird 10°C gewählt. Über die, im Halterahmen mittig positionierten, induktiven Wegaufnehmer (Linear Variable Differential Transformer-LVDT), mit einer Auflösung von 0,1 µm, werden die horizontalen Verformungen gemessen und in der Software aufgezeichnet. Durch Auswertung der Messergebnisse nach [20] mit Hilfe der Labormanagementsoftware (LAMA) erhält man den dynamischen E-Modul $|E^*|$ und den Phasenverschiebungswinkel δ [20].

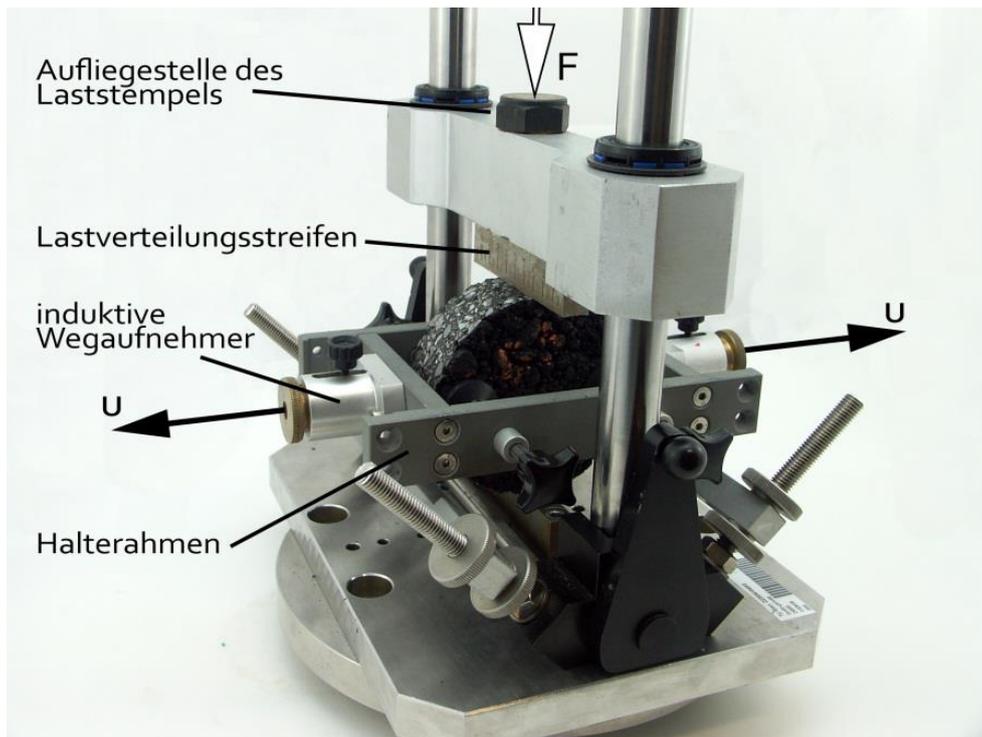


Abb. 26: Aufbau der Belastungsvorrichtung des Spaltzug-Schwellversuchs [13]

3.3.5 Prüfmethode zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften der Bitumen

Bitumenrückgewinnung

Um Versuche an den Bindemitteln selbst durchzuführen, muss das Bitumen zunächst aus den Probekörpern bzw. den Plattenresten rückgewonnen werden. Das geschieht mit dem Asphaltextraktor „ecoTest“ der Firma infraTest, wobei das Bitumen mit Hilfe des Lösungsmittels Tetrachlorethylen gelöst wird. Anschließend wird mittels Vakuumdestillation mit dem Gerät „Laborata 4000 efficient“ der Firma Heidolph das Lösungsmittel vom Bitumen getrennt. Durchgeführt wird der gesamte Prozess nach EN 12697-3. Der Ablauf der Bitumenrückgewinnung gestaltet sich wie folgt:

- Aufwärmen des Probekörpers bei 90°C für circa 45 min zur einfachen Zerkleinerung der Probe für die Extraktion
- Trennen der Komponenten des Probekörpers im Extraktor
- Destillation des Bitumen-Lösungsmittel-Gemisches bei 110°C und 150 mbar
- Absenken des Druckes auf 20 mbar und anschließendes Erhitzen des Kolbens auf 180°C
- Halten der Temperatur für 10 min
- Ausbau des Destillierkolbens und fünfminütige Temperierung bei 180°C für leichteres Ausgießen

- Ausgießen des Bitumens in eine passende Dose

Dynamic Shear Rheometer – DSR

Die rückgewonnenen Bitumenproben werden mit dem, in 2.3.7 beschriebenen, Dynamic Shear Rheometer der Firma Haake geprüft. Verwendet wird dabei ein Messkopf mit 25 mm Durchmesser und einem Messspalt von 1 mm. Abb. 27 zeigt ein Foto der Prüfmaschine. Die angewendeten Prüfparameter gestalten sich wie folgt:

- Prüftemperaturen: 40°C, 45°C, 52°C, 58°C, 64°C, 70°C, 76°C, und 82°C
- Prüffrequenzen: 0,1 Hz, 0,3 Hz, 1,0 Hz, 1,59 Hz, 3,0 Hz, 5,0 Hz, 10,0 Hz

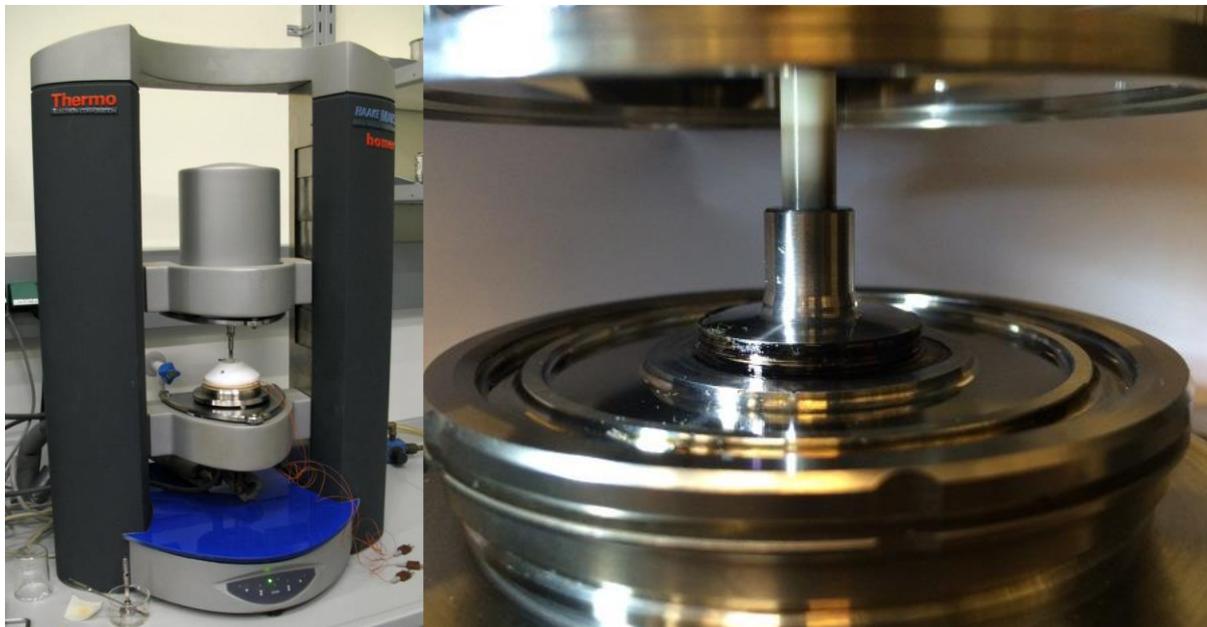


Abb. 27: Foto des Dynamic Shear Rheometers. Rechts: Nahaufnahme des Messkopfes [13],[8]

Die Prüfergebnisse komplexer Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenwinkel δ werden automatisch vom an das DSR angeschlossenen Computer nach den folgenden Formeln berechnet:

Komplexer Schubmodul

$$\tau = \frac{2 * M}{\pi * r^3}$$

$$\gamma = \frac{\alpha * r}{h}$$

$$|G^*| = \frac{\tau}{\gamma}$$

- τ..... Scherspannung [Pa]
- M..... maximal aufgebrachtes Drehmoment [Nm]
- r..... Plattenradius [m]
- γ..... Deformation []

α Verdrehwinkel [rad]
h..... Messspalt [m]
 $|G^*|$... komplexer Schubmodul [PA]

Phasenverschiebungswinkel

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} * 360^\circ$$

$$t = \frac{1}{f}$$

δ Phasenverschiebungswinkel [°]
 Δt Zeitverschiebung zwischen τ_{\max} und γ_{\max} [s]
t..... Zeit für eine Schwingung [s]
f..... Frequenz [Hz]

4 Ergebnisse und Interpretation

4.1 Asphalt – Diskussion der Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche

4.1.1 Materialeigenschaften vor der Alterung

Die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche, der gesamten Probekörperreihe vor der Durchführung der VAPro-Alterung, sind in Abb. 28 und Abb. 29 dargestellt. Vorweg ist zu sagen, dass anhand der Daten in den beiden Diagrammen gut die Streuung der Spaltzug-Schwellversuche erkennbar ist.

In Abb. 28 ist der komplexe E-Modul $|E^*|$ aller Probekörper je Bitumen für die Frequenzen 1,0 Hz, 5,0 Hz und 10 Hz dargestellt. Zusätzlich ist der Mittelwert, je Frequenz inklusive Standardabweichung, angegeben.

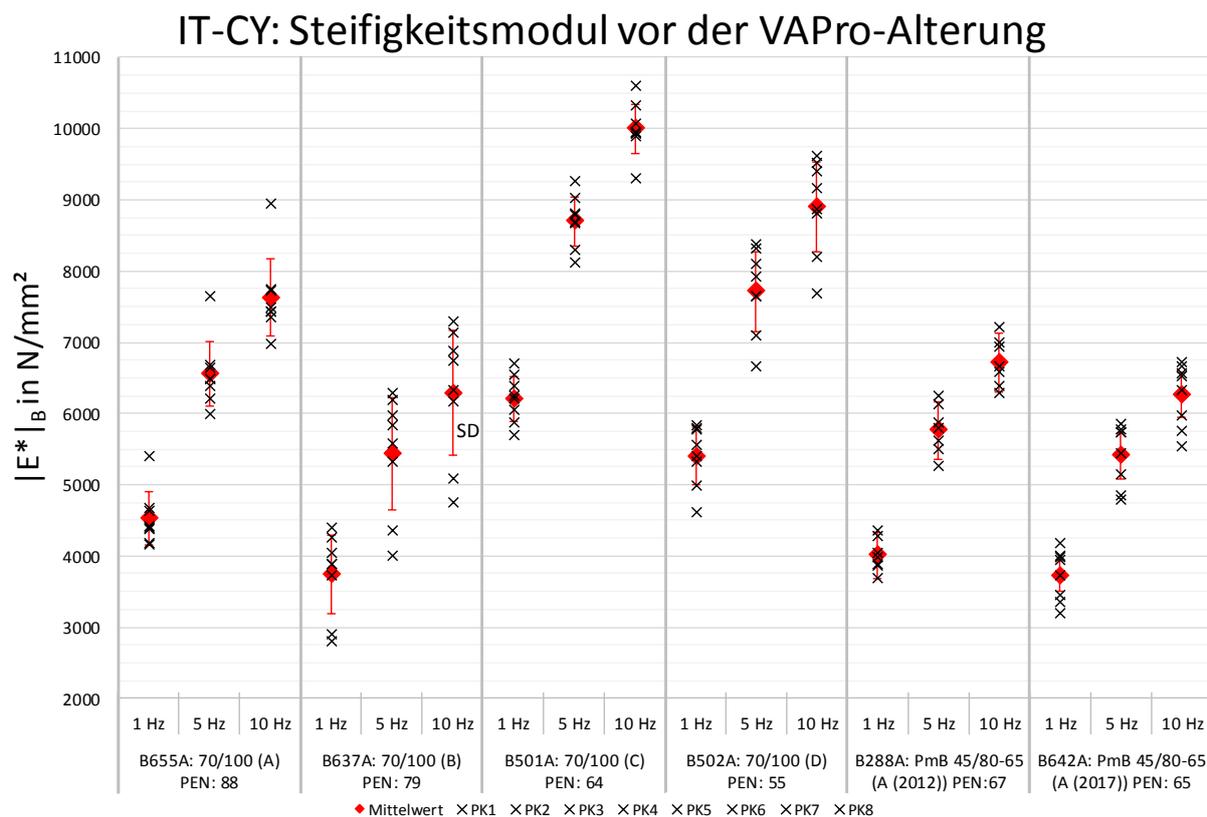


Abb. 28: Der dynamische E-Modul $|E^*|$ aller Probekörper je Bitumen in Abhängigkeit der Frequenz im kurzzeitgealterten Zustand (vor der VAPro-Alterung)

