

Diploma Thesis

Investigation of the performance of asphalt mixtures modified by Gilsonite and Granulate Rubber

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Gebrauchsverhalten von Asphaltmischgütern mit einer Naturasphalt- und gummimodifizierten Bitumengranulat-Modifikation

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Armin Noei, BSc.

Matr.Nr.: 01125461

unter der Anleitung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Bernhard Hofko**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E230-3, 1040 Wien, Österreich

Wien, im September 2022

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird der Einfluss einer Doppelmodifikation bestehend aus einem gummi-modifiziertem Bitumengranulat(CR) und dem Naturasphalt Gilsonit(G) auf einen Asphaltbeton des Typs AC11 deck 70/100 untersucht. Dabei werden die Probekörper auf bituminöser und Asphalt-Ebene hinsichtlich Gebrauchseigenschaften und Materialverhalten geprüft, beobachtet und anschließend evaluiert. Dazu wird eine Alterungssimulation mittels RTFOT und PAV in der Bindemittellebene und eine Laboralterung nach TS 12697-52 auf Asphaltelebene durchgeführt.

Die Beigabe der Modifikatoren in das geschmolzene Bitumen erfolgt graduell und händisch. Es stellt sich heraus, dass das gummi-modifizierte Bitumengranulat eine starke Neigung zur Entmischung zeigt und somit eine rasche Verarbeitung notwendig ist. Die konventionellen Bindemitteluntersuchungen ergeben eine Reduzierung des PEN-Wertes und die Erhöhung des ERK-Wertes. Die Bindemittel werden anschließend gemäß dem SHRP-Schema mittels gebrauchsvorhaltensorientierter Bindemitteluntersuchungen geprüft und in das Performance Grade System eingeordnet. Die DSR-Untersuchungen zeigen eine Vergrößerung des komplexen Schubmoduls und eine Verschiebung des Phasenwinkels in elastische Richtung. Aus dem Vergleich der Kurven der $G^* \cdot \sin(\delta)$ stellt sich ein unwesentlicher Vorteil im Ermüdungsverhalten zugunsten des unmodifizierten Bindemittels heraus. Die BBR-Untersuchungen haben kaum eine Veränderung der Steifigkeit und m-Wert festgestellt. Der RV hat einen markanten Anstieg der dynamischen Viskosität bzw. Zähigkeit ergeben, jedoch wird das Bindemittel unter Berücksichtigung des SHRP-Systems Grenzwertes problemlos verarbeitbar sein. Die Bindemitteluntersuchungen ergeben einen Anstieg des PG-Grades von 58-28 (Stb 70/100) auf 70-28 (Stb 70/100 + 20% G + 15 % CR).

Nach Abschluss der Prüfungen auf Bindemittellebene wird den Gesteinen, mit der zuvor ermittelten Sieblinie gemäß der ÖNORM B3580-1, das modifizierte Bitumen zugesetzt und die Versuche auf Asphalt-Ebene werden mit den Spurbildungsversuchen begonnen. Die Prüfungen zeigen einen sehr großen Unterschied der Spurrinntiefen, womit der verbesserte Widerstand gegen Verformung aus den Ergebnissen der Bindemitteluntersuchungen belegt wird. Die Steifigkeitsnachweise mit dem 4PB anhand der ungealterten und gealterten Asphaltmischgüter zeigen vergleichbare Ergebnisse mit den DSR-Versuchen, wodurch sich der komplexe Steifigkeitsmodul $|E^*|$ analog zum komplexen Schubmodul $|G^*|$ erhöht. Der Speichermodul ist deutlich gestiegen und somit das elastische Materialverhalten. Das modifizierte Mischgut hat im Abkühlversuch merklich früher die Bruchtemperatur erreicht und niedrigere kryogene Spannungsspitzen gezeigt. Die Untersuchungsergebnisse aus dem BBR zeigen daher keinerlei Korrelation im Tieftemperaturbereich zwischen Bindemittel und Asphalt.

Abstract

In this diploma thesis the influence of a double modification consisting of a crumb rubber-modified bitumen granulate (CR) and the natural asphalt Gilsonit(G) on an asphalt concrete of the type AC11 deck 70/100 is examined. The specimens are tested on a binder level and an asphalt mix level. The performance is observed and then evaluated. For this purpose, an aging simulation using RTFOT and PAV is carried out on the binders and laboratory aging according to TS 12697-52 on the asphalt specimens.

The addition of the modifiers to the melted bitumen is done gradually and by hand. It turns out that the crumb rubber-modified bitumen granules have a strong tendency to segregate and therefore rapid processing is necessary. The conventional binder test methods show a reduction in the PEN value and an increase in the softening point. The binders are then tested on performance according to the SHRP scheme and classified in the Performance Grading System. The DSR investigations show an increase of the complex shear modulus and a shift of the phase angle in elastic direction. The comparison of the curves of $G^* \cdot \sin(\delta)$ show an insignificant advantage in fatigue behavior of the unmodified binder. The BBR investigations reveal hardly any changes in the stiffness and m-value. The RV exhibit an increase in dynamic viscosity, but the binder is within the limit value of the SHRP-system and can be worked, pumped, layed and compacted without any problems. The research result lead to an increase of the PG grade from 58-28 (Stb 70/100) to 70-28 (Stb 70/100 + 20% G + 15% CR).

After completing the investigations at the binder level the modified bitumen was added to pre-heated aggregates according ÖNORM B3580-1 and the investigations on the asphalt specimen start with the wheel tracking test. The test results show remarkable differences in rut depths, hence the improved resistance against deformation, which were previously observed in the binder tests. The evaluation of the flexural stiffness with the 4PB using unaged and aged asphalt mixtures show comparable results with the DSR tests, resulting in the increase of the complex stiffness modulus $|E^*|$ analogous to the dynamic shear modulus $|G^*|$. The storage modulus has increased significantly and leading to more elastic material behavior. The TSRST for the modified mixture exhibit noticeably higher crack temperature with lower cryogenic peak stresses reached. The test results from the BBR therefore do not show any correlation in the low temperature range between binder and asphalt.

Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde am Institut für Verkehrswissenschaften im Forschungsbereich Straßenwesen an der Technischen Universität Wien verfasst.

Bei meinem Betreuerteam im Labor bestehend aus den Herren Thomas Riedmayer, Bernhard Hadler und David Valentin möchte ich mich für Ihre hervorragende Unterstützung und die angenehme Zusammenarbeit bedanken. Die Praxis in diesem sehr wertschätzenden und kollegialen Arbeitsumfeld hat mir sehr viel Freude bereitet.

Mein besonderen Dank gilt meinem Betreuer Herr Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko. Während der gesamten Diplomarbeit genoss ich eine ausgezeichnete Betreuung und er hat mir von der Themenwahl bis zur Wahl der Verfahren und Materialien freie Hand gewährt. Dadurch hat er mir die Möglichkeit gegeben, meiner wissenschaftlichen Neugier nachzugehen und mich fachlich weiterzuentwickeln.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern Mohammad Reza Noei und Parisa Saberi für die unermüdliche und herzliche Unterstützung während des Studiums bedanken. Dieses Diplomstudium wäre ohne sie nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Forschungsgrundlage, Problemstellung und Motivation	7
1.2	Fragestellungen	8
2	Materialbeschreibung	9
2.1	Bitumen	9
2.1.1	Charakteristische Eigenschaften	9
2.1.2	Entstehungs- und Herstellungsprozess und Verarbeitbarkeit	9
2.2	Naturasphalt	10
2.2.1	Einteilung, Vorkommen	10
2.2.2	Mechanische und chemische Eigenschaften	11
2.2.3	Löslichkeit und Verarbeitbarkeit	11
2.3	Gummimodifizierte Bitumengranulate	12
2.3.1	Begriffsbestimmung	12
2.3.2	Geschichtliche Entwicklung	12
2.3.3	Herstellung von Gummimehl	13
2.3.4	Reaktionsablauf bei der Gummimodifikation	13
2.3.5	Industrielle Verarbeitung	14
3	Methodenbeschreibung und Geräte	15
3.1	Alterung	15
3.1.1	Simulation der Kurzzeitalterung mittels Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)	16
3.1.2	Simulation der Langzeitalterung mittels Pressure Ageing Vessel (PAV)	16
3.2	Bitumenprüfungen	17
3.2.1	Konventionelle Bindemittelprüfung	17
3.2.2	Performance Grade - Auswahlverfahren	17
3.2.3	Gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfungen	19
3.3	Asphaltprüfungen	21
3.3.1	Konventielle Prüfmethode	21
3.3.2	Gebrauchverhaltensorientierte Prüfmethode	22
4	Materialeigenschaften und Prüfungsvorbereitung	25
4.1	Materialien	25
4.1.1	Gesteine	25
4.1.2	Füller	25
4.1.3	Asphalttyp	25
4.1.4	Straßenbaubitumen	26
4.1.5	Naturasphalt	26
4.1.6	Gummimodifiziertes Bitumengranulat GRM	28
4.2	Mischungsverhältnis	28
4.3	Herstellung des modifizierten Bindemittel-Mischguts	28
4.4	Herstellung des Asphaltmischguts	29

4.5	Rohdichte der Asphaltprobekörper	32
4.6	Raumdichte und Abmessungen der Asphaltprobekörper	33
4.7	Probekörperbezeichnungen	34
5	Prüfprogramm	36
5.1	Bindemittelprüfungen	36
5.1.1	Erweichungspunkt Ring und Kugel	36
5.1.2	Penetrationstest	37
5.1.3	Tubentest nach Zenke	38
5.1.4	Dynamisches Scherrheometer	38
5.1.5	Rotationsviskosimeter	38
5.1.6	Biegebalkenrheometer	39
5.1.7	Simulation der Kurzzeitalterung mit RTFOT	40
5.1.8	Simulation der Langzeitalterung mit PAV	41
5.2	Asphaltprüfungen	42
5.2.1	Spurbildungsversuch	42
5.2.2	TSRST Abkühlversuch	42
5.2.3	Steifigkeitsversuch	44
5.2.4	Langzeitalterungssimulation des Asphaltmischguts	45
6	Ergebnisse und Interpretation	46
6.1	Bitumenprüfungen	46
6.1.1	Konventionelle Bindemittelprüfung	46
6.1.2	Gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfungen	48
6.2	Asphaltprüfungen	54
6.2.1	Konventionellen Prüfmethoden	54
6.2.2	Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethoden	55
6.3	Korrelationen der Untersuchungen auf Asphalt- und Bindemitttelebene	59
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	61
8	Anhänge	64
8.1	Mischgutherstellung	64
8.2	DSR-Ergebnisse	66
8.3	Spurbildungsversuch	72
8.4	Abkühlversuch	77
8.5	Steifigkeitsnachweis(4PBB)	84

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Forschungsgrundlage, Problemstellung und Motivation

Die vorrangige Zielsetzung im österreichischen Straßenbau sind Straßenkonstruktionen die auch unter stärkster Verkehrsbelastung, dauerhaft bleiben. Der Straßenbenutzer soll über die gesamte technische Lebensdauer einer Straße hinweg die gleichen Gebrauchseigenschaften genießen können. Die Straßenoberfläche soll in seinen Eigenschaften hinsichtlich Lärmemmissionen, Griffigkeit und Ebenheiten optimiert sein. [27]

Mit den stetig steigenden Verkehrszahlen und der zunehmenden Klimavariabilität wächst die Beanspruchung der heimischen Asphaltstraßen. Als Resultat daraus sind unter anderem bleibende Verformungen, die an der Oberfläche in Form von Spurrinnen erkennbar sind.

Eine Möglichkeit den Widerstand gegen Spurrinnenbildungen nachhaltig zu erhöhen, sind gewisse Additive, welche dem Bindemittel im Asphaltmischgut beigegeben werden können.[39] Neben industriell produzierten Polymeren und Elastomeren können auch Naturasphalte, wie etwa Gilsonit, zum Grundbitumen beigegeben werden, welche die Zähigkeit und die Steifigkeit erhöhen.

In hochbelasteten kommunalen Strecken wurde Gilsonit bereits erprobt. Die Erhöhung der mechanischen Standfestigkeit und des Widerstandes gegen Verformungen der Asphaltstraße bieten einen gleichwertigen Ersatz zu den Anwendungen halbstarrer Beläge oder starrer Betondecken. [26]

Vorausgehende Untersuchungen zu Modifikationen von iranischem Naturasphalt auf Bindemittel mit dem PG Grade von PG58-22 und PG64-22 existieren. Die Resultate haben bei Zugabe von 4 M%, 8 M% und 12 M% im Bitumen gezeigt, dass sich die dynamische Viskosität erhöht hat und sich das Hochtemperaturverhalten im Allgemeinen verbessert. Hinsichtlich Tieftemperaturverhalten hatte die Beigabe keinerlei Einfluss.[6]

An weiterer Stelle wird eine frühere Tendenz zu Kälte- und Ermüdungsrisse festgestellt, wenn größere Mengen Gilsonit beigemengt werden.

Wenngleich die Modifikation mit Gilsonit die Verformungsbeständigkeit verbessern kann, so ist dessen Nutzung aber in kälteren Klimazonen eingeschränkt. Es ist daher entweder ein zusätzliches Additiv oder eine angepasste Rezeptur notwendig, um den Temperatureinsatzbereich nach unten hin zu erweitern.[31]

Ein zunehmend wichtiges Thema ist die Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit. Straßenbauprojekte müssen so konzipiert, so gebaut sein oder abgebrochen werden, dass natürliche Ressourcen geschont werden und eine Kompatibilität mit der Wiederverwertung der Baustoffe, die Dauerhaftigkeit des Bauwerks und der Umwelt gewährleistet ist. [4] Eine Modifikation des Bindemittels hat demnach auch die Aufgabe die Lebenszyklusdauer einer Asphaltdeckschicht maßgeblich zu verlängern, ohne schädigende Auswirkungen auf die Umwelt zu haben.

Üblicherweise wird im österreichischen hochrangigen Verkehrsnetz polymer-modifiziertes Bindemittel verwendet. Die Materialherstellung eines Straßenbauprojektes macht etwa 60-70 % der Gesamtenergieinvestition aus. Die industrielle Produktion von Polymeren und die Extraktion von Bitumen ist darin inbegriffen.[3]. Hier eignet sich der Ansatz recycelte Materialien für die

Modifikation in Betracht zu ziehen.

Der Einsatz von Gummigranulat aus Altreifen hat sich als besonders nachhaltiges und umweltschonendes Additiv erwiesen. Das Entsorgungsproblem der Altreifen wird aktiv bekämpft wird, da sie ansonsten verbrannt oder in Deponien gelagert werden müssen, was eine immense Herausforderung für die Umwelt darstellt. Wenn es zu gummimodifiziertem Bitumengranulat verarbeitet wird, kann es im Mischprozess entweder dem Bindemittel oder den Gesteinen hinzugefügt werden. Diese Modifikation bewirkt eine Änderung der mechanischen Eigenschaften von Asphaltmischgütern. Es führt zu einem Anstieg des komplexen Schubmoduls und die Reduzierung der Steifigkeit in den tieferen Temperaturen.[3].

In der Forschungsarbeit [5] wird die Doppelmodifikation von Gilsonit(G) und Gummigranulat(CR) mit 70/100 Straßenbaubitumen untersucht. Gilsonit wurde mit 0%, 10 M%, 20M%, 30M%, 40M% und Gummigranulat mit 5M%, 10M%, 15M%, 20M% der Bindemittelmasse eingebaut.

Das Gebrauchsverhalten des Bindemittels und des gesamten Asphaltmischguts in unterschiedlichem Mischverhältnissen wird anschließend evaluiert. Die Ergebnisse zeigen eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens und des Widerstands gegen Verformungen.

1.2 Fragestellungen

Die Herausforderung dieser Forschungsarbeit lässt sich in den folgenden Fragen komprimieren.

- Können die Vorteile hinsichtlich des Verformungswiderstandes, durch Beigabe von Gilsonit beibehalten und die Nachteile, durch mangelnde Viskosität in niedrigen Temperaturen, eliminiert werden, wenn man gummimodifiziertes Bitumengranulat beimengt?
- Welche Beobachtungen lassen sich hinsichtlich Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften des Asphaltmischguts und des Bindemittels im Detail machen, wenn man die Doppelmodifikation durchführt?
- Können die Ergebnisse aus den Bindemitteluntersuchungen einen Ausblick auf das Materialverhalten im Asphaltmischgut bieten?

Kapitel 2

Materialbeschreibung

2.1 Bitumen

2.1.1 Charakteristische Eigenschaften

Bitumen ist ein schwerflüchtiges und dunkelfarbiges Gemisch aus verschiedenen organischen Substanzen, das bei der Aufarbeitung von geeignetem Erdöl gewonnen wird. Es kann auch in der Natur zusammen mit Gesteinsfragmenten in Naturasphalten, meist in Gebieten mit Rohöl und Erdgasfunden, vorkommen. [8]. Bitumen ist ein viskoelastisches Material und verändert sein mechanisches Verhalten je nach Umgebungstemperatur. (Abbildung 2.1) Bei kalten Temperaturen wird es spröde und bei Erwärmung durchläuft es alle Zustände von fest bis dünnflüssig bis es sich anfängt zu zersetzen. [11] Die für Bitumen typischen Eigenschaften beruhen auf einem kolloidalen System, in dem eine disperse Phase (Asphaltene) in einer zusammenhängenden (kohärenten) Phase aus hochsiedenden Ölen (Maltene) in stabiler Verteilung vorliegt. [44]

Das Material ist in Wasser praktisch unlöslich und wird daher auch unter anderem verwendet, um empfindliche Stoffe und Bauteile gegen Wasser zu schützen. Alkylbenzole wie etwa Toluol können Bitumen vollständig auflösen. [11]

2.1.2 Entstehungs- und Herstellungsprozess und Verarbeitbarkeit

Das im Laufe der Erdgeschichte abgestorbene Plankton, sinkt in den Ozeanen zu Boden und bildet allmählich Schichten, welche sich zu Faulschlamm verwandelt. Durch weitere Ablagerungen wird dieser Schlamm in die Tiefe gedrückt und unter hohem Druck, bei Anwesenheit anaerober Bakterien in Kerogen umgewandelt. Dies ist das Ausgangsmaterial für Rohöl. Das Rohöl, das entsteht, wandert nun im Sediment nach oben, denn es ist leichter als Wasser. Stößt es auf eine undurchlässige Schicht, beispielsweise auf Ton, sammelt es sich und kann später gefördert werden. [43]

Das Rohöl wird nun in einem Raffinerieprozess aufbereitet. Ein Ofen erhitzt das Öl auf und wird in eine Destillationskollone überführt. Bei einem Temperaturgradienten von 400°C am Boden bis 20°C an Ihrer Spitze wird das Rohöl in seine Fraktionen aufgespaltet. Durch perforierte Destillationsböden steigt das Gasflüssigkeitsgemisch auf. Wird der Siedepunkt einer Fraktion unterschritten, kondensiert diese in einer Blasenkappe und läuft dann durch den Boden ab. In einer abschließenden Vakuumdestillation wird Gasöl ein weiteres Mal fraktioniert und ergibt dann Destillationsbitumen. Der Bitumenanteil in diesem Gesamtprozess beläuft sich auf unter

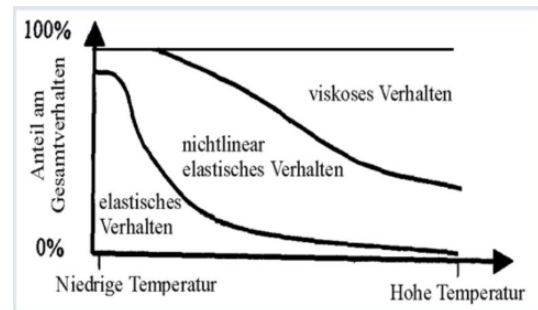


Abb. 2.1: Materialverhalten von Asphalt, TU Wien

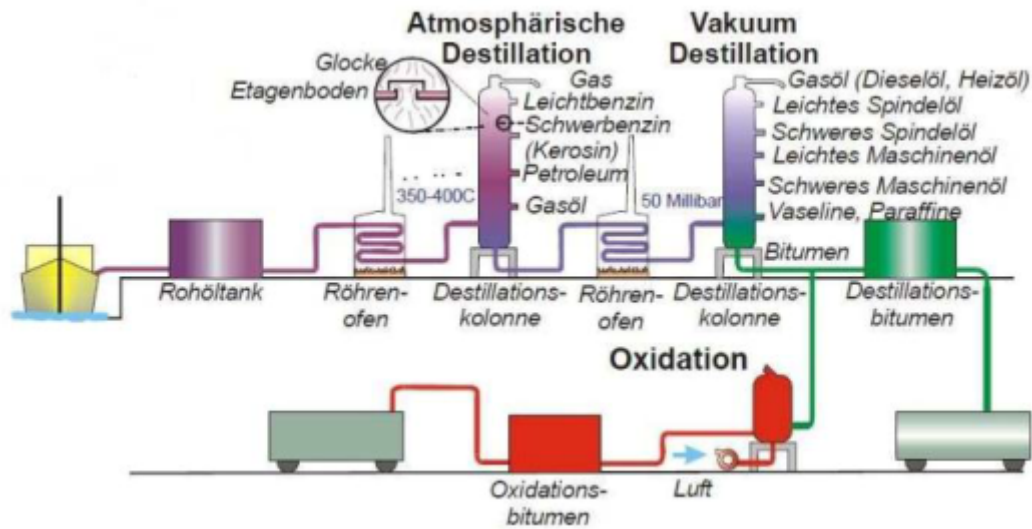


Abb. 2.2: Vom Rohöl zum Bitumen, Partl.M,2011

fünf Prozent. [41]

Bitumen ist bei normaler Raumtemperatur nicht verarbeitbar oder förderbar. Zum Verarbeiten von Bitumen in einem Endprodukt sind somit Hilfsmittel oder weitere Verfahrensschritte erforderlich. Die bekannteste Möglichkeit ist das Erhitzen von Bitumen bis zum flüssigen Zustand. Aus diesem Grund muss meist sehr viel Energie bei der Produktion von Asphaltmischgüter aufgebracht werden. [43]

2.2 Naturasphalt

2.2.1 Einteilung, Vorkommen

Man unterscheidet Naturasphalte je nach Herkunftsort und Zusammensetzung nach [12]:

1. eigentliche Asphalte(Erdpeche)
2. Asphaltgesteine
3. Asphaltite

Gilsonit, auch Gilsonite genannt, ist unter den Asphaltiten einzuordnen. Gilsonit ist ein hochschmelzendes Kohlenwasserstoff-Harz, welches nicht an der Erdoberfläche vorkommt, sondern bergmännisch geschürft werden muss. Untersuchungen von Gilsonit aus dem Uintah Becken¹ auf seine äußerlichen Merkmale ergeben.

"Gilsonit ist eine glänzende, schwarze Substanz, ähnlich in seinem Erscheinungsbild zum Mineral, Obsidian. Es ist spröde und kann sehr leicht in ein dunkelbraunes Pulver zertrümmert



Abb. 2.3: Gilsonitpulver

¹Utah,USA

werden. (Nader Neiri et al.,2014)

Entdeckt wurde der Naturasphalt in den 1860-Jahren von Samuel H. Gilson. Der Asphaltit wird unter anderem im Uintah Becken, sowie im Iran, in den Provinzen Kermanshah, Ilam und Khorramabad abgebaut.[2]

2.2.2 Mechanische und chemische Eigenschaften

Die Eigenschaften des Gilsonits ist stark abhängig von der Region in der es abgebaut wird. Daher sind prinzipiell für jede Abbaustelle, Laboruntersuchungen des Materials vorzunehmen, um die chemischen und physikalischen Eigenschaften zu identifizieren[6].

Der hohe Stickstoffgehalt ist ein sehr charakteristischer Wert für den Gilsonit, welcher die spezielle feuchte Oberfläche erzeugt und den Widerstand gegen die Oxidation mit freien Radikalen hervorruft [2]

Das Molekulargewicht hat einen direkten Einfluss auf das Fließverhalten von Materialien und ist bei Gilsonit höher als bei anderen Naturasphalten.[30]

Ein weiteres Merkmal ist der niedrige Schwefelgehalt.