Betrachtet man zunächst die beiden polymermodifizierten Bitumen aus 2012 und 2017, so lässt sich erkennen, dass die Steifigkeiten der beiden Bitumen sehr ähnlich sind. Die

Steifigkeit variiert von 2012 zu 2017, im Mittel um 7,2%. Der äußerst geringe Unterschied, lässt darauf schließen, dass es sich um Bitumen der gleichen Klassifizierung handelt und der Hersteller eine gut eingestellte Produktionsstätte besitzt. Eine gleichbleibende Bitumenqualität ist somit gesichert.

Vergleicht man nun die vier Straßenbaubitumen der verschiedenen Hersteller, sieht man, dass trotz der gleichen Klassifizierung deutliche Unterschiede in den Asphaltsteifigkeiten zu erkennen sind. Das Bitumen B501A ist dabei das steifste, gefolgt von B502A, B655A und als weichstes Bitumen B637A. Nimmt man das weichste Bitumen als Referenz so ist der dynamische E-Modul $|E^*|$ im Mittel bei B655A um circa 21%, bei B502A um circa 42% und bei B501A um circa 61% höher. Vergleicht man das Steifigkeitsmodul mit den jeweiligen Penetrationszahlen der Bitumen, kann man eine gewisse Tendenz erkennen, jedoch ist kein allgemeiner Zusammenhang zwischen Penetrationszahl und Asphaltsteifigkeiten vorhanden. Die Penetrationszahlen der weicheren Bitumen B655A und B637A sind höher als die von den steiferen Bitumen B501A und B502A. Allerdings ist B655A steifer als B637A, hat aber eine größere Penetrationszahl. Bei B501A und B502A gestaltet es sich ebenso: B501A ist steifer, besitzt aber die größere Penetrationszahl. Die Penetrationszahl ist also kein zuverlässiger Indikator zur Beurteilung der späteren Asphaltsteifigkeit. Es bietet sich an, den etwaigen Zusammenhang zwischen Asphaltsteifigkeit, Herkunft und Penetrationszahl weiter zu vertiefen.

In Abb. 29 sind die Phasenverschiebungswinkel δ der einzelnen Probekörper je Bitumen und Frequenz inklusive Mittelwert und Standardabweichung dargestellt. Die Unterschiede sind hier nicht so ausgeprägt. Alle vier Straßenbaubitumen haben einen sehr ähnlichen Phasenverschiebungswinkel, was auf ähnliches visko-elastisches Verhalten schließen lässt. Besonders gut gleichen sich auch hier die Werte der polymermodifizierten Bitumen, das wieder auf die konstante Qualität des Herstellers hinweist.

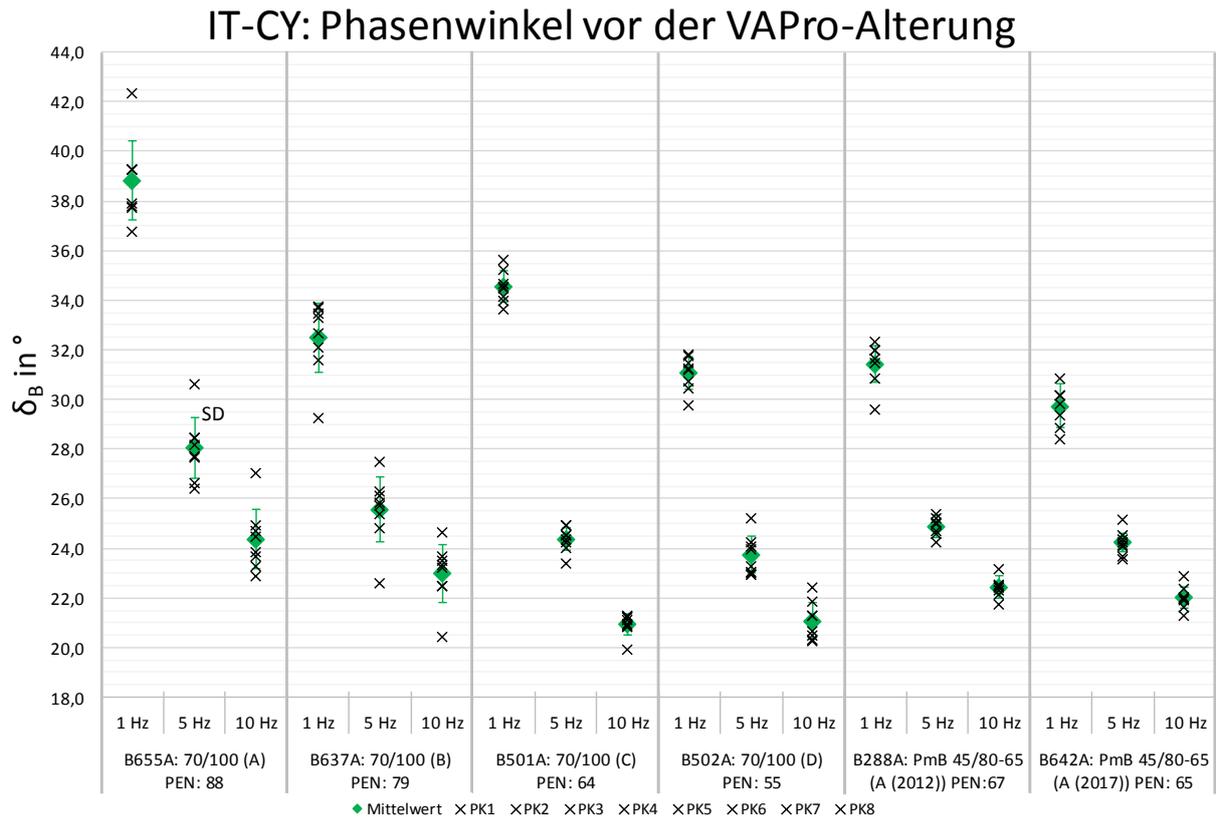


Abb. 29: Phasenverschiebungswinkel δ aller Probekörper je Bitumen in Abhängigkeit der Frequenz im kurzzeitgealterten Zustand (vor der VAPro-Alterung)

4.1.2 Veränderung der Materialeigenschaften nach der VAPro-Alterung

Abb. 30 zeigt die Veränderung des dynamischen E-Moduls $|E^*|$ durch die Alterung. Dargestellt ist das Verhältnis von dynamischem E-Modul nach der VAPro-Alterung (C-Zustand) zum kurzzeitgealterten Zustand vor der VAPro-Alterung (B-Zustand). Eingezeichnet sind die Werte aller gealterten Probekörper je Frequenz und deren Mittelwerte mit Standardabweichung. Der orangene Bereich zeigt die mögliche Streuweite von zweifachen IT-CY Wiederholungsprüfungen (am selben Probekörper). Liegen Werte innerhalb dieses Bereichs bietet dies keinen eindeutigen Hinweis auf eine Alterung bzw. Versteifung des Materials [13],[16].

Die polymermodifizierten Bitumen weisen einen Steifigkeitszuwachs von ca. 20% auf. Der Unterschied im Zuwachs von 2012 zu 2017 liegt dabei unter 1%. So ist zu sehen, dass die beiden Bitumen sich auch bezüglich der Alterung sehr ähnlich verhalten, was wieder auf eine gleichbleibende Qualität schließen lässt.

Bei den Straßenbaubitumen sind größere Unterschiede zu beobachten: Das Bitumen B501A hat mit circa 9% am wenigsten Zuwachs der Steifigkeit erfahren. Das kann sich zum einen dadurch erklären lassen, dass es schon vor der Alterung das steifste Verhalten zeigt und somit die Alterung keine starke Veränderung bewirkt. Zum anderen kann dieses Bitumen alterungsbeständiger als die anderen untersuchten Bitumen sein. Im Gegensatz dazu ist der dynamische E-Modul $|E^*|$ des Bitumens B637A mit circa 38% am meisten gestiegen. Da es vor der Alterung das weichste Bitumen ist, würde das mit dem Verhalten des B501A zusammenpassen. Es ist das für die Alterung anfälligste Bitumen. Der Zusammenhang zwischen Ausgangssteifigkeit und Alterungszuwachs ist auch bei den Bitumen B655A und B502A zu beobachten. Zusammenfassend ist dies in Tab. 6 dargestellt.

IT-CY: Veränderung der Steifigkeit durch die VAPro-Alterung

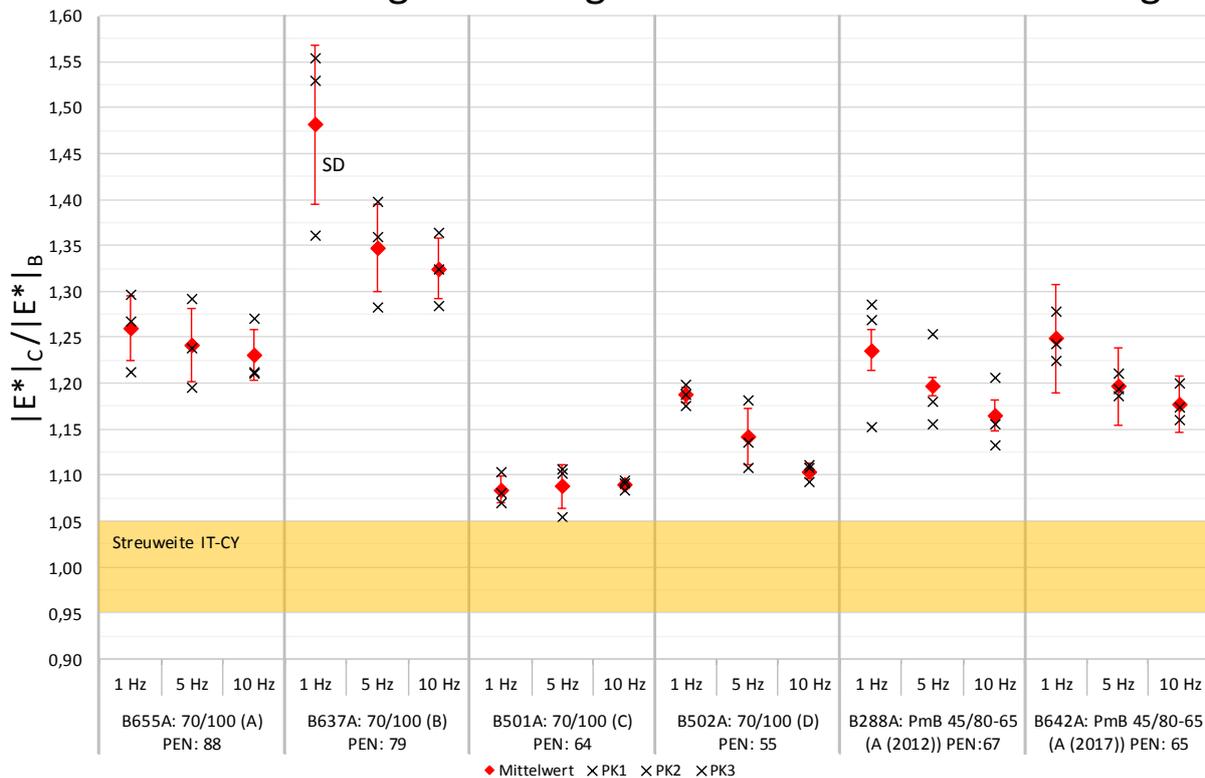


Abb. 30: Die Veränderung der Asphaltsteifigkeiten durch die VAPro-Alterung

Tab. 6: Zusammenhang zwischen der Ausgangssteifigkeit der Straßenbaubitumen und dem Steifigkeitszuwachs durch die Alterung