Der mit Abstand größte Bestandteil des Asphaltits ist der hohe Kohlenstoffgehalt, welcher nur mit Erdölpech vergleichbar ist.[2]

Der Vergleich des Kohlenstoffgehaltes mit anderen Elementen erlaubt es uns im folgenden einige Materialeigenschaften besser nachvollziehen zu können.

- **Wasserstoff/Kohlenstoff-Verhältnis(H/C)**

hat Einfluss auf die Viskosität, die thermodynamischen Eigenschaften,den Erstarrungspunkt, die Dichte und die Löslichkeit des Gilsonits.

- **Sauerstoff/Kohlenstoff-Verhältnis(O/C)**

gibt Aufschluss über die Umwelteinflüsse unter die der Gilsonit entstanden ist.

- **Stickstoff/Kohlenstoff-Verhältnis(C/N)**

gibt Aufschluss über das Alter des Gilsonits.

- **Schwefel/Kohlenstoff-Verhältnis (S/C)**

ist allgemein abhängig davon ob sich das Material im Meer oder an Land befand.

2.2.3 Löslichkeit und Verarbeitbarkeit

Üblicherweise sind Naturasphalte mit hohem H/C-Verhältnis besser löslich und schmelzbar als die mit niedrigerem H/C Verhältnis [2]. Gilsonit ist nahezu vollständig auflösbar in CS₂² und TCE³. Je besser es sich in diesen Stoffen auflöst, desto stabiler wird die Verbindung mit dem Asphaltmischgut [6]. In der Industrie wird der Asphaltit auf unterschiedliche Arten in einem Asphaltmischgut verarbeitet.

²Kohlenstoffdisulfid

³Trichlorethen

- **Vormischung des Bitumenmischguts**

Die Voraussetzung für diese Methode sind Rührwerke in den Bitumentanks. Bei einer zuvor festgelegten Temperatur wird das Gilsonit eingerührt und homogenisiert. Die Mischdauer und die Temperatur ist möglichst genau einzuhalten, damit die Qualität nicht beeinträchtigt wird. Nach erfolgreicher Homogenisierung, bleibt die Mischung stabil und es kommt zu keiner Entmischung.

- **Beigabe in den Chargenmischer**

Man kann den Asphaltit auch direkt in den Mischer begeben, wobei die Füllerschnecke als Dosierhilfe dienen kann. Dabei ist wichtig, dass es vor dem Bitumen auf das heiße Gestein eingebracht wird. Zusätzlich muss die Nassmischzeit, um 15 Sekunden verlängern werden, um eine Homogenisierung zu gewährleisten.

- **Beigabe in den Trommelmischer**

Hier kann das Gilsonit schon zuvor durch Vormischung oder durch die Füllerschnecke gleichzeitig mit dem Bitumen beigegeben werden. Es ist für die nötigen Scherkräfte eine Zirkulationspumpe notwendig, um eine homogene Mischung zu erreichen.[23]

2.3 Gummimodifizierte Bitumengranulate

2.3.1 Begriffsbestimmung

Gummimodifiziertes Bitumengranulat (Granulate Rubber Modified, GRM) sind mit Gummimehl aufbereitete Bitumen, welche nach der Aufbereitung granuliert werden. Gummimodifizierte Bitumengranulate werden bezeichnet mit dem Gesamtanteil an Gummimehl und dem davon im Bitumen angelösten Anteil in M.-%. Beispiele: GRM 40/15, GRM 40/20

Gummimodifizierte Bitumen mit Gummimodifizierten Bitumengranulaten (Rubber Modified Bitumen with Granulate, RmB G) sind mit Gummimodifizierten Bitumengranulaten aufbereitete Bitumen.

Gummimehl sind aus geeigneten Gummiprodukten durch Mahlen gewonnene Produkte. [42]

2.3.2 Geschichtliche Entwicklung

Bereits in 1950er Jahren ist die Idee Altreifengummis, mit dem Ziel die Dauerhaftigkeit der Straßenoberfläche durch die Flexibilität des Gummis zu erhöhen, entstanden. Nach Versuchen ist dieses Vorhaben, an der kürzeren Lebensdauer im Vergleich zu konventionellen Asphalten gescheitert. Ein Jahrzehnt später ist CHARLES H. McDONALD auf die Idee zurückgekommen und hat das Gummi, anders als zuvor, sorgfältig mit dem Bitumen durch gemischt und hat die Mischung anschließend für etwa 45 bis 60 Minuten reagieren lassen. Dadurch konnten verbesserte Materialeigenschaften festgestellt werden.

1975 wurde Gummi erstmals erfolgreich im Heißasphalt verwendet. 1988 veröffentlichte die „American Society for Testing



Abb. 2.4: gummimodifiziertes Bitumengranulat GRM 40/15

and Materials (ASTM)“ die erste einheitliche Definition von Gummi-Bitumen. Demnach betrug der Anteil des Gummis mindestens 15 M.-% und es musste eine Reaktionszeit von mindestens 45 Minuten gewährleistet werden.

In Deutschland wurden zeitgleich vergleichbare Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse deuteten auf eine Verringerung der Temperaturempfindlichkeit und eine Erweiterung des Plastizitätsbereiches. Zudem konnte eine Erhöhung der Elastizität, insbesondere der Druckelastizität, nachgewiesen werden.[34]

2.3.3 Herstellung von Gummimehl

Meist wird das Gummimehl bzw. -granulat aus Pkw und Lkw-Altreifen gewonnen. Neben Gummi bestehen Altreifen aus Stahl und Textilfasern. Um diese voneinander zu trennen, sind in der Regel drei Zerkleinerungsprozesse (Vorzerkleinerung, Granulierung und Feinvermahlung) erforderlich. Zwischen diesen Prozessen werden die Stahldrähte, Textilfasern und Fremdstoffe entfernt. Für die Aufbereitung auf die gewünschte Korngröße existieren zwei Verfahren, die ambiante Vermahlung (Warmvermahlung) und die kryogene Vermahlung (Kaltvermahlung). Bei Ersterem wird das Material bei Umgebungstemperatur zerkleinert, während bei der kryogenen Vermahlung die vorzerkleinerten Reifenstücke mit flüssigen Stickstoff abgekühlt werden, um ein Verspröden und damit ein besseres Brechen des Materials zu erreichen.[34]

2.3.4 Reaktionsablauf bei der Gummimodifikation

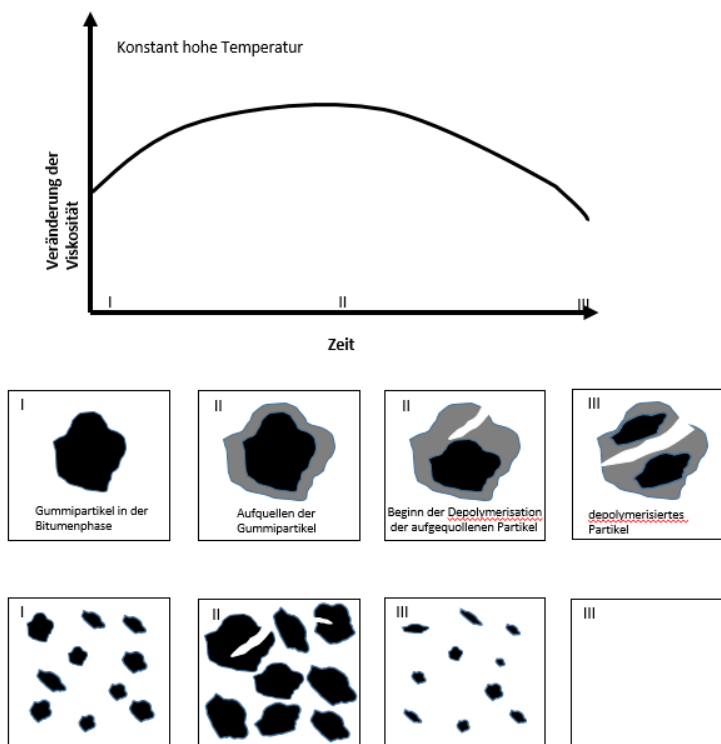


Abb. 2.5: oben: Verlauf der Viskosität; mitte: Verlauf der Gummipartikelgröße; unten: Veränderung der Bitumenmatrix

Bei der Zugabe von Gummimehl zum Bitumen entsteht eine Interaktion zwischen den beiden Stoffen (Abbildung 2.5). Die Maltene im Bitumen lösen die Elastomeranteile im Gummi, was

zum Aufquellen der Gummipartikel auf das Doppelte ihrer Größe führt. Durch den Quellvorgang entsteht in der Bitumenmatrix ein Gel aus Elastomeren, Asphaltenen und Maltenen mit einem verbleibenden Teil der ursprünglichen Gummipartikel. Dadurch kommt es zu einer Steigerung der Viskosität, welche jedoch stark von der Dauer des Reaktionsvorganges abhängt. Wird das Gemisch im Nassverfahren länger als zwei Stunden fortwährend gemischt, kommt es zu einer Depolymerisation, welche wiederum die Absenkung der Viskosität zur Folge hat.

Im Allgemeinen ist das modifizierte Bindemittel nur bedingt lagerstabil und sollte unmittelbar darauf verarbeitet werden, da sich ansonsten die schwereren Gummipartikel absetzen oder die Komposition sich entmischt. [34]

2.3.5 Industrielle Verarbeitung

Gummimodifizierte Bitumengranulate werden während der Trockenmischphase, in der die Gesteinskörnungen und Füller vermennt werden, hinzugegeben. Die Zugabe kann erfolgen, durch:

- (a) Sackzugabe(Aufschmelzpackung) direkt in den Mischer
- (b) Zugabe aus einem Big Bag über eine Dosieranlage mit Verwiegeeinrichtung
- (c) Zugabe über ein vorhandene Einblasvorrichtung z.B. für Faserstoffe
- (d) Zugabe über eine mobile Einblasvorrichtung

Nach der Granulatzugabe wird etwa für 5 bis 10 Sekunden weitergemischt, bis das Straßenbaubitumen zugeführt wird [42]. Dabei soll möglichst auf eine konstante Temperatur und eine zeitlich begrenzte Lagerung geachtet werden.

Kapitel 3

Methodenbeschreibung und Geräte

3.1 Alterung

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben ist Bitumen organischen Ursprungs. Somit ist es oxidativen Prozessen und damit auch einer Alterung während der Mischgutproduktion, des Einbaus und der gesamten Liegedauer unterlegen. Die thermische und oxidative Alterung führt zu chemischen und strukturellen Änderungen des Bindemittels im Laufe der Nutzungsdauer. Es kommt zu Verhärtung und Versprödung des Bindemittels, was die Rissbildung unter dynamischer Belastung (Ermüdung) und bei Kälteeinwirkung begünstigt.[1]

Generell wird zwischen Kurzzeit- und Langzeitalterung unterschieden. Kurzzeitalterung beschreibt eine Oxidation bei hohen Temperaturen (um 150°C), die vorrangig bei der Produktion und beim Einbau von bitumengebundenen Materialien auftreten. Hier verdunsten verbliebene niedrigsiedende Komponenten. Langzeitalterung hingegen beschreibt Alterungsprozesse, die während der Lebensdauer von Bitumen als Reaktion mit Luftsauerstoff auftreten. Im Labor können beide Stufen der Alterung repräsentativ simuliert werden.[33]

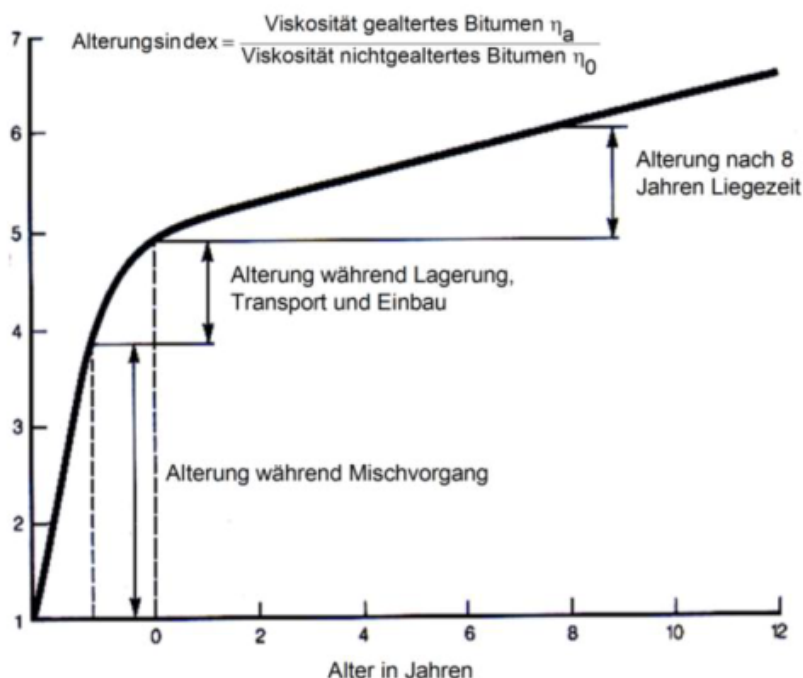


Abb. 3.1: Alterungsverlauf von Bitumen, TU Wien, 2020

3.1.1 Simulation der Kurzzeitalterung mittels Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)

Das Bitumen im Asphalt durchläuft während der Verarbeitung mehrere Abschnitte. Im Bitumentransport, der Heißlagerung, während Pumpvorgänge, dem Mischen im Mischwerk, der Mischgutlagerung im Heißsilo, dem Asphalttransport zur Baustelle und im Mischguteinbau kommt es bei meist hohen Temperaturen (120-185°C) zu Alterungsvorgängen im Bitumen. Dabei kommt das Bindemittel ständig mit Luftsauerstoff in Berührung. Der RTFO Test ist dahingehend ausgelegt, diesen Bedingungen zu entsprechen und hat im wesentlichen zwei Ziele [25]:

1. Das Altern von Bitumen, dass dann mit anderen Methoden weiter geprüft wird
2. Bewirken einer Masseänderung durch destillative und oxidative Einflüsse

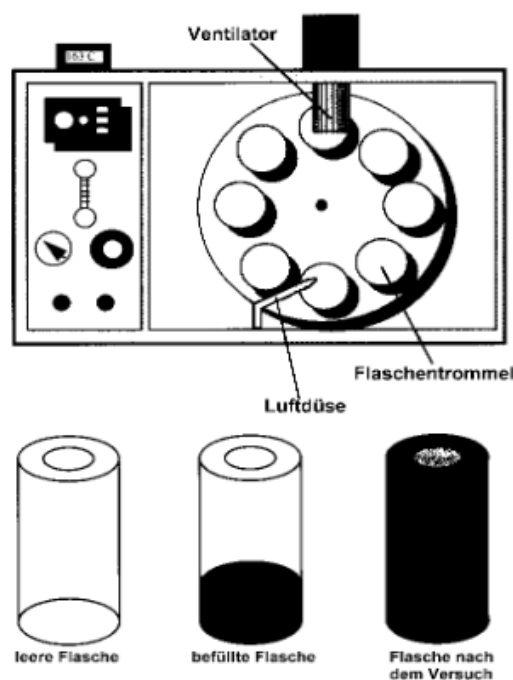


Abb. 3.2: Schematische Darstellung eines RTFOT-Ofens, Litzka & Strobl, 1998

3.1.2 Simulation der Langzeitalterung mittels Pressure Ageing Vessel (PAV)

Die Bitumenalterung mit dem PAV bereitet die Probe durch Konditionierung für die Prüfung mit anderen Methoden vor.[25] Eine so gealterte Probe soll die langsame Oxidation simulieren, die sich naturgemäß während einer Liegedauer von 10-12 Jahren nach dem Einbau ereignet.[1].Die Bindemittel werden in dafür vorgesehenen Schalen eingefüllt und werden durch Schwenken auf die Fläche ausgebreitet. Somit entsteht eine große Oxidationsoberfläche. Eine PAV-Alterung kann aber nicht vollständig alle Einflussgrößen bei bitumenhaltigen Anwendungen umfassen oder die relative Beständigkeit gegen Alterung im eingebauten Zustand liefern. Dazu sind mehr Randbedingungen, wie der Hohlraumgehalt im Asphalt, Durchlässigkeit des Asphalts, Eigenschaften der Gesteine und andere Faktoren in Betracht zu ziehen [19]. Jedoch können die oxidativen Prozesse aus der Umwelt hervorgerufen durch Luft, Wasser, Salz und Sonnenstrahlung möglichst gut simuliert werden. [25]

3.2 Bitumenprüfungen

Die Bindemitteluntersuchungen werden in konventionelle und gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfungen eingeteilt und beurteilen das Bitumen physikalisch und/oder leistungsorientiert, bei praxisrelevanten Temperaturen. [44]

3.2.1 Konventionelle Bindemittelprüfung

3.2.1.1 Penetrationstest

Mit dem Penetrationstest nach EN 1426 werden Bindemittel entsprechend ihres sogenannten PEN-Wertes den Straßenbaubitumensorten gemäß ÖNORM EN 12591 zugeordnet. [44] Der PEN-Wert ist die Eindringtiefe einer genormten Nadel in das Bindemittel. Je niedriger dieser Wert ist, desto härter ist das untersuchte Bindemittel. [25]

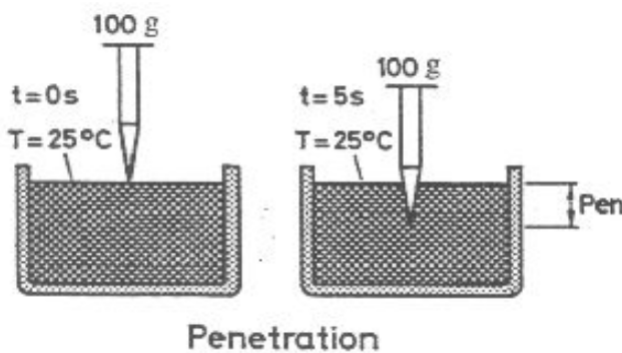


Abb. 3.3: Schematische Darstellung eines Penetrationstests, Litzka & Strobl, 1998

3.2.1.2 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Mit dem Ring und Kugel-Verfahren nach EN 1427 wird der Erweichungspunkt eines Bindemittels ermittelt. Der Erweichungspunkt ist die Temperatur in der sich das Bindemittel verformt. Sie gibt die obere Grenze der Gebrauchsspanne an und gibt Aufschluss über die Konsistenz von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bei erhöhten Gebrauchstemperaturen. Die Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel ist nach der Nadelpenetration das zweitälteste Prüfverfahren für bitumenhaltige Bindemittel [44] [18].

3.2.2 Performance Grade - Auswahlverfahren

Die Beurteilung des Bitumens erfolgt in Österreich normgemäß mittels konventioneller Prüfmethoden (Abschnitt 3.2.1) bei festgelegten Prüfbedingungen (Temperatur). Diese Werte geben keinen direkten Hinweis auf das Verhalten des Bindemittels bzw. des damit hergestellten Asphalttes in bestimmten Schadensfällen bei maßgebenden Temperaturbereichen. Im Vergleich zweier Bitumensorten, kann basierend auf Penetrationsmessungen bei 25°C das eine Bitumen eine härtere Konsistenz zeigen, wo beim Spurrinnen-Verfahren bei 60°C das andere Bitumen sich als resistenter erweist. Das führt bei einer rein normativ getroffenen Auswahl zu einer falschen Bitumensorte [25].

Das amerikanische Forschungsprojekt SHRP¹ hat sich als Ziel gesetzt, durch Kenntnis über die chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften von Bitumen und Asphalt, das Gebrauchsverhalten von Asphaltmischgütern zu verbessern. Das Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE) - Programm ist ins Leben gerufen worden und im Zuge dessen sind Leistungsspezifikationen ausgearbeitet worden, wobei grundlegende Punkte, wie das Verformungs-, Ermüdungs-, und Tieftemperaturverhalten prüftechnisch erfasst werden. Die obere Temperaturgrenze (High Performance Grade) und die untere Temperaturgrenze (Low Performance Grade) wird durch gebrauchsvorhaltensorientierten Bindemittelprüfungen ermittelt und in Temperaturstufen eingeteilt. (Tabelle 3.1)[44]. Die Wahl der Bitumensorte wird dann unter Berücksichtigung

Tab. 3.1: Performance Grade nach SUPERPAVE

High Performance Grade [°C]	Low Performance Grade [°C]
46	-34, -40, -46
52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46
58	-16, -22, -28, -34, -40
64	-10, -16, -22, -28, -34, -40
70	-10, -16, -22, -28, -34, -40
76	-10, -16, -22, -28, -34
82	-10, -16, -22, -28, -34

der klimatischen Bedingungen der jeweiligen Region getroffen. Dabei werden die Temperatur-Maxima T_{max} und -minima T_{min} der Asphaltdeckschicht unter bestimmten Annahmen ermittelt und verglichen. Da die Temperaturen großen Schwankungen unterliegen sind sogenannte Zuverlässigkeiten einzurechnen. Mit 50% und 98% wird das Risiko der Über- und Unterschreitung der Grenzwerte einkalkuliert. Verfügt man über landesweite Wetterdaten so ist es möglich detaillierte PG-Karten (Abbildung 3.4) anzufertigen.

Die PG-Karten dienen jedoch lediglich als Orientierungshilfe, da einige Faktoren wie Schatten, starker Wind und sehr wichtig die Verkehrsbelastung unberücksichtigt bleiben. Um die Spurrinnenbildung durch etwa stehenden Verkehr Rechnung zu tragen kann der PG um zwei Stufen erhöht werden. So würde sich die Bitumenwahl eines PG 58 -28 auf ein PG 70 -28 ändern. In Österreich gibt es eine tabellarische Auflistung (Tabelle 3.2) der PG nach PIBER[25].

¹Strategic Highway Research Program

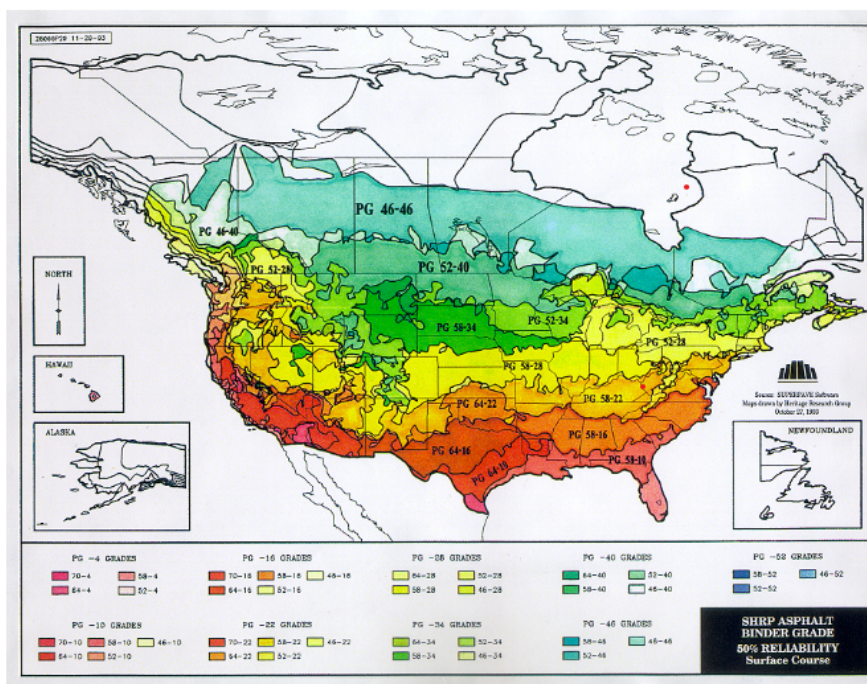


Abb. 3.4: Beispiel einer PG Karte mit einer Zuverlässigkeit von 50%, Vereinigte Staaten, Litzka & Strobl, 1998

Tab. 3.2: Performance Grade einiger Stationen Österreichs

	50 % Zuverlässigkeit	98 % Zuverlässigkeit
Wien (Unterlaa)	PG 52 -16	PG 52 -22
Spittal/Drau	PG 52 -16	PG 52 -22
Innsbruck (Universität)	PG 52 -10	PG 52 -16
Mondsee	PG 52 -10	PG 52 -16
Laa/Thaya	PG 52 -16	PG 58 -22
Bad Ischl	PG 52 -16	PG 52 -28
Tamsweg	PG 46 -22	PG 52 -28

3.2.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfungen

3.2.3.1 Dynamischer Scherrheometer (DSR)

Mit dem Dynamischen Scherrheometer werden der komplexe Schubmodul G^* und der Phasenverschiebungswinkel δ (auch Verlustwinkel) in einem definierten Temperaturbereich gemessen. Der Phasenverschiebungswinkel δ gibt Auskunft darüber, ob sich eine Substanz tendenziell elastisch (δ eher gering) oder tendenziell viskos (δ eher hoch, nie höher als 90°) verhält. Der DSR erfasst hierzu den Zeitunterschied zwischen dem Extremwert der Spannung und der Deformation. Bei Berücksichtigung der angesetzten Frequenz lässt sich der Phasenverschiebungswinkel δ daraus herleiten.