Bitumen	Ausgangsteifigkeit	Steifigkeitszuwachs
B637A	↓ ansteigend	38%
B655A		24%
B502A		14%
B501A		9%

Die Abnahme des Phasenverschiebungswinkels δ durch die Alterung ist in Abb. 31 dargestellt. Dabei sind wieder die Einzelwerte je Frequenz und deren Mittelwerte inklusive Standardabweichung angegeben. Alterung bedeutet Versprödung des Materials, und somit eine Veränderung des viskosen Materialverhaltens zum elastischen Bereich hin. Erkennbar ist das durch die Verringerung des Phasenverschiebungswinkels. So sieht man, dass bei den beiden Bitumen, die den größten Steifigkeitszuwachs haben (B655A und B637), der Phasenwinkel im Vergleich zu den weniger alterungsanfälligeren Bitumen (B501A und B502A) mehr absinkt.

IT-CY: Abnahme des Phasenwinkels durch die VAPro-Alterung

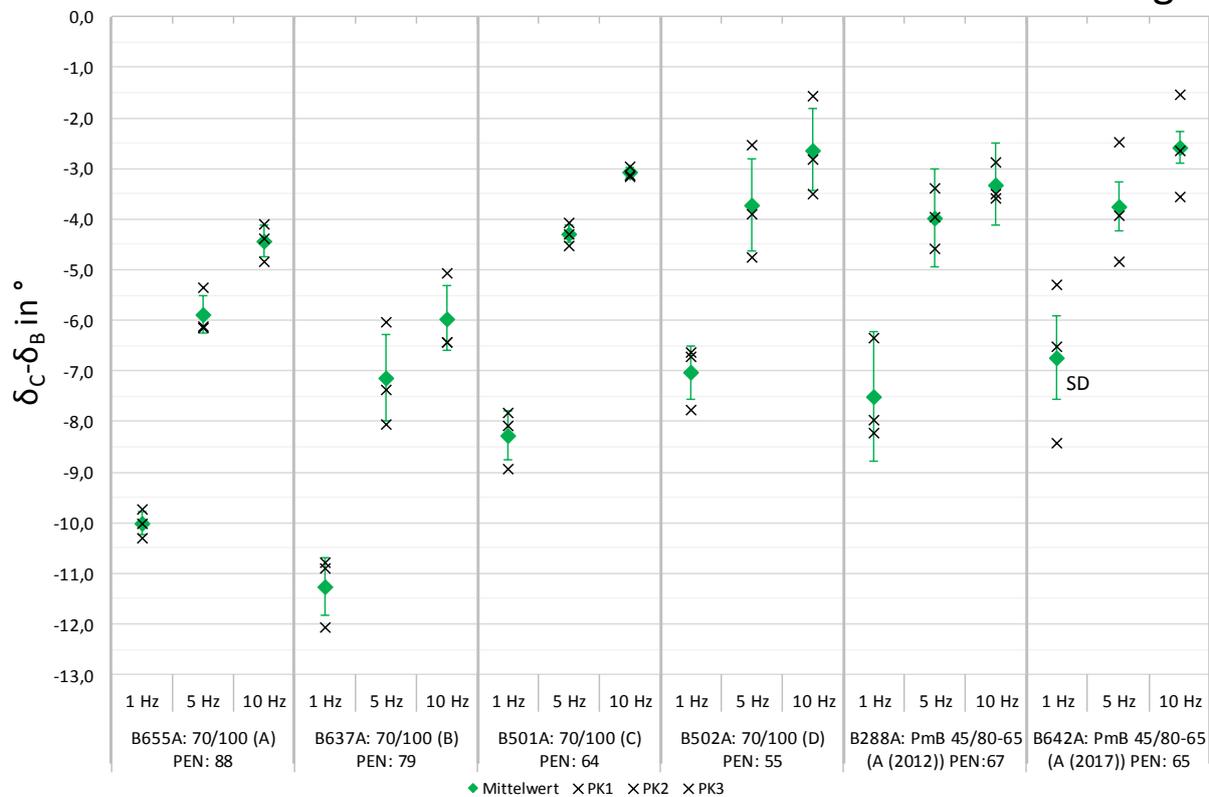


Abb. 31: Abnahme des Phasenverschiebungswinkel aufgrund der VAPro-Alterung

4.2 Bitumen – Diskussion der Ergebnisse der Dynamic Shear Rheometer-Versuche

Neben der Untersuchung der Asphalteigenschaften ist es zusätzlich wichtig die Materialveränderungen auf Bitumenebene zu betrachten, da dies zu weiteren Erkenntnissen führen und die bereits vorliegenden Auswirkungen bestätigen bzw. ergänzen kann.

In ein Abb. 32 ist der Vergleich der kurzzeitgealterten Zustände der verschiedenen Bitumenproben bei 1,59 Hz und 64°C dargestellt. Es ist von Interesse auch den kurzzeitgealterten Zustand zu untersuchen, da die VAPro-Alterung nach der Kurzzeitalterung stattfindet. Man bekommt so einen besseren Vergleich des Ausmaßes der VAPro-Alterung, da unterschiedliche Kurzzeitalterungs-Niveaus zur Verzerrung der Ergebnisse führen. Bei den sechs Bitumen passt das RTFOT-Alterungsniveau sehr gut zu dem der kurzzeitgealterten Plattenreste. Das Alterungsniveau bewegt sich, im gesamten Temperaturbereich von 40-82°C, circa von 1,5-2,5. Bei allen Bitumen, mit Ausnahme des B642A, liegt das Alterungsniveau der Plattenreste leicht unterhalb der RTFOT-Alterung. Die Abweichung der Plattenreste zu den RTFOT-gealterten Proben liegt dabei zwischen 3-16%. Man kann sagen, dass das RTFOT-Verfahren, die Alterungsvorgänge der Laborplattenherstellung gut abbildet.

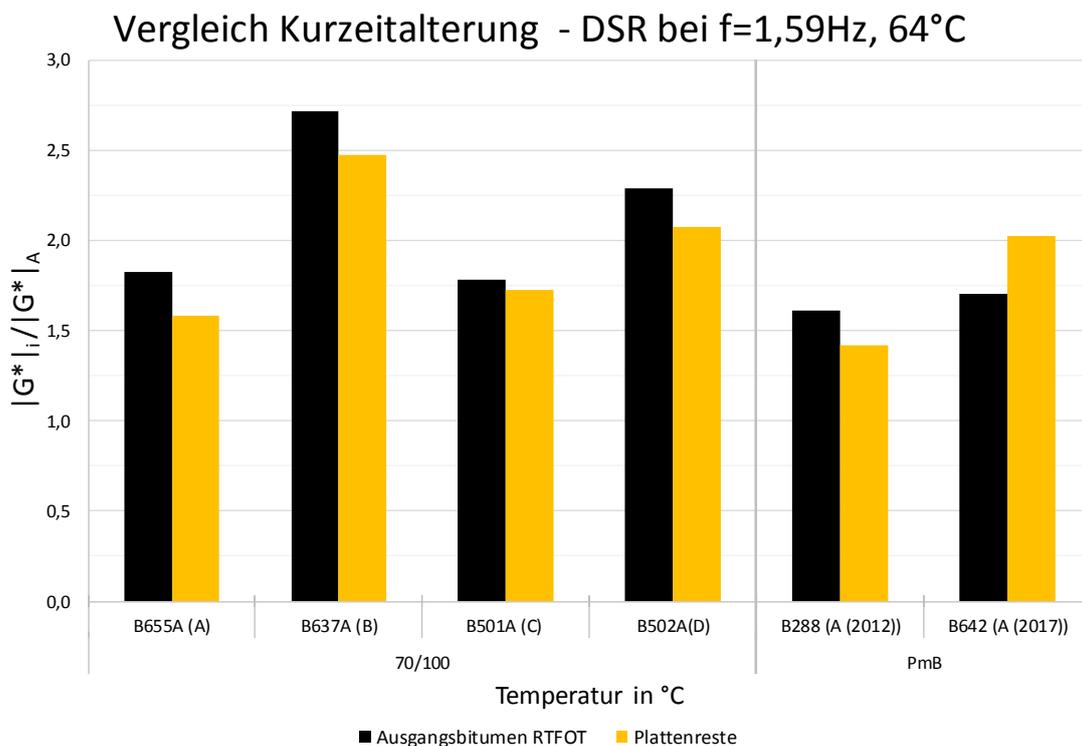


Abb. 32: Vergleich des dynamischen Schubmodul der kurzzeitgealterten Proben

4.2.1 Vergleich der Veränderung des dynamischen Schubmoduls

Die Veränderung des dynamischen Schubmoduls ist in Abb. 33-Abb. 36, Abb. 38 und Abb. 39 dargestellt, dabei ist auf der Ordinate das Verhältnis aus dynamischem Schubmodul $|G^*|$ der jeweiligen Probe zum dynamischen Schubmodul $|G^*|$ des Frischbitumens, bei der Prüffrequenz von 1,59 Hz, angegeben. Zusätzlich ist die Standardabweichung für die VAPro-

gealterten Proben eingezeichnet. Als Vergleichswerte dienen die Ergebnisse RTFOT- und RTFOT+PAV-gealterten Proben.

Für das Bitumen B655A (Abb. 33) korrelieren die Alterungsniveaus der langzeitgealterten Vergleichsproben sehr gut. Die VAPro-gealterten Proben bewegen sich im Bereich von 4,5-7,0 und die PAV-gealterten Vergleichsproben im Bereich von 3,5-7,1. Die maximale Abweichung zwischen VAPro und PAV beträgt 9%. Das Niveau der Langzeitgealterten Proben passt hier also sehr gut zusammen.