Der komplexe Schubmodul G^* gibt Auskunft darüber, mit welchem Kraftaufwand sich eine Substanz verformen lässt. Er kann auch als Widerstand einer Substanz gegen Verformungen

gedeutet werden. Dabei beschreibt der hohe Schubmodul eine schwere Verformbarkeit und der niedrige, eine leichte Verformbarkeit an. Der Widerstand lässt sich in einen elastischen Anteil G' (Speichermodul) und dem viskosen Anteil G'' (Verlustmodul) aufteilen, dessen Zusammenhang mit Hilfe des Vektordiagramms Abb. 3.5 erkennbar ist. Dargestellt werden Substanzen mit gleich langen komplexen Schubmoduln, jedoch unterschiedliche Ausprägungen der elastischen und viskosen Anteilen.

Der Rheometer Abb. 3.6 ist ein Prüfgerät mit einer runden starren Platte unter einer runden

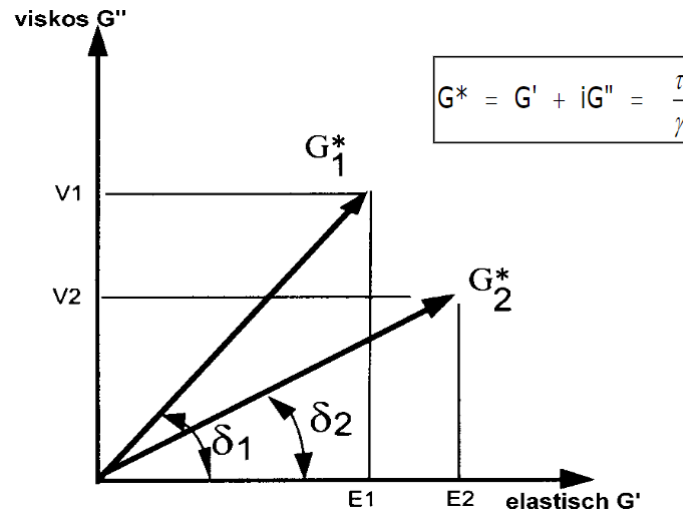


Abb. 3.5: Vektordiagramm, Litzka et al., 1998

oszillierenden Platte. Die Prüfschubsubstanz wird zwischen den Platten kraftschlüssig eingespannt. Durch die Drehung der oberen Platte mit einer definierten Spannung τ entsteht eine Deformation γ , welche am äußersten Umpfang der oberen Platte gemessen wird. (Prinzip des Controlled Stress-Rheometer). Mit dessen Kenntnis und der definierten Spannung τ lassen sich G^* und δ berechnen [25].

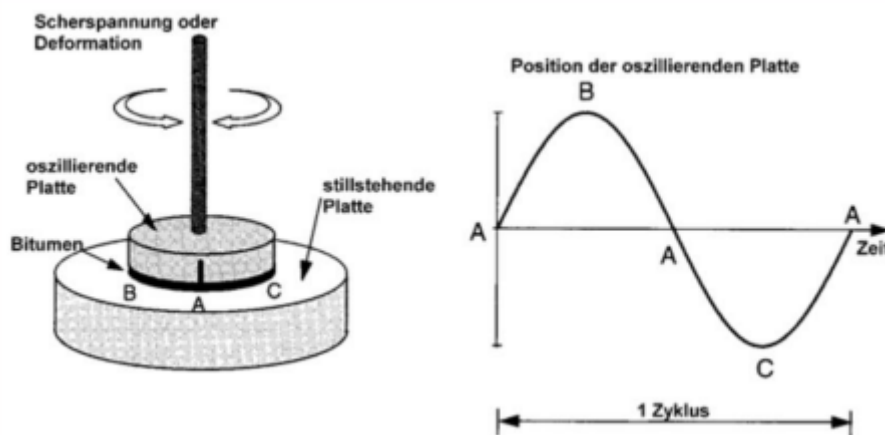


Abb. 3.6: Arbeitsweise DSR, Litzka et al. 1998

3.2.3.2 Biegebalken Rheometer(BBR)

Mit dem Biegebalken Rheometer wird das Tieftemperaturverhalten von Bitumen anhand der Steifigkeit S und dem sogenannten m -Wert, der für die Relaxationsfähigkeit und Kriechfähigkeit steht, beurteilt. Je geringer die Steifigkeit (verformbarer) und je höher der m -Wert (Abbaufähigkeit der Spannung), desto besser ist das Tieftemperaturverhalten von Bitumen und des daraus hergestellten Asphalts. Beim Abkühlen einer Asphaltschichte bauen sich infolge der verhinderten Kontraktion, Zugspannungen auf und diese erzeugen sogenannte Kälterisse, sobald sie die maximale Zugfestigkeit im Asphalt überschreiten. Dieser Prozess geht bei einer Asphaltgedauer von einigen Jahren vorstatten, daher werden für die BBR-Tests, RTFOT oder PAV-gealterte Bitumen verwendet. Je steifer der Asphalt ist, desto früher kommt es zu solchen Rissen

3.2.3.3 Rotations-Viskosimeter(RV)

Die Messung der dynamischen Bitumenviskosität (Zähigkeit) bei 135°C hat zum Ziel, die Zähigkeit des Bitumens nach oben hin zu limitieren, um die Pumpfähigkeit und Mischbarkeit zu garantieren. Der Energieaufwand beim Pumpen hochviskoser Bindemittel wäre sehr hoch und bei hoher Zähigkeit besteht die Gefahr, dass einzelne Gesteinskörner nicht vollständig umhüllt werden [25].

3.3 Asphaltprüfungen

Asphaltemischgüter können konventionell und gebrauchsverhaltensorientiert geprüft werden. Der Vorteil aus den konventionellen Prüfmethode ergibt sich aus der vergleichsweise einfachen Handhabung, jedoch können klimatische Bedingungen und verkehrliche Belastungen nicht realitätsnah erfasst werden. Weiters können dabei materialspezifische Kenngrößen nicht abgeleitet werden.

Bei gebrauchsverhaltensorientierten Prüfmethode sind materialspezifische Kenngrößen und realistische Prüfbedingungen möglich, jedoch zu Lasten teurer Prüfgeräte und einem erhöhten Prüfaufwand [44].

3.3.1 Konventionelle Prüfmethode

3.3.1.1 Spurbildungsprüfungen(WTT)

Die Verformungsanfälligkeit von Asphalt wird anhand einer Spurrinne geprüft, die durch wiederholte Übergänge eines belasteten Rades bei konstanter Temperatur erzeugt wird.

Es werden Platten mit normierten Abmessungen hergestellt, mit einem Walzsegmentverdichter (Abbildung 3.8) verdichtet und anschließend in das Prüfgerät (Abbildung 3.7) eingebaut. In der Prüfvorrichtung sind mehrere Räder eingebaut, welche zyklisch horizontal bei festgelegter Umgebungstemperatur und Belastung über die Platten fahren. Nach Abschluss der eingestellten Belastungszyklen werden die Spurrinntiefen proportional zur Plattendicke und die Spurbildungsrate analysiert [14].

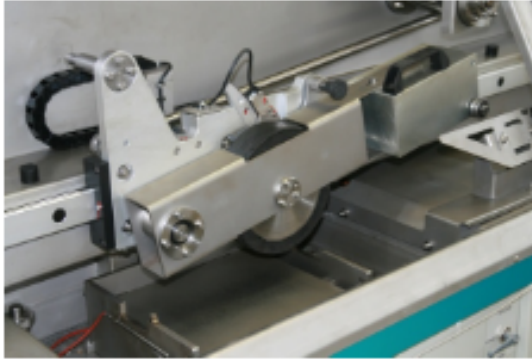


Abb. 3.7: kleines Spurbildungsgerät ,TU Wien



Abb. 3.8: Walzsegmentverdichter, TU Wien

3.3.2 Gebrauchverhaltensorientierte Prüfmethoden

3.3.2.1 Abkühlversuch(TSRST)

Beim Abkühlversuch wird das Abkühlen einer Straße simuliert und der Anstieg der sogenannten kryogenen Zugspannungen gemessen. Der genormte prismatische oder zylindrische Prüfkörper wird in der Prüfvorrichtung beidseitig eingespannt (Abbildung 3.9). Dabei bleibt die Länge des Prüfkörpers aufgrund der Einspannung konstant gleich. Aufgrund des verhinderten thermischen Schrumpfens wachsen die kryogenen Zugspannungen so lange an bis der Prüfkörper infolge dessen bricht. Die Bruchtemperatur zu diesem Augenblick wird gemessen und gibt Aufschluss über die Obergrenze bis zum Erreichen der ersten Kälterisse an [38][16].

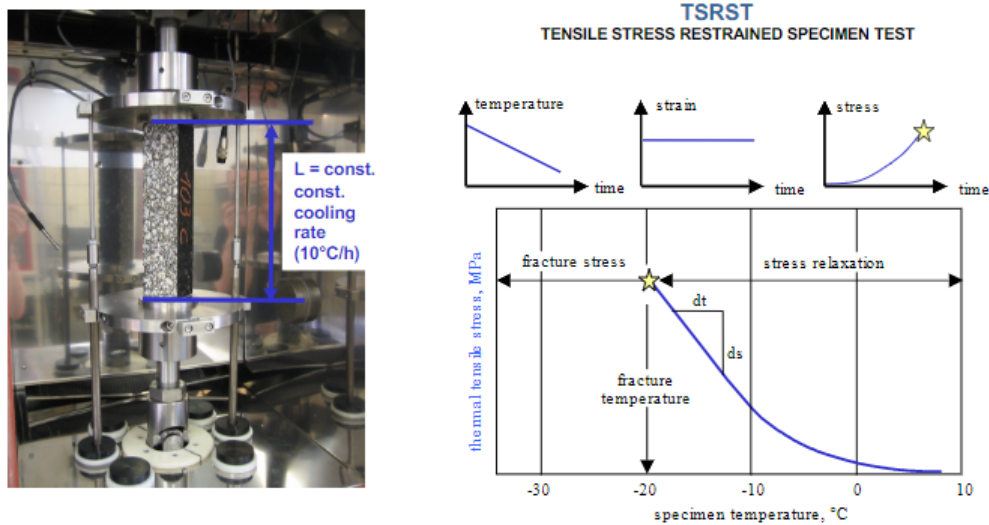


Abb. 3.9: Prüfeinrichtung (links) und grafische Darstellung der Zugspannung und Dehnung in Relation zur Umgebungstemperatur, TU Wien

3.3.2.2 Vier-Punkt-Biegebalken Versuch(4PBB)

Mit dem Vier-Punkt-Biegebalken Versuch wird einerseits die temperatur- und frequenzabhängige dynamische Steifigkeit E^* und andererseits der Widerstand gegen Ermüdung bestimmt. Ein prismatischer Probekörper wird einer periodischen Vierpunkt-Biegeprüfung mit freier Rotation und horizontaler Translation an allen Belastungs- und Reaktionspunkten unterzogen (Abbildung 3.11). An den Belastungspunkten werden Klemmen symmetrisch an die Probekörper angeordnet.