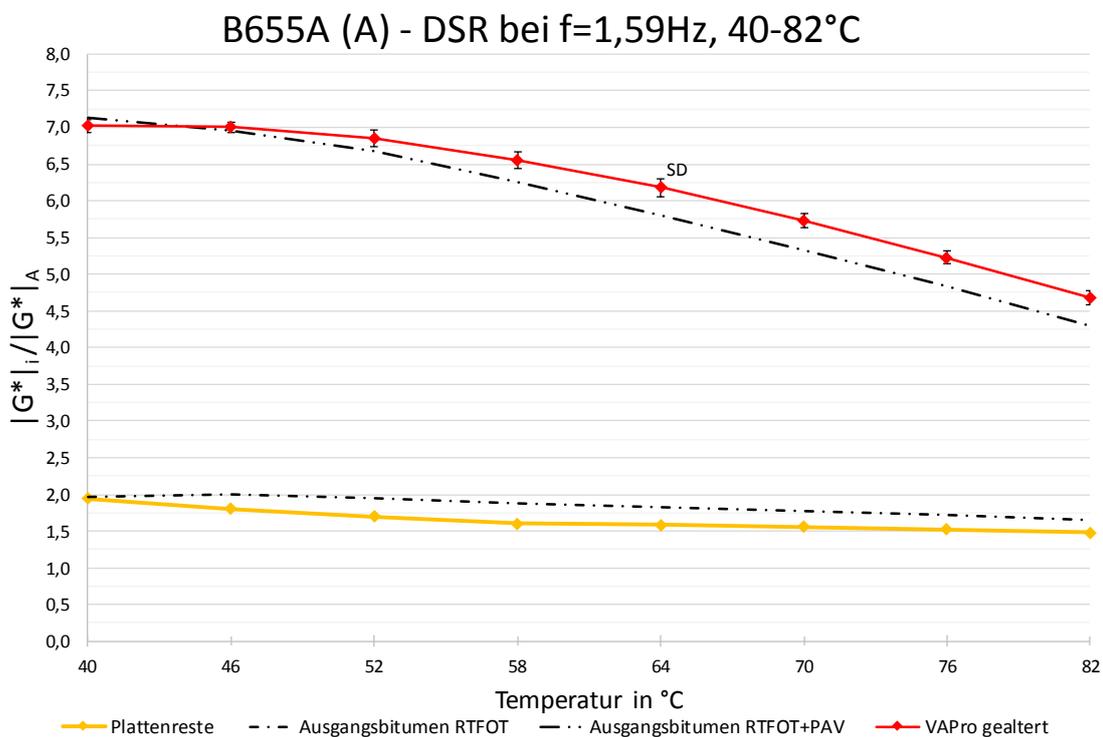


Abb. 33: B655A: Veränderung des dynamischen Schubmoduls in Bezug auf das Frischbitumen

Beim Bitumen B637A (Abb. 34) liegt das VAPro-Alterungsniveau im Mittel zwischen 18,0-28,0 und das RTFOT+PAV-Niveau zwischen 8,0-14,0. Das Alterungsniveau der VAPro-gealterten Proben liegt um bis zu 130% über dem der RTFOT+PAV-gealterten Vergleichsproben. Dies könnte den Grund haben, dass mit dem PAV-Verfahren, aufgrund der Randbedingungen (hoher Druck und Temperatur), keine realitätsnahe Alterung stattfindet. Man könnte also sagen, dass das PAV-Verfahren die Gesamtheit der Alterungsprozesse nicht korrekt erfasst. Unter der Annahme, dass VAPro die realen Prozesse besser abbilden kann, wird durch das PAV-Verfahren die Alterung im Feld also unterschätzt.

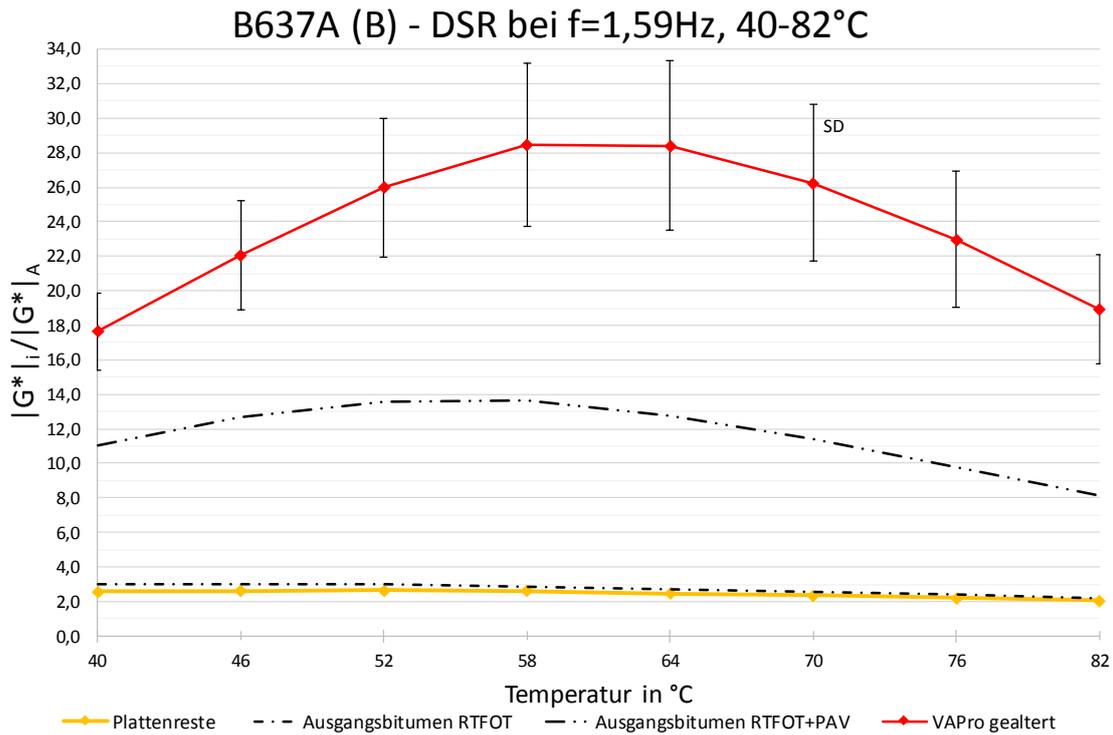


Abb. 34: B637A: Veränderung des dynamischen Schubmoduls in Bezug auf das Frischbitumen

Betrachtet man das Alterungsniveau der langzeitgealterten Proben bei Bitumen B501A (Abb. 35) und B502A (Abb. 36) sind die Unterschiede hier kleiner. Bei B501A liegen die VAPro-gealterten Proben im Bereich von 4,25-6,0 und die RTFOT+PAV-gealterten Vergleichsproben bei 3,5-5,5. Die maximale Abweichung ist hier 18%. Bei B502A verläuft das VAPro-Alterungsniveau zwischen 8,5-12,0 und das RTFOT+PAV-Alterungsniveau zwischen 6,5-8,5, bei einer Abweichung von bis zu 42%.

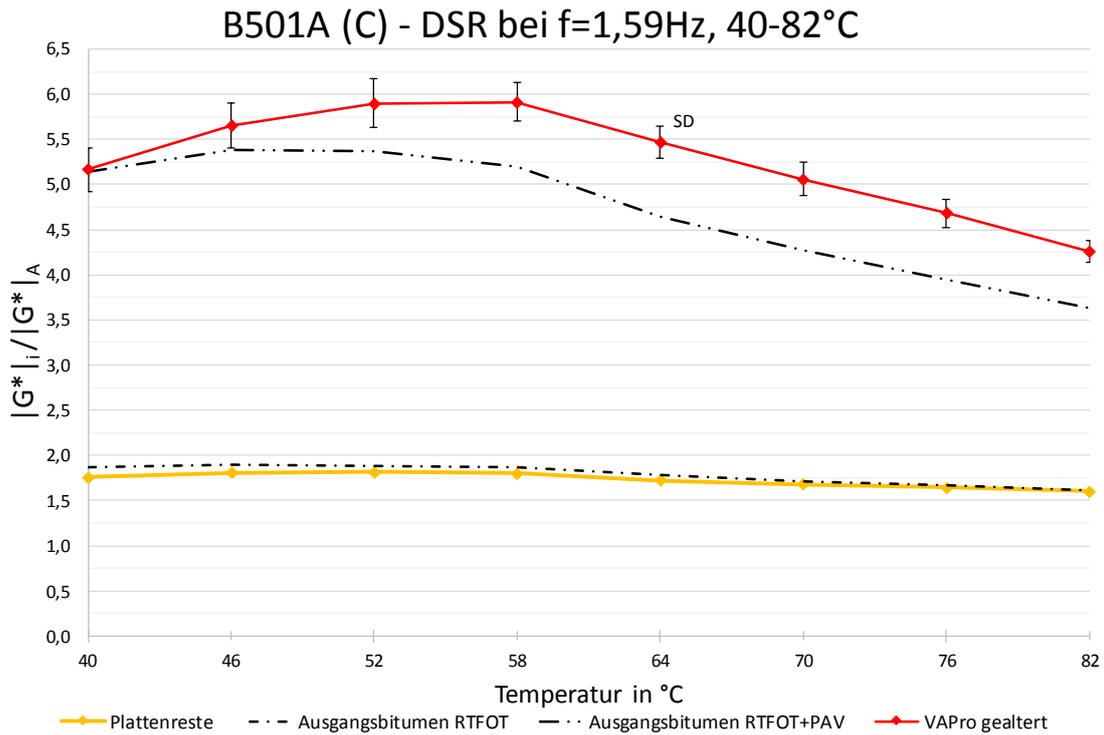


Abb. 35: B501A: Veränderung des dynamischen Schubmoduls in Bezug auf das Frischbitumen

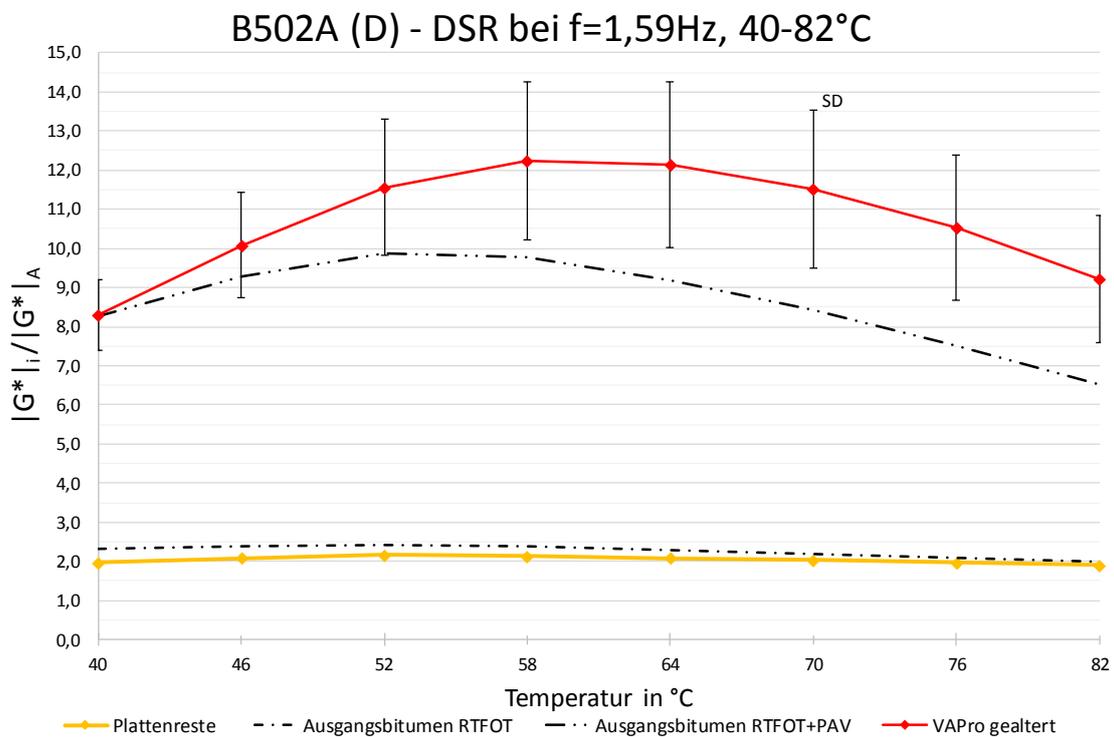


Abb. 36: B502A: Veränderung des dynamischen Schubmoduls in Bezug auf das Frischbitumen

Abb. 37 zeigt zusammenfassend die RTFOT+PAV- und VAPro-Alterungsniveaus aller Bitumen bei einer Frequenz 1,59 Hz und einer Prüftemperatur von 64°C.