Die Biegung wird durch die Bewegung der mittigen Lastpunkte in vertikaler Richtung senkrecht zur Längsachse des Probekörpers erreicht. Die vertikale Lage der beiden Endpunkte bleibt erhalten. Die ausgeübte periodische Verschiebung erfolgt symmetrisch zum Nullpunkt, ist sinusförmig, und die Verschiebungsamplitude muss als Funktion der Zeit konstant sein. Während der Prüfung wird die für die Verformung des Probekörpers erforderliche Kraft als Funktion der Zeit sowie als die Phasenverzögerung zwischen dem Kraftsignal und dem Verschiebungssignal (Abb.3.10) gemessen. Daraus wird der Steifigkeitsmodul des geprüften Werkstoffes berechnet [15].

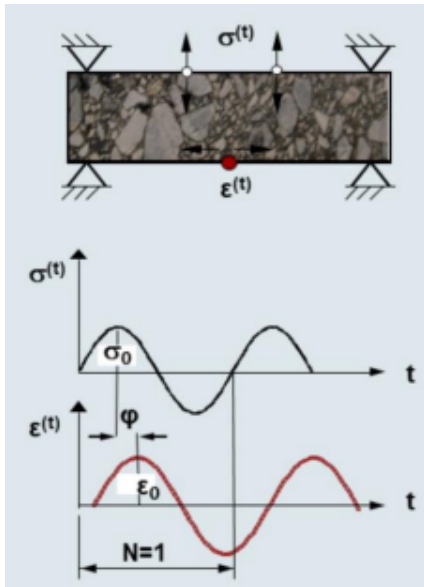


Abb. 3.10: Darstellung der Phasenverzögerung, TU Wien, 2020

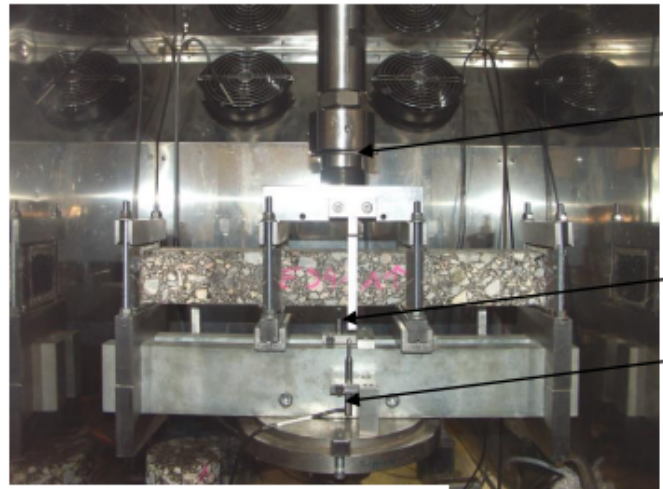


Abb. 3.11: Anordnung des Probekörpers in der Prüfmaschine, TU Wien

Kapitel 4

Materialeigenschaften und Prüfungsvorbereitung

4.1 Materialien

4.1.1 Gesteine

Das gewählte Gestein zur Herstellung des Asphaltbetons stammt aus dem LOJAGRABEN im südwestlichen Teil des Waldviertels, ca. zwei Kilometer nordöstlich des Ortes Persenbeug. Bei den Gesteinen handelt es sich um Kersantit und Granitporphyr, welches im Hartsteinwerk Loja abgebaut wird [28].

4.1.2 Füller

Als Füller wird Kalksteinmehl eingesetzt, da sich durch die darin befindlichen Kalzium-Ionen eine stabile Haftbrücke zwischen sauren Gesteinen und dem Bitumen bildet.

4.1.3 Asphalttyp

Es wird eine Deckschicht nach dem Typ AC 11 deck 70/100 A1 G1 gewählt. Die Deckschicht ist für Straßenabschnitte mit einer maximalen Lastklasse 4 beziehungsweise eines Bemessungsnormlastwechsels von 1,3 bis 4 Millionen vorgesehen. Bemessungsnormlastwechsel ist die erwartete Anzahl an Übergängen einer Normachse von 100 kN innerhalb einer Bemessungsperiode (Normlastwechsel NLW) [35].

Im Allgemeinen sind Deckschichten im direkten Kontakt mit der Reifenlast und bieten etwa bei Spurbildungsprüfungen eine repräsentative Veranschaulichung von Verformungen.

Der Asphaltbeton (AC) hat üblicherweise eine dichte Materialstruktur mit einem typischen Bindemittelgehalt von etwa 3,5 bis 4 M% [41]. Obwohl der Bindemittelgehalt im Vergleich zur Gesamtmasse einen geringen Anteil ausmacht, trägt er maßgeblich zum visko-elasto-plastischen Materialverhalten bei [36]. Daher ist zu erwarten, dass bereits eine geringfügige Modifizierung des Bindemittels eine Verhaltensänderung der gesamten Deckschicht hervorruft.

4.1.3.1 Sieblinie

Für den AC11 werden Gesteine mit einem Größtkorn von 11,2 mm verwendet. Die Anteile der Sieblinien sind gemäß der ÖNORM B3580-1 gewählt worden und sind mit den oberen und unteren Grenzen in der Abbildung 4.1 ersichtlich.

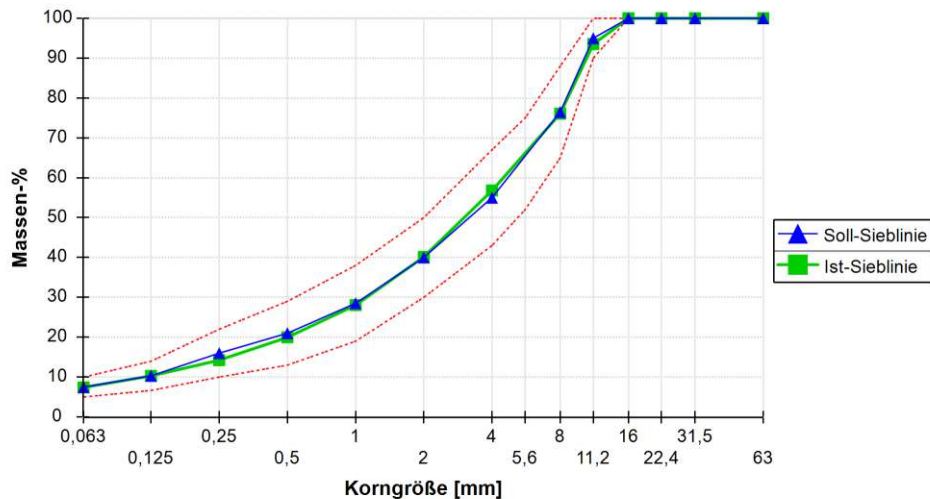


Abb. 4.1: Sieblinie AC 11, TU Wien, 2022

4.1.4 Straßenbaubitumen

Das Straßenbaubitumen entspricht der Sorte 70/100 mit Merkmalen gemäß ÖNORM EN 12591. Der zugewiesene Laborcode lautet B1158A.

4.1.5 Naturasphalt

Zunächst wird der Grund-Naturasphalt aus der Region Kermanshah, Iran verwendet. Sämtliche Versuche auf Bindemittlebene werden mit diesem Naturasphalt durchgeführt. Aufgrund der unzureichenden Menge des Grund-Naturasphalts werden für die anschließenden Asphaltprüfungen, Naturasphalt aus der Region Utah, USA hinzugefügt und durch Rühren homogenisiert. Es werden etwa 20% der Gesamtmasse des Naturasphalts durch Utah-Gilsonit ergänzt. Der Rest ist der Naturasphalt aus dem Iran.

Die Naturasphalte stammen zwar aus unterschiedlichen Regionen, jedoch ähneln sie sich in den Grundeigenschaften und der Beschaffenheit. Die zugesetzte Menge Gilsonit aus Utah macht bei insgesamt 168 kg fertig gemischten Asphaltmischgut 0,29% (489,1 g) der gemischten Gesamtmasse aus, verglichen zum iranischen Gilsonit mit 1,2% (2010,9g) der gemischten Gesamtmasse (Berechnung siehe Abbildung 8.1 im Anhang). Daher wird die Annahme getroffen werden, dass die Homogenisierung der beiden Additive aufgrund der geringen Menge Utah-Gilsonit und deren Ähnlichkeit hinsichtlich der Eigenschaften keine wesentlichen Veränderungen der Gebrauchseigenschaften im Asphaltmischguts hervorruft. In den Tabellen 4.1 und 4.2 sind die Materialkenngrößen der Naturasphalte aus Kermanshah und Utah zu entnehmen.

Tab. 4.1: Testresultate Eigenschaften Gilsonit, Research Institute of Petroleum(RIPI), 2018



Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

Test Results of Natural Bitumen (Gilsonite)

Ash Content , wt. %	4.8
Moisture Content, wt. %	1.1
Volatile Matter, wt. %	62.4
Fixed Carbon	31
Solubility In CS ₂ , wt. %	93
Solubility In TCE, wt. %	63
Normal Heptan Insol , wt. %	65
Specific Gravity, 25°C	1.140
Colour	Black
Softening Point, °C	211
Chemical Properties, wt. %	
Carbon	79
Hydrogen	8
Nitrogen	2.2
Sulphur	4.8
Oxygen	3.5

Tab. 4.2: Eigenschaften, American Gilsonite Company, 2019



Information Bulletin

Gilsonite® HMA Modifier Grade

Principal Applications

Modifier for asphalt for hot mix pavement applications, especially to reduce rutting and shoving at high temperatures.

Properties

Softening Point (ASTM E28-92)	160 – 185 °C 320 – 365°F
Ash (ASTM D-271-70 M)	≤1.0% 2 % Maximum
Moisture (AGC Method)	<0.5% 1.0% Maximum
Penetration (25°C, 100 gm, 5 sec.)	0
Flash Point (COC)	316°C; 600°F
Nitrogen	3%
Sulfur	0.3%
Specific Gravity	1.06
Color In Mass	Black

4.1.6 Gummimodifiziertes Bitumengranulat GRM

Das gummimodifizierte Bitumengranulat wird seitens der TU Wien zur Verfügung gestellt und hat Kenngrößen gemäß der Tabelle 4.3.

Tab. 4.3: Kenngrößen gummimodifizierter Bitumengranulat der Sorte 40/15 und 40/20, [42], 2010

Eigenschaft		Liefersorte		Prüfung nach
		GRM 40/15	GRM 40/20	
Spezifisches Gewicht	g/cm ³	1,00 bis 1,04	1,00 bis 1,04	DIN EN 12607-3
Gummimehlgehalt / davon angelöst	M.-%	40/15	40/20	keine
Bitumengehalt	M.-%	50	50	keine
Füllergehalt	M.-%	10	10	keine
Granulatgröße	mm	0 bis 20	0 bis 20	DIN EN 933-1 bzw. 52098

4.2 Mischungsverhältnis

Auf Basis vorangegangener Studien [5] hat man bereits einige Mischverhältnisse erprobt. Mit 30% Gilsonit und 15% gummimodifizierten Bitumengranulat hat das Mischgut unter Berücksichtigung der Kompatibilität und der rheologischen Eigenschaften in hohen und mittleren Temperaturen das optimalste Mischverhältnis. Eine solche Mischung wird mit einem PG 76 -16 eingestuft, wohingegen das Ausgangsbitumen 70/100 mit PG 58 -22 eingestuft wird. Ausgehend von dieser Einstufung erhöht sich zwar die obere Temperaturgrenze des Bindemittels um zwei Stufen, doch büßt es in den Tieftemperaturen eine Stufe ein. Gilsonit erhöht die Steifigkeit des Bindemittels, was jedoch mit einer Reduzierung der Relaxationsfähigkeit(m-Wert) einhergeht. In trockenen und wärmeren Klimazonen hat das einen positiven Effekt auf die Langlebigkeit der Straße, aber bei tieferen Temperaturen ist das kontraproduktiv. [6]

Der PG soll demnach in beide Richtungen gleichmäßig steigen, um den klimatischen Anforderungen in Österreich zu genügen. Daher wird in dieser Forschungsarbeit als Mittelweg ein Bindemittel mit einem Mischverhältnis von 20% Gilsonit und 15% gummimodifizierten Bitumengranulat erprobt.