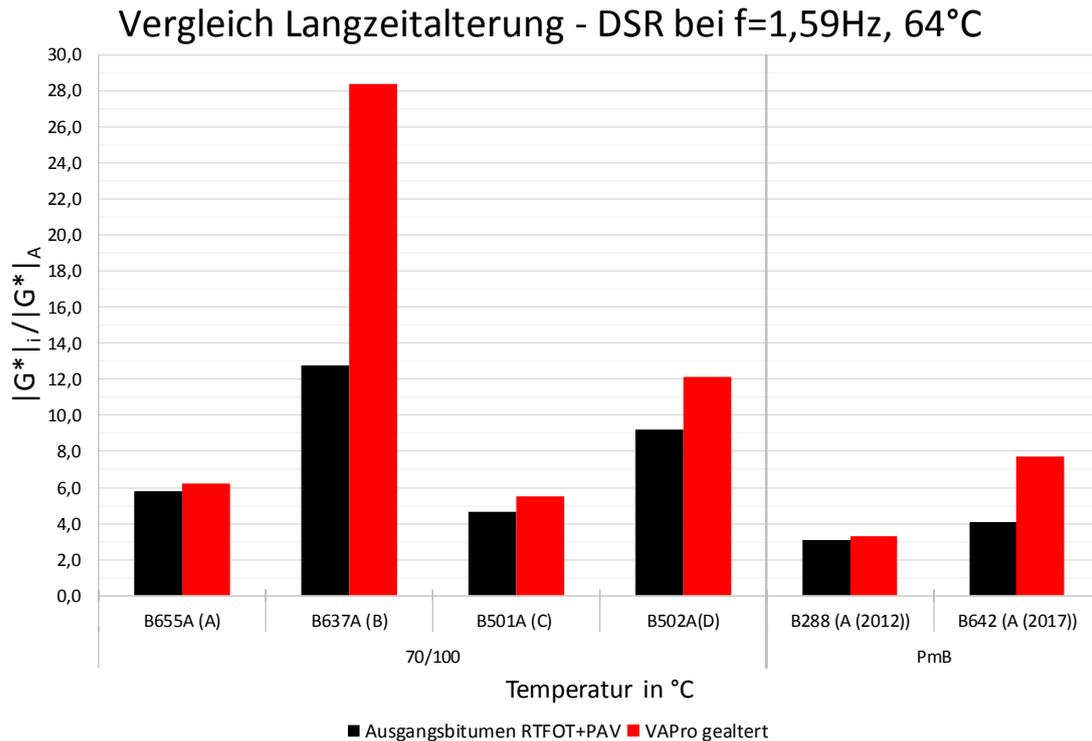


Abb. 37: Vergleich der Zunahme des dynamischen Schubmoduls der RTFOT+PAV-Alterung und der VAPro-Alterung

Bei den polymermodifizierten Bitumen fällt das VAPro-Alterungsniveau B288 (Abb. 38) mit 4,0-5,0 kleiner aus als bei B642 (Abb. 39) mit 6,0-8,5. Beachtet man, dass sich die kurzzeitgealterten Plattenreste der beiden Bitumen wie eingangs erwähnt einerseits unterhalb und andererseits oberhalb des RTFOT-Niveaus bewegen (vgl. Abb. 32), macht es Sinn nur den Anteil, der durch die VAPro-Alterung erfahren wird, zu betrachten. Dies geschieht, indem man das Verhältnis aus Schubmodul der VAPro-gealterten zu dem Schubmodul der kurzzeitgealterten Plattenreste bildet. Wie in Abb. 40 dargestellt, sieht man, dass sich hier die Niveaus besser gleichen. Das reine VAPro-Alterungsniveau liegt bei B288 bei circa 3,0-3,5 und B642 bei etwa 3,5-4,0. Der Unterschied beträgt nur noch 50%. Das durch die VAPro-Alterung erfahrene Niveau ist bei beiden also ähnlich, was wieder für die gleichbleibende Qualität des Herstellers spricht.

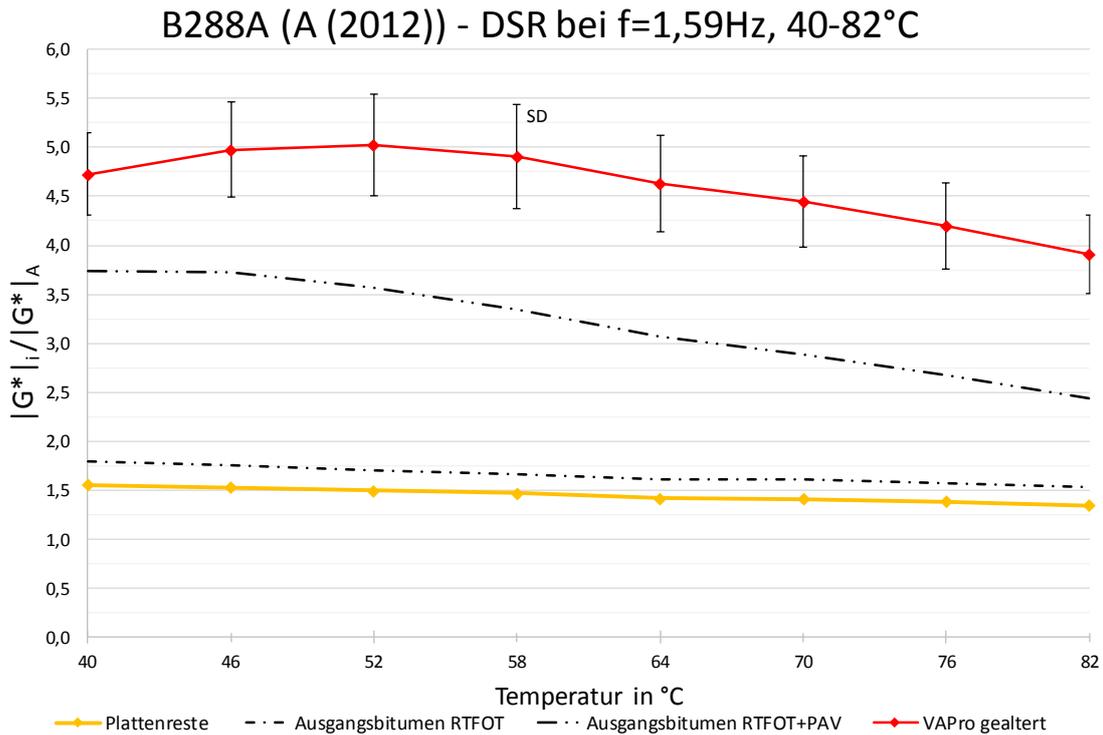


Abb. 38: B288A: Veränderung des dynamischen Schubmoduls in Bezug auf das Frischbitumen

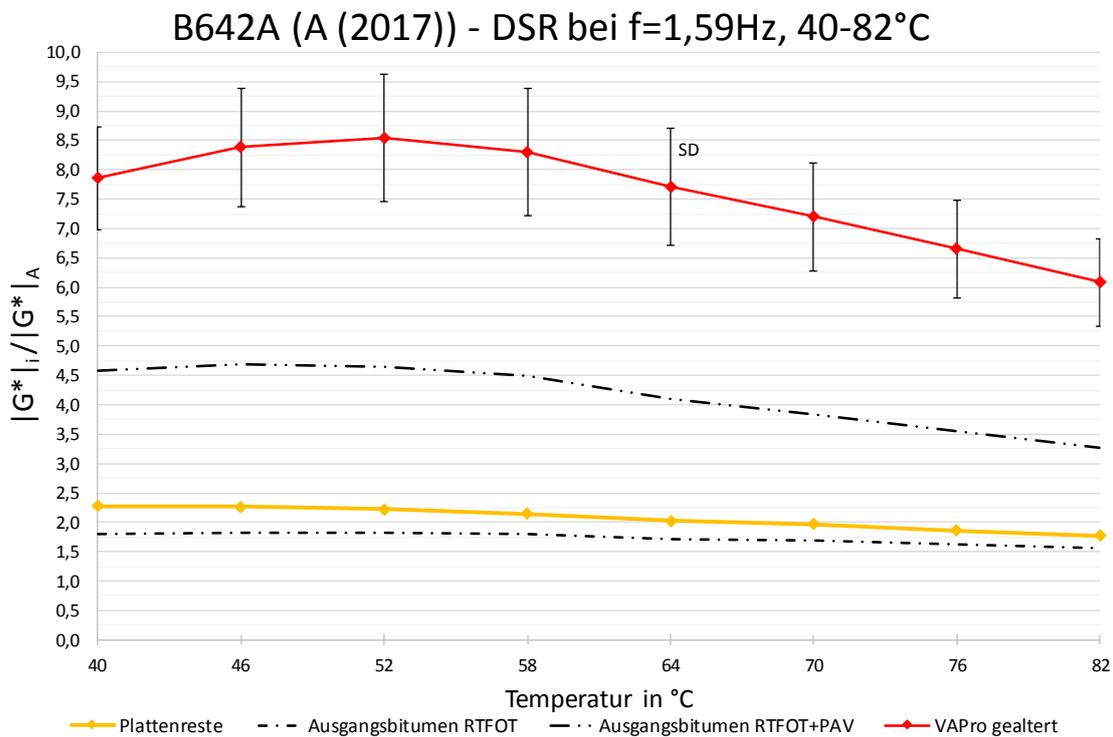


Abb. 39: B642A: Veränderung des dynamischen Schubmoduls in Bezug auf das Frischbitumen