4.3 Herstellung des modifizierten Bindemittel-Mischguts

Für sämtliche Prüfungen mit modifiziertem Bindemittel wird das Mischgut nach der folgenden Beschreibung hergestellt. Die Beigabe der Modifikatoren in das Mischgut erfolgt nach festgelegten Reihenfolgen, Temperaturen und Rührgeschwindigkeiten.

Zunächst wird das Ausgangsbitumen 70/100 (Laborcode B1158A) in einem Trockenschrank bei 175° für eine Stunde geschmolzen. Kurz vor Abschluss der Stunde wird ein zylindrischer Füllbehälter mit 16cm Durchmesser und 17cm Höhe ebenfalls miterhitzt. Währenddessen werden die Geräte zur Herstellung vorbereitet. Das Sandbad wird auf 190° aufgeheizt und der Flügelrührer in Position gebracht. Nachdem das 70/100 Bitumen sich verflüssigt hat wird es in den vorgeheizten Behälter umgefüllt, der Behälter in das Sandbad gestellt und anfangs bei 700 Umdrehungen pro Minute und graduell steigend auf 1000 U/min für 20 Minuten gerührt. Das vorbereitete gummimodifizierte Bitumengranulat wird dann innerhalb von 10 Minuten hinzugefügt. Dabei ist

zu Achten, dass die Konsistenz des Bindemittels zähflüssiger wird und allenfalls die Umdrehungsgeschwindigkeit kurzzeitig verringert werden muss. Anschließend wird das Gilsonit innerhalb von 10 Minuten dem Bindemittel-Mischgut beigemischt. Direkt nach der Beigabe von Gilsonit bilden sich auf der Oberfläche kleine Luftbläschen und die Umdrehungsgeschwindigkeit wird auf 2000 U/min erhöht. Diese Geschwindigkeit wird für die Restzeit beibehalten. Insgesamt dauert die Herstellung vom ersten Rühren bis zur Fertigstellung eineinhalb Stunden. Eine Durchmischung über zwei Stunden ist nicht zu empfehlen, da das Gemisch sonst depolymerisiert (siehe Abschnitt 2.3.4). Laut [42] muss das Mischgut innerhalb von 15 Minuten weiterverarbeitet werden, da es nicht lagerstabil ist und somit eine Tendenz zur Entmischung besteht.

Um eine direkte Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, wird das unmodifizierte Bindemittel für die Untersuchungen exakt nach dem selben Verfahren angerührt.

4.4 Herstellung des Asphaltmischguts

Für die nachfolgenden Asphaltprüfungen wird das modifizierte Bindemittel zwei Stunden vor Beimischung zum Asphalt nach 4.3 hergestellt und für eine weitere halbe Stunde zu den Gesteinskomponenten (Abbildung 4.2) im Trockenschrank bei 182° temperiert.

Die Herstellung der Probekörper erfolgt auf Grundlage der Normen EN 12697-27[40] und EN 12697-35:2004 + A1[7].

Mit Hilfe des Walzsegmentverdichters (Abbildung 4.6) werden quaderförmige Probekörper (Platten) aus Asphalt hergestellt, welche entweder direkt für anschließende Prüfungen verwendet (Spurbildungsversuch), oder aus denen Probekörper geschnitten werden (TSRSR und Steifigkeitsnachweis). Dafür wird ein gemischtes Asphaltmischgut in eine rechteckigen Probenform gefüllt und mithilfe einer Stahlglatzwalze verdichtet. Die Walze führt dabei Übergänge mit konstanter Geschwindigkeit aus, gemäß dem festgelegten Prüfplan. In den Abbildungen 4.3 und 4.4 sind die dazu notwendigen einzelnen Hilfsmittel dargestellt.

Zunächst werden die vortemperierten Gesteinskomponenten in die Mischtrommel des Zwangsmischers eingefüllt. Dann wird das Bindemittel abgewogen und sukzessive den Gesteinen beigemischt. Dabei wird 50 bis 100 Gramm mehr Bindemittel eingefüllt als nötig, da es sich am Rand der Mischtrommel und des Eimers festsetzt. (Abbildung 4.5) Nach Abschluss des Mischvorganges wird mit einer Spachtel, etwaige Anhaftungen entfernt und in der Stahlwanne abgewogen. Die befüllte Stahlwanne wird nun von der Waage auf den Hubwagen gestellt und zum Walzsegmentverdichter befördert.

Nun kann das heiße Mischgut mit der Schaufel und Spachtel in die Form des Walzsegmentverdichters (Abbildung 4.6) eingefüllt werden und anschließend ist mit der Spachtel die Oberfläche einzuebnen. Zum Abschluss verdichtet der Walzsegmentverdichter das Asphaltmischgut durch mehrmaliges Überrollen und nach dem Ausformen ist die Platte hergestellt (Abbildung 4.7) [37].

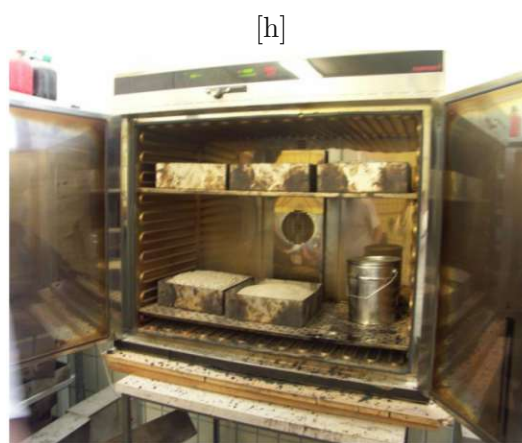


Abb. 4.2: Komponenten im Wärmeschrank

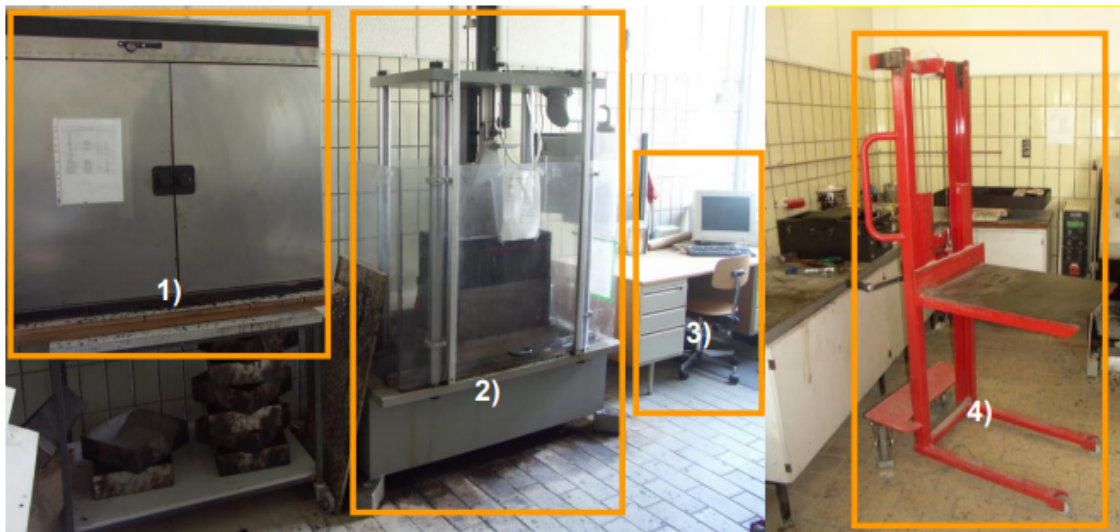


Abb. 4.3: Prüfgeräte und Hilfsmittel

1. Wärmekammer mit Umluft
2. Walzsegmentverdichter
3. Schreibtisch mit Computer
4. Hubwagen

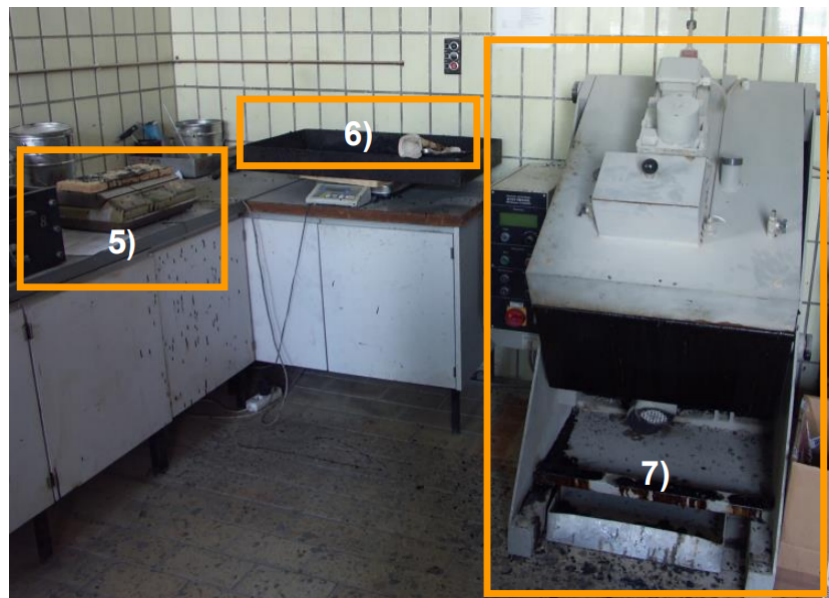


Abb. 4.4: Hilfsmittel

5. Waage
6. Stahlwanne auf Waage
7. Zwangsmischer



Abb. 4.5: Einwaage des Bindemittels und Beigabe zur Mischtrommel



Abb. 4.6: Walzsegmentverdichter



Abb. 4.7: Vorbereitete Platte für die Spurbildungsversuche

4.5 Rohdichte der Asphaltprobekörper

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt auf Grundlage der EN 12697-5:2018 nach dem volumetrischen Verfahren.

Die Herstellungsschritte aus Abschnitt 4.4 sind bis zum Einfüllen in die Stahlwanne (Abbildung 4.4) auszuführen. Mindestens 250g des hergestellten Asphaltmischguts wird aus dem Zwangsmischer (Abbildung 4.4) auf zwei, mit Silikonfolie beschichteten, Platten ausgebreitet und abgewogen (Abbildung 4.8).



Abb. 4.8: Einwaage des Mischguts, TU Wien



Abb. 4.9: Wasserbad, TU Wien

Das Wasserbad (Abbildung 4.9) wird eingeschaltet und für mindestens eine Stunde auf 25°C temperiert. Das Mischgut wird nach Entnahme mehrere Stunden auf Raumtemperatur abgekühlt und mit den Hilfsmitteln aus Abbildung 4.10 werden die umhüllten Gesteinskomponenten mittels Spachtel bzw. händisch in Einzelkörner getrennt. Der Schritt ist wichtig, um ein gleichmäßiges Umhüllen der Körner mit Wasser bzw. Lösungsmittel zu ermöglichen, damit es nicht zu einem Wiederverkleben kommt.

Im nächsten Schritt werden die zerteilten Körner in zuvor gewogene Pyknometer, mit exakt passendem Aufsatz (Schliff), wie in Abbildung 4.11 ersichtlich, eingefüllt. Diese gefüllten Pyknometer werden abermals gewogen und mit entionisiertem, abgekochten Wasser bis zur Verjüngungsstelle eingefüllt. Ein Tropfen Spülmittel wird beigegeben, um die Oberflächenspannung herabzusetzen. Das abgekochte Wasser muss auf Raumtemperatur abgekühlt sein, da ansonsten die Bitumenanteile in der Probe schmelzen und verkleben würden. Mit einem Rührstab werden die Probestücke nun kräftig umgerührt, um eine vollständige Umhüllung der Körner zu gewährleisten. Nun werden die befüllten Pyknometer ohne Aufsatz in ein Vakuumregelgerät gegeben, um die eingeschlossene Luft durch Anwendung eines Vakuums herauszutreiben. Der Druck im Vakuumbehälter wird innerhalb von 15 Min. in 3 Zyklen (700mbar – 200mbar – 30mbar Enddruck) abgesenkt.