Vergleich VAPro-Alterung der PmB's - DSR bei f=1,59Hz, 40-82°C

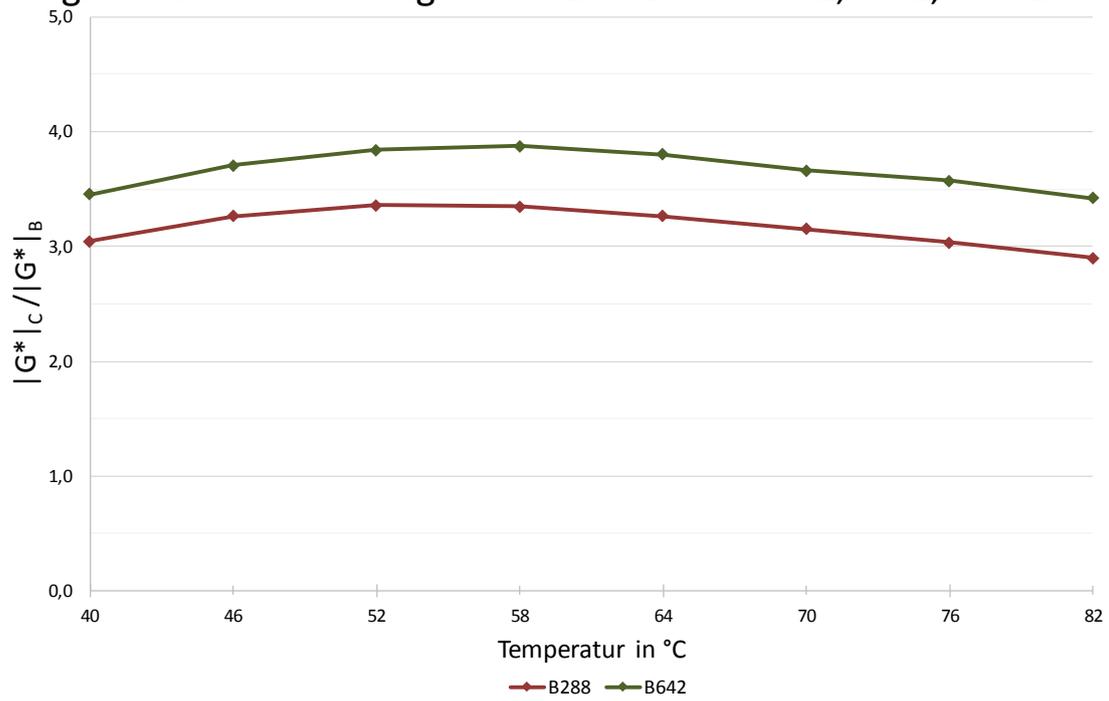


Abb. 40: Vergleich der reinen VAPro-Alterung von B288 und B642. Dargestellt ist das Verhältnis von VAPro-gealterten Proben zu den kurzzeitgealterten Plattenresten

In Abb. 41 ist abschließend der Vergleich der IT-CY- und DSR-Ergebnisse dargestellt. Angegeben ist jeweils das Verhältnis aus VAPro-gelalterten Proben zu den kurzzeitgelalterten Plattenresten. Beim IT-CY wurden für den Vergleich die Parameter 1,0 Hz und 10°C und beim DSR die Parameter 1,59 Hz und 64°C gewählt. Anzumerken ist, dass bei den unterschiedlichen Prüfparametern der Vergleich schwierig ist. Es zeigen sich dennoch klare parallelen im Alterungsniveau bei den beiden Prüfmethoden.

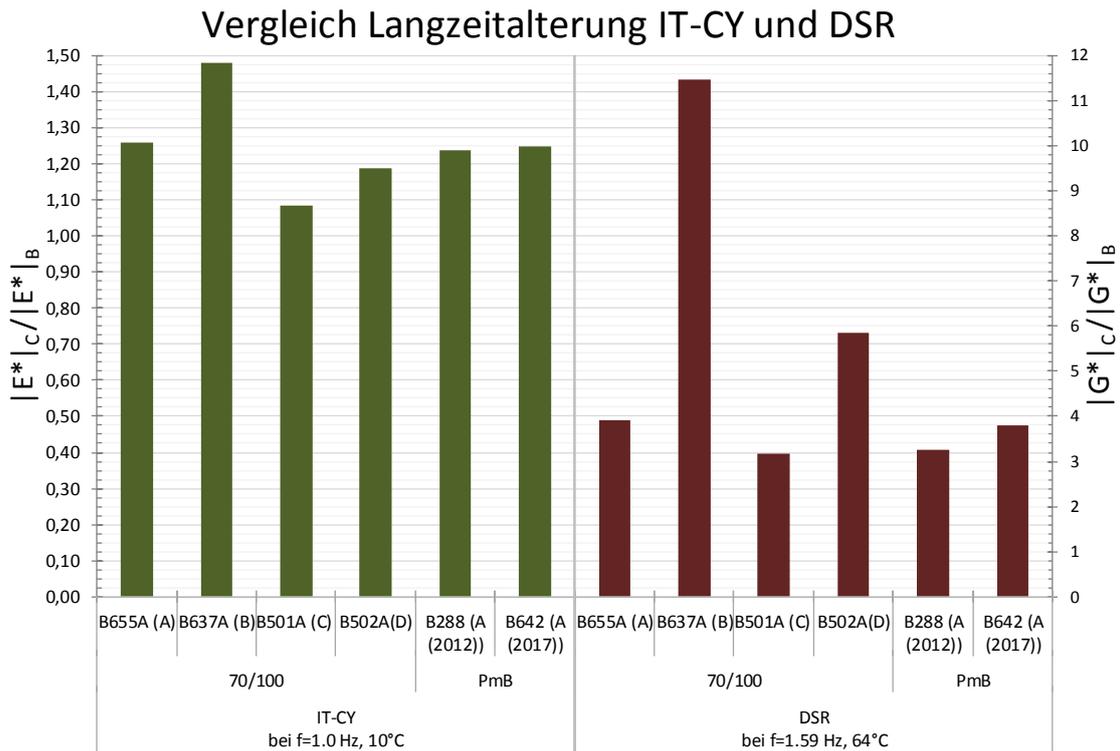


Abb. 41: Vergleich der Asphalt- und Bitumendaten

4.2.2 Vergleich der Veränderung des Phasenverschiebungswinkels

Abb. 43-Abb. 48 zeigt die Abnahme des Phasenverschiebungswinkel der jeweiligen Bitumen. Dargestellt ist die Differenz des Phasenwinkels der gealterten Proben und des Frischbitumens, mit Angabe der Standardabweichung der VAPro-gealterten Proben.

Es lässt sich erkennen, dass die Abnahme des Phasenwinkels bei den kurzzeitgealterten Proben (RTFOT und Plattenreste) bei allen Bitumen wieder sehr gut zusammenpasst.

Die Versprödung der VAPro-gealterten Proben ist bei allen Bitumen größer als die der RTFOT+PAV-gealterten Proben, was damit korreliert, dass die Versteifung der VAPro-gealterten Proben durchwegs über der der RTFOT+PAV-gealterten Proben liegt. Der Vergleich des Phasenwinkels der RTFOT+PAV- und VAPro-gealterten Proben aller Bitumen bei 1,59 Hz und 64°C ist in Abb. 42 dargestellt (vgl. Abb. 37).

Bei den polymermodifizierten Bitumen fällt auf, dass bei den Temperaturen 64-81°C die Abnahme des Phasenwinkels der RTFOT-gealterten Proben der der PAV-gealterten Proben annähert bzw. gleicht. Das PAV-Verfahren liefert hier somit keine zuverlässige Aussage über die Versprödung der polymermodifizierten Bitumen durch die Langzeitalterung.

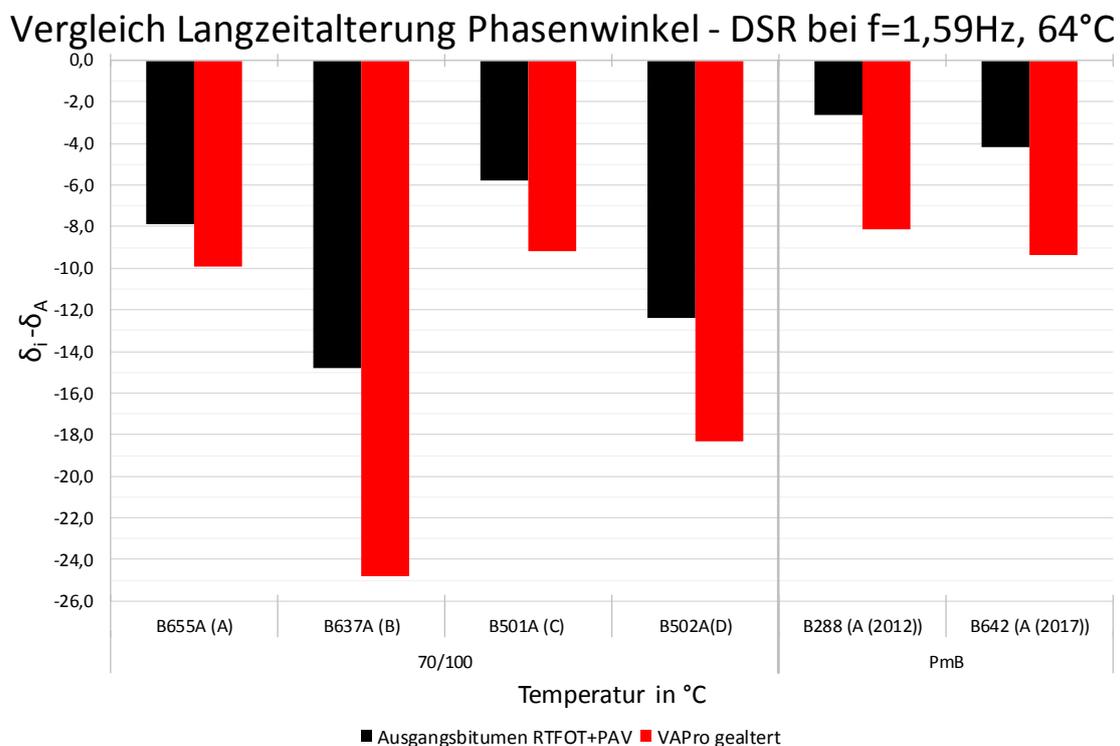


Abb. 42: Vergleich der Abnahme des Phasenverschiebungswinkels der RTFOT+PAV-Alterung und der VAPro-Alterung

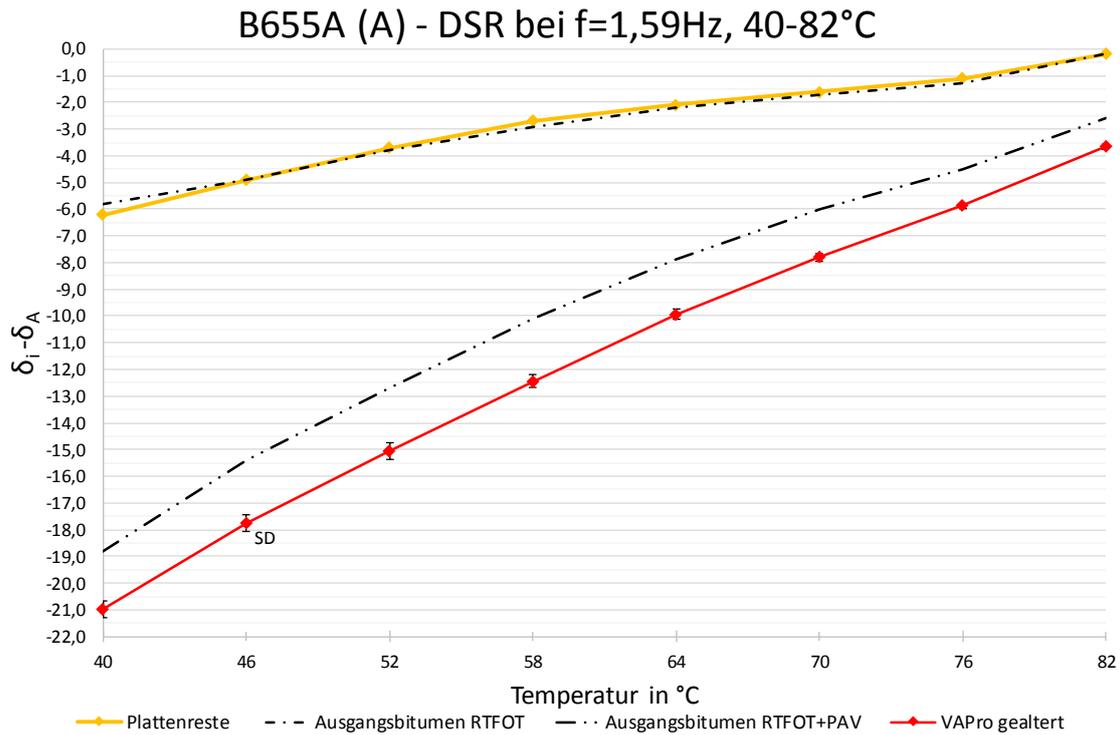


Abb. 43: B655A: Abnahme des Phasenwinkels in Bezug auf das Frischbitumen

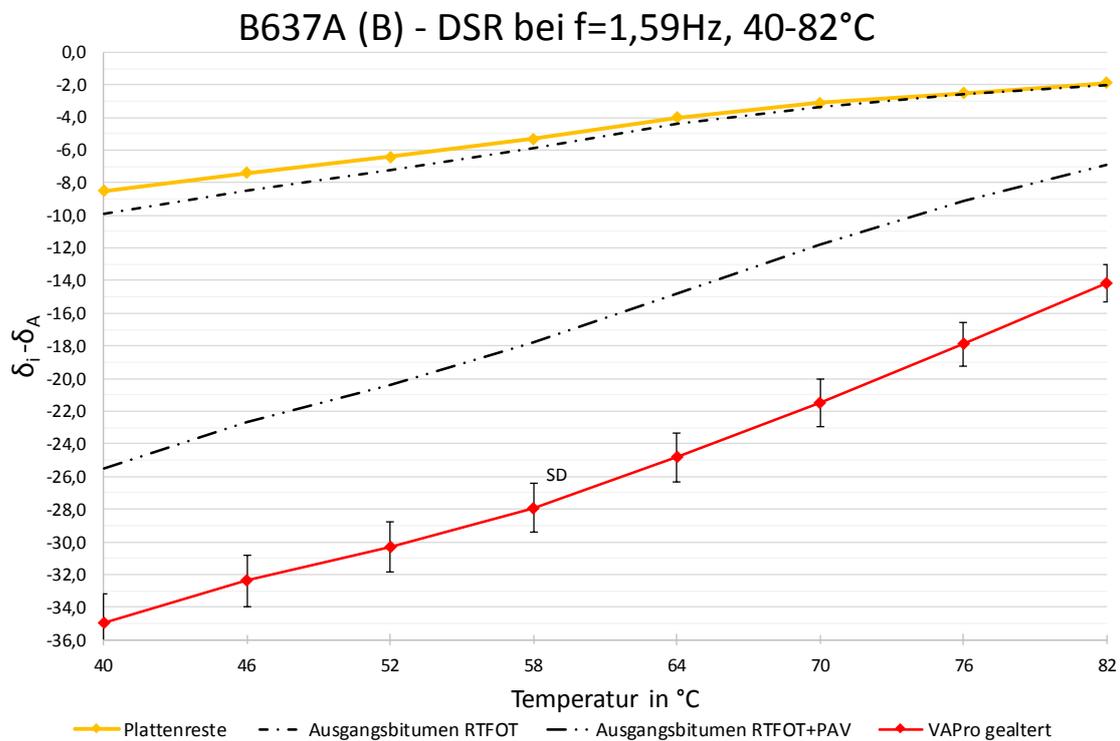


Abb. 44: B637A: Abnahme des Phasenwinkels in Bezug auf das Frischbitumen

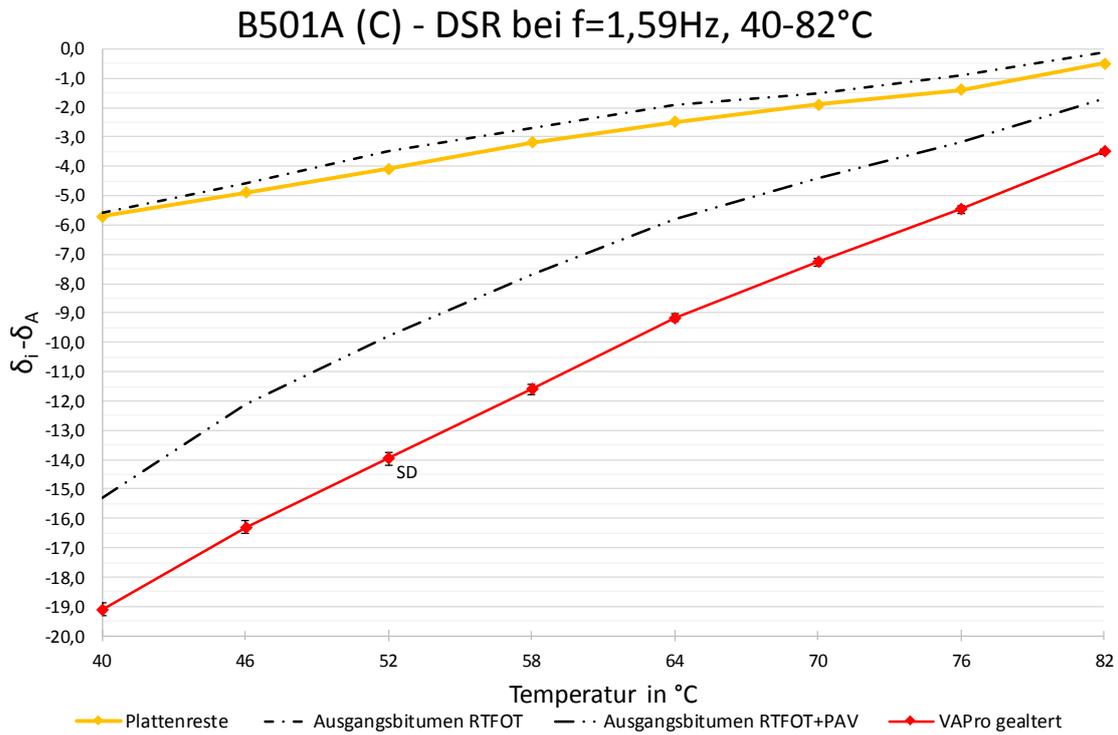


Abb. 45: B501A: Abnahme des Phasenwinkels in Bezug auf das Frischbitumen

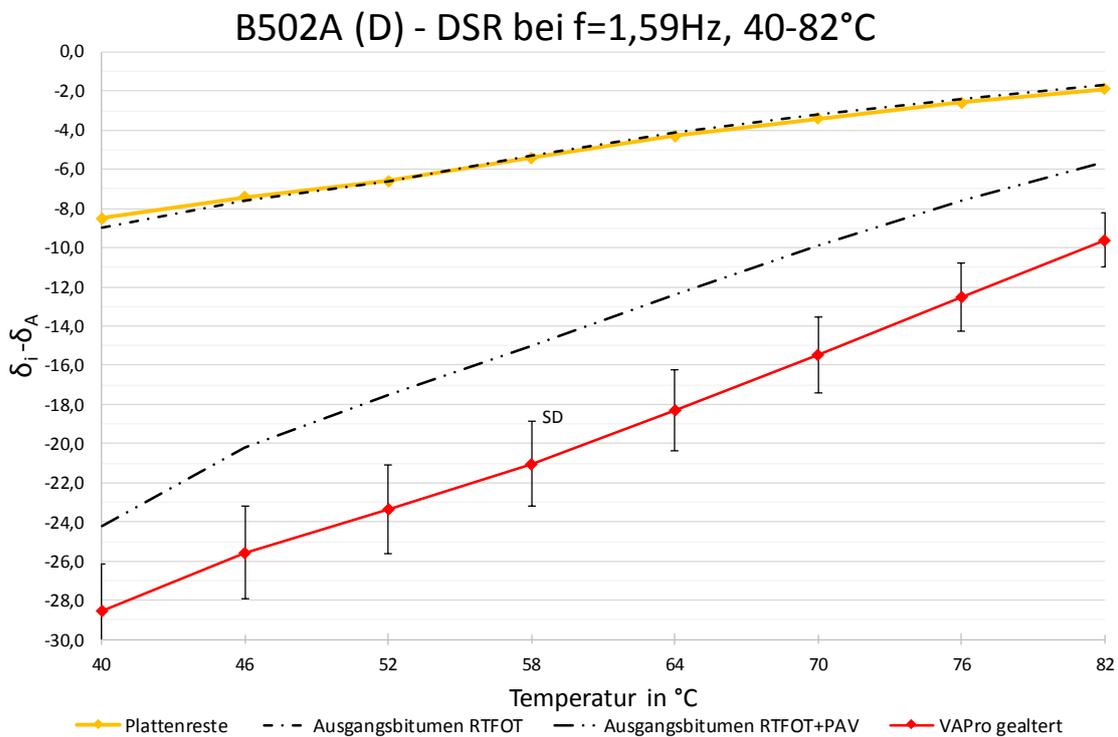


Abb. 46: B502A: Abnahme des Phasenwinkels in Bezug auf das Frischbitumen

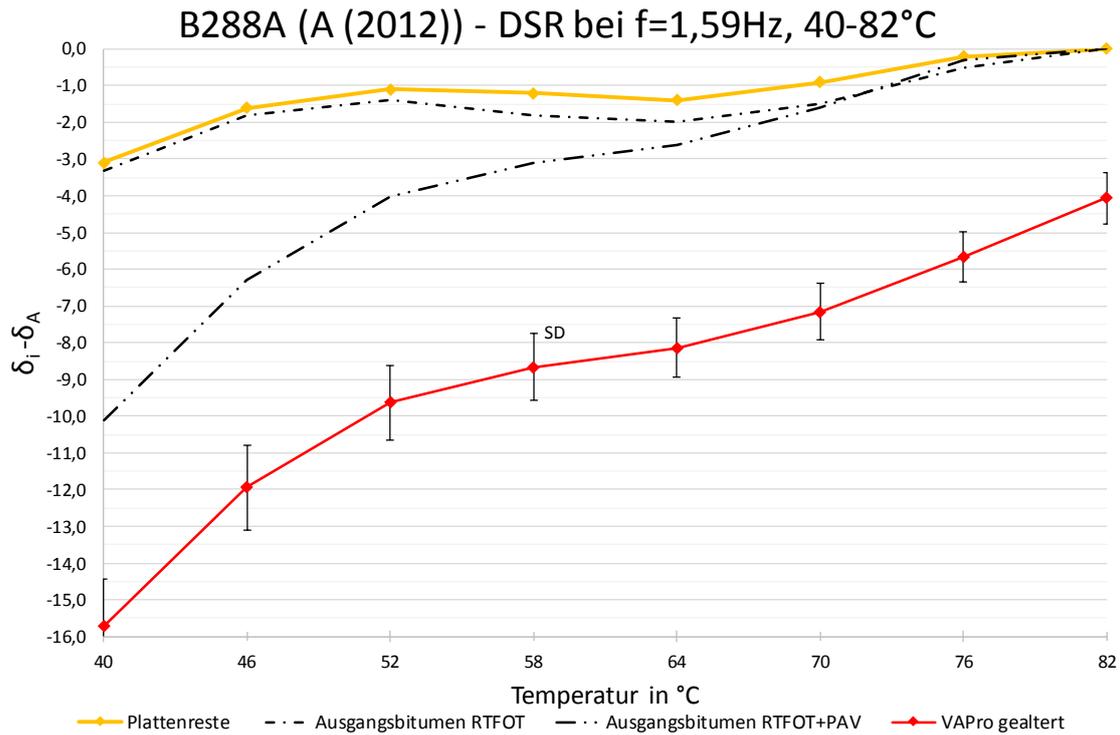


Abb. 47: B288A: Abnahme des Phasenwinkels in Bezug auf das Frischbitumen

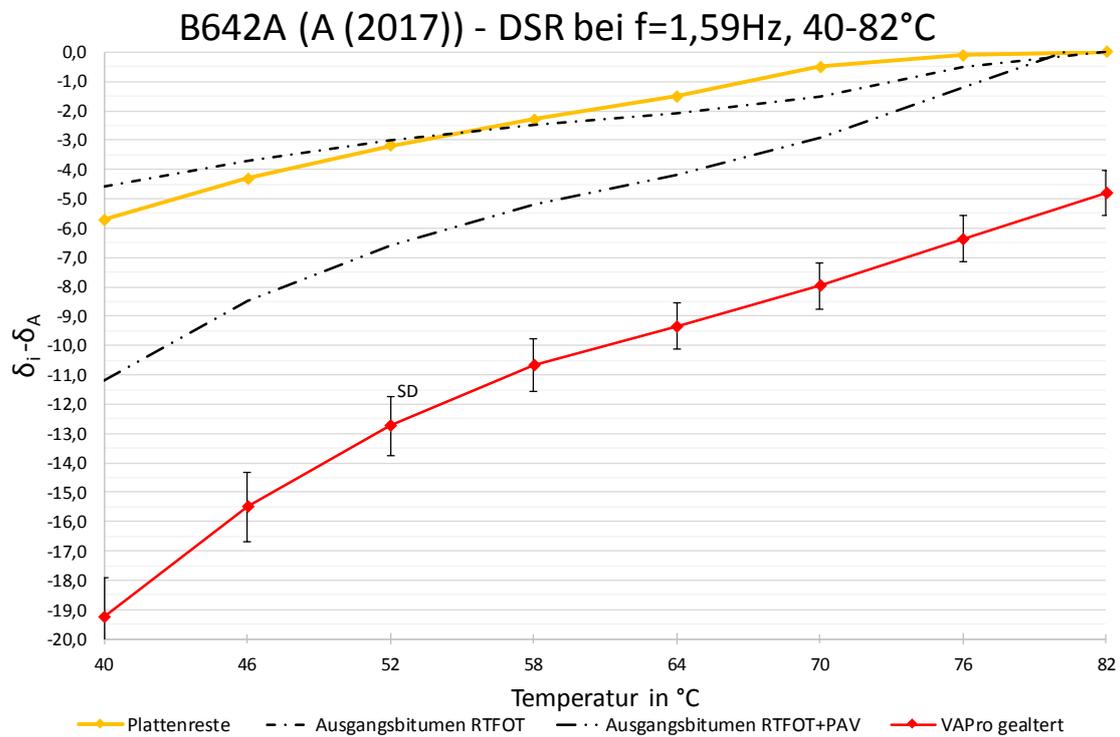


Abb. 48: B642A: Abnahme des Phasenwinkels in Bezug auf das Frischbitumen

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen, die in dieser Diplomarbeit durchgeführt wurden, zeigen, dass das Viennese Aging Procedure (VAPro) auf breiter Basis gut anwendbar ist. VAPro simuliert die Alterungsvorgänge im Feld, mittels Durchströmung zylindrischer Probekörper mit ozon- und stickoxidangereicherter Luft, bei realitätsnahen Randbedingungen bezüglich Temperatur und Druck (+60°C; ~0,3 bar).

Es wurde die Steifigkeit und Versprödung, mittels Spaltzug-Schwellversuchen (IT-CY) und Dynamic Shear Rheometer (DSR), von Straßenbaubitumen verschiedener Herkunft als auch polymermodifizierte Bitumen untersucht. Dabei zeigen sich klare Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Bitumen. Das Alterungsniveau der VAPro-gealterten Proben liegt stets über dem der RTFOT+PAV-gealterten Proben, was vermuten lässt, dass das PAV Verfahren die Gesamtheit der Alterungsvorgänge, aufgrund der realitätsfernen Randbedingungen (hoher Druck und Temperatur), nicht erfasst.

Da in der Realität die obersten Schichten am meisten von der Alterung betroffen sind und bei diesem Bereich das Tieftemperaturverhalten maßgebend ist, bietet es sich an weitere Untersuchungen anzustellen. So wäre es möglich DSR-Versuche im Temperaturbereich von 0-40°C durchzuführen. Weiters ist eine Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus für andere Probekörpergeometrien anzudenken: So wären prismatische Probekörper praktisch, um das Tieftemperaturverhalten der VAPro-gealterten Proben, mittels Abkühlprüfung (TSRST) und einaxialer Kältezugsprüfung (UTST), weiter zu untersuchen. Außerdem bietet es sich an das Ermüdungsverhalten der zylindrischen Probekörper im Spaltzug-Schwellversuch zu prüfen.

Wichtig wäre auch eine Validierung der VAPro-Daten mit Daten von im Feld gealterten Proben. So kann man die Parameter des VAPro eventuell leicht anpassen, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den real gealterten Proben herzustellen. Sinnvoll wäre hier das Anlegen von Probestrecken mit entsprechenden Rückstellproben (A-, B- und C-Zustand) in ausreichender Menge.

Literaturverzeichnis

- [1] **Müller, W., et al.; Asphalt im Straßenbau, in Gestrata Asphalt Handbuch;**
GESTRATA: Wien, Austria, 2010
- [2] **Vollenschaar, D.; Bitumenhaltige Baustoffe, in Wendehorst Baustoffkunde;**
Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011
- [3] **Pörner Ingenieurgesellschaft mbH**
<http://www.biturox.com/crude-product/crude/>
aufgerufen am 11.11.2017
- [4] **Institut für Verkehrswissenschaften, Skriptum zur LVA „Baustoffe im Verkehrswegebau“;** Technische Universität Wien, 2016
- [5] **Krzemien, R., et al.; Gesteinskörnungen, in Gestrata Asphalt Handbuch;**
GESTRATA: Wien, Austria, 2010
- [6] **Spiegel, M., et al., Bitumenhaltige Bindemittel; in Gestrata Asphalt Handbuch;**
GESTRATA: Wien, Austria, 2010
- [7] **Eberhardsteiner, L., et al.; Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt;** Straße und Autobahn, 2014
- [8] **Hospodka, M.; Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor;** Universität für Bodenkultur Wien, 2013
- [9] **Hase, M., et al.; Sachstandsbericht zum Forschungsvorhaben FE 07.0259/2012/AGB;** HNL Ingenieur- und Prüfgesellschaft mbH Pinneberg; 2015
- [10] **Neumann, H., et al.; Zur Strukturalterung von Bitumen; in Bitumen Heft 2/92;** Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V., 1992
- [11] **Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH;**
www.loja.at
aufgerufen am 22.10.2017
- [12] **Bauer, E.; EU-Konformitätserklärung gemäß EN13043, ZA. 1a+1b) und ZA.2.2;** Hartsteinwerk Loja: Persenbeug, 2012
- [13] **Steiner, D.; Entwicklung und Optimierung einer Labor-Alterungsmethode für Asphaltprobekörper zur Simulation der Langzeitalterung und Bewertung der Alterungsbeständigkeit;** Technische Universität Wien, 2014