Nach Beendigung des Programms werden die Pyknometer herausgenommen und der Schliff aufgesetzt. Es wird vorsichtig Wasser bis zur Messmarke angefüllt. Die so befüllten Pyknometer werden in das Wasserbad gesetzt und für 30 Minuten temperiert. Nach Ablauf der Temperierzeit wird die Außenseite abgetrocknet, bei Bedarf wieder bis zur Messmarke angefüllt und abschließend abgewogen.



Abb. 4.10: Hilfsmittel zum Entnehmen und Zerteilen der Probe, TU Wien

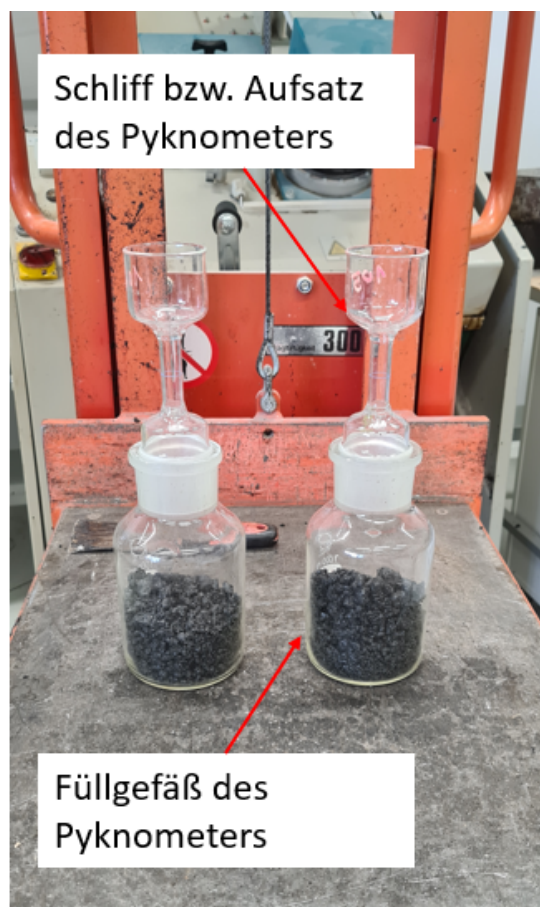


Abb. 4.11: Pyknometer

4.6 Raumdichte und Abmessungen der Asphaltprobekörper

Die Bestimmung der Raumdichte erfolgt nach DIN EN 12697-6:2020 und die Verfahren A-C kommen in Anwendung. Das Verfahren A beschreibt die korrekte Abwaage der trockenen Probe, das Verfahren B der feuchten, oberflächlich gesättigten Probe und zuletzt das Verfahren C der Probe unter Wasser. Es ist für alle Verfahren notwendig ein, auf 25°C vortemperiertes, Wasserbad (Abbildung 4.9) vorzubereiten. Die fertigen Probekörper aus der Plattenherstellung (Abschnitt 4.3) werden für 30 Minuten in das Wasserbad gelegt. Die effizienteste Reihenfolge wäre mit dem Verfahren C zu beginnen, dann mit dem Verfahren B fortzusetzen und nach 24h mit dem Verfahren A abzuschließen.

Der Probekörper wird gemäß Verfahren C tauchgewogen. Danach wird die Probe aus dem Wasser genommen, mit einem Ledertuch so abgetupft, dass keine Tropfen abperlen, und wieder gewogen. Im Verfahren A wird zuletzt die getrocknete Probe gewogen.[21]

Die Bestimmung der Höhe, Breite und Länge erfolgt nach EN 12697-29:2020. Über den Umfang jedes Probekörpers werden gleichmäßig verteilt vier Messungen durchgeführt. Diese müssen in einem Abstand von etwa 10 mm zum Rand des Probekörpers ausgeführt werden. Der Durchschnittswert der vier Messungen wird als Höhe/Breite/Länge des Probekörpers auf 0,1 mm angegeben.[20]

4.7 Probekörperbezeichnungen

In der Tabelle 4.4 sind die Laborcodes zu den zugehörigen Bindemittelprüfungen ersichtlich.

Tab. 4.4: Prüfprogramm für die Bindemittel und die zugehörigen Laborcodes

DA Noei Projektnummer: 22407	Betrachtungsebene	Bitumenebene			
	Abschnitte	1.Grunddurchgang		Bitumenprüfung	
	Ausgangsbitumen	70/100	modifi.	70/100	modifi.
Prüfmethode					
RuK		B1158A	B1253A		
Pen		B1158A	B1253A		
Pen nach RTFOT				B1158B	B1253B
RuK nach RTFOT				B1158B	B1253B
DSR				B1158A	B1253A
DSR nach RTFOT				B1158B	B1253B
DSR nach PAV				B1158C	B1253C
BBR nach PAV				B1158C	B1253C
RV					B1253A

- B1253A
 - B steht für Bitumen
 - 1253 steht für den Laborcode
 - A steht für ungealtert
- B1253B
 - B steht für eine Kurzzeitalterung im Labor mit einem rollierenden Dünnfilm Ofen Test (RTFOT)
- B1253C
 - C steht für eine Langzeitalterung im Labor mit einem Druckalterungskessel (PAV)

In der Tabelle 4.5 sind die Laborcodes zu den zugehörigen Asphaltprüfungen ersichtlich.

Tab. 4.5: Prüfprogramm für die Asphaltprobekörper und die zugehörigen Laborcodes

DA Noei Projektnummer: 22407	Betrachtungsebene	Asphaltebene	
	Abschnitte	Asphaltprüfungen	
	Ausgangsbitumen	70/100	modifi.
Prüfmethode			
Rohdichte		2,524	2,542
TSRST		K823A	K824D
		K823B	K824G
		K823C	K824H
STIFF		E1298A	E1292A
		E1298B	E1292B
		E1298C	E1292C
Spurbildung		T942	T939
		T943	T940
TSRST nach Lang.alt.		K830A	K831A
		K830E	K831B
		K830C	K831C
STIFF nach Langz.alt.		E1313A	E1315A
		E1313B	E1315B
		E1313C	E1315C

- TSRST
 - steht für den Abkühlversuch nach EN 12697-46
- STIFF
 - steht für den Steifigkeitsversuch nach EN 12697-26
- Langz.alt.
 - steht für eine Simulation der Langzeitalterung bei +80°C in einem belüfteten Ofen für 120 Stunden. Dieses Alterungsverfahren entspricht der Europäischen Technischen Spezifikation TS 12697-52.
- Die Buchstaben nach den Laborcodes stehen für die Probekörper welche aus einer Platte hergestellt worden sind.

Kapitel 5

Prüfprogramm

5.1 Bindemittelprüfungen

Im Grunddurchgang wird geprüft, ob das angenommene Mischverhältnis unter Prüfbedingungen plausible Ergebnisse liefern kann. Es wird für das Referenzbitumen B1158A und dem modifizierten Bindemittel B1253A der Erweichungspunkt und die Eindringtiefe ermittelt.

Nach dem erfolgreichem Grunddurchgang werden die konventionellen Prüfungen mit kurzzeitgealterten Proben B1158B und B1253B wiederholt.

Abschließend werden die Proben im ungealterten Zustand mit dem DSR¹ und dem RV² (B1158A und B1253A), im kurzzeitgealterten Zustand mit dem DSR (B1158B) und (B1253B) und im langzeitgealterten Zustand mit dem DSR und dem BBR³ (B1158C und B1253C) geprüft.

5.1.1 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Vor Beginn der Prüfung wird die Prüfeinrichtung vorbereitet. Die Prüfeinrichtung besteht aus einem Behälter für Flüssigkeiten, zweier Ringe mit Kupfer-Zink-Legierungen als Gießform, zweier Stahlkugeln mit genormten Maßen und Massen, einem Gestell mit Ringhalteplatten und Zentriervorrichtung, einer Gießplatte und einem geeigneten Trennmateriale.

Da für das modifizierte Bindemittel bisher keine vorausgehenden Untersuchungen gemacht wurden, wird als Annahme, die aus der Norm EN 12591 bekannte Erweichungspunkttemperatur des Basisbitumens 70/100 gewählt.

$$ERK + 100^{\circ} \approx 150^{\circ}C \quad (5.1)$$

ERK bedeutet Erweichungspunkt nach Ring und Kugel.

Mit der Gleichung 5.1 wird die maximale Temperatur zum Vorheizen der Gießformen und des Bindemittels ermittelt und der Trockenschrank damit eingestellt. Weiters soll je nach ERK-Temperatur eine geeignete Flüssigkeit für das Bad zu gewählt werden. Bei ERK-Temperaturen bis 80°C wird ein Flüssigkeitsbad mit destilliertem Wasser, bei einer Anfangstemperatur von 5°C, verwendet. Bei Temperaturen darüber wird Glycerol, bei einer Anfangstemperatur von 30°C, herangezogen. Die Wahl fällt im Grunddurchgang auf destilliertes Wasser. Die Gießplatte wird vorbereitet worauf, zum Verhindern der Anhaftung des Bitumens mit der Platte, eine Silikonfolie und anschließend die vortemperierten Ringe aufgelegt werden. Das verflüssigte Bindemittel wird so in die Gießformen eingefüllt, dass sich ein leichter Überschuss ergibt. Das Bindemittel wird eine halbe Stunde bei Raumtemperatur stehen gelassen und danach die Oberfläche glatt und bündig, mit einem erhitzten Spachtel oder ähnlichem, abgeschnitten.

¹Abschnitt 3.2.3.1

²Abschnitt 3.2.3.3

³Abschnitt 3.2.3.2

Die Untersuchungsproben werden mitsamt dem Behälter mit dem Wasserbad, den genormten Stahlkugeln und dem Gestell mit Ringhalteplatte auf 5°C abgekühlt. Nach Erreichen der Temperatur wird das Gestell positioniert und die Ringe auf die Ringhalteplatte eingesetzt. Die Zentriervorrichtung wird eingestellt und die Stahlkugeln mit einer Pinzette auf das Bindemittel aufgesetzt. Das Gestell wird nun in das Wasserbad eingetaucht. Wird ein magnetischer Rührer verwendet, ist der magnetische Rührstab auch in das Bad mit einzulegen. Abschließend wird der Behälter mit dem Wasserbad in die Prüfvorrichtung (Abbildung 5.1) eingesetzt und das Prüfgerät wird gestartet. Mit einem gleichmäßigen Temperaturanstieg von 5°C/min beginnen die Bindemittel unter der Last der Stahlkugeln zu erweichen. Dabei soll sich allmählich um die Kugeln herum ein Bindemittel-Kissen bilden. Die Kugel mit dem umgebenden Bindemittel sinken ein und bei Unterbrechung der Lichtschranke, am Boden des Behälters, wird die Prüfung beendet. Die angezeigten Temperaturen in diesem Augenblick werden notiert.[18]



Abb. 5.1: Prüfeinrichtung des Erweichungspunktes nach Ring und Kugel

5.1.2 Penetrationstest

Die Prüfeinrichtung des Penetrationstestes besteht aus einer streng genormten Nadel, einem Penetrometer, ein Gerät, bei dem sich der Nadelhalter senkrecht ohne messbare Reibung bewegt und mit dem die Nadelpenetration auf 0,1 mm bestimmbar ist und einem Probengefäß aus Metall oder Glas, das in ein temperiertes Bad, aus destilliertem Wasser, gestellt wird.

Das zu untersuchende Bindemittel wird mit der maximalen Temperatur aus der Gleichung 5.1 erwärmt und in das Probengefäß eingefüllt. Das Probengefäß wird nach einstündiger Temperierung bei 25°C in Position gebracht. Eine Nadel wird in den Nadelhalter aufgesteckt und langsam bis zur Oberfläche der Bindemittel abgesenkt. Im Vorfeld ist zu beachten, dass die Prüfung mindestens zweimal zu wiederholen ist und daher soll der Einstichort der Nadel mindestens 1cm, vom Rand und von den nachfolgenden Einstichorten, Abstand haben. Damit wird ein unbeeinflusstes Ergebnis erzielt. Die 100g schwere Nadel wird für 5 Sekunden fallen gelassen und die Eindringtiefe danach abgemessen. Diesen Vorgang wiederholt man weitere zweimal. [17]

5.1.3 Tubentest nach Zenke