- [14] **Çetinkaya, R.; Bewertung der Einflussgrößen auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt;** Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswegebau. Bochum; Germany, 2011
- [15] **Choi, Y.K.; Development of the saturation ageing tensile stiffness (SATS) test for high modulus base materials;** University of Nottingham, 2005
- [16] **Steiner, D., Hofko, B., & Blab, R.; Effect of Air Void Content and Repeated Testing on Stiffness of Asphalt Mix Specimen;** Paper presented at the CIVIL ENGINEERING CONFERENCE IN THE ASIAN REGION CECAR 7, Waikiki, USA, 2016
- [17] **Findley, W.N.Davis, F.A.; Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials;** Courier Dover Publications, 2013
- [18] **Steiner, D., Hofko, B., Hospodka, M., Handle, F., Grothe, H., Fussl, J., . . . Blab, R.; Towards an optimised lab procedure for long-term oxidative ageing of asphalt mix specimen;** International Journal of Pavement Engineering, 17(6), 471-477, 2016
- [19] **Kappl, K. F.; Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit Hilfe von zyklischen Triaxialprüfungen;** Dissertation, TU Wien 2007
- [20] **AL Sp-Asphalt 09; Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung;** FGSV Verlag, 2009
- [21] **Time–temperature superposition;**
https://en.wikipedia.org/wiki/Time%E2%80%93temperature_superposition
aufgerufen am 31.10.2017
- [22] **Seinfeld, J. H., Pandis, S. N.; Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change;** A Wiley-Interscience publication, 1998
- [23] **Keller, C.; Validierung der Troposphärenchemie im chemischen Klimamodell SOCOL anhand von Ozon und OH;** Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich, 2006
- [24] **Röth, E.; Skriptum zur LVA „Umweltchemie der Luft“;** Universität Duisburg-Essen, 2010
- [25] **Heintz, A.,Reinhardt, G.; Chemie der Umwelt: Ein Studienbuch für Chemiker, Physiker, Biologen und Geologen;** Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1993

- [26] **Lu, X., Uhlback, P., Soenen, H.; Investigation of bitumen low temperature properties using a dynamic shear rheometer with 4 mm parallel plates;** International Journal of Pavement Research and Technology, 2016
- [27] **Kim, S.; Asphalt Binder Cracking Device to Reduce Low-Temperature Asphalt Pavement Cracking: Final Report;** EZ Asphalt Technology LLC, 2010
- [28] **Kim, S.; The Asphalt Binder Cracking Device Test;** EZ Asphalt Technology LLC, 2013
- [29] **LITZKA, J., STROBL, R., PASS, F., AUGUSTIN, H.; Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung, Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 9;** Technische Universität Wien, 1998.
- [30] **Benedix, R.; Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten;** Vieweg+ Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2011
- [31] **Stieger, S.; Skript: Chemie III, K. Solothurn, Editor.: Solothurn;** Switzerland, 2013
- ONR CEN/TS 12697-52: Asphalt-Prüfverfahren-Teil 52: Konditionierung zur Ansprache der oxidativen Alterung;** 2017
- ÖNORM B 3580-1: Asphaltmischgut-Mischgutanforderungen-Teil 1:** Asphaltbeton-Empirischer Ansatz-Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1; 2016
- ONR 23580: Erstprüfung von Asphaltmischgut Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-20:2009-Empirischer Ansatz;** 2014
- EN 12697-33: Asphalt-Prüfverfahren für Heißasphalt-Teil 33:** Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät; 2007
- EN 12697-35: Asphalt-Prüfverfahren für Heißasphalt-Teil 35:** Labormischung; 2016
- EN 12697-3: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt-Teil 3:** Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer; 2013
- EN 12697-6: Asphalt-Prüfverfahren für Heißasphalt-Teil 6:** Bestimmung der Raumdichte von Asphaltprobekörpern; 2012
- EN 12697-8: Asphalt-Prüfverfahren für Heißasphalt-Teil 8:** Bestimmung der volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-probekörpern; 2003
- EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung der Nadelpenetration;** 2015

EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung des Erweichungspunktes–Ring- und Kugel-Verfahren; 2015

EN 12593: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß; 2015

EN 13398: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen; 2016

EN 13302: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung der dynamischen Viskosität von bitumenhaltigem Bindemittel mit einem Viskosimeter mit rotierender Spindel; 2016

EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels–Dynamisches Scherrheometer (DSR); 2012

EN 14771: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit–Biegebalkenrheometer (BBR); 2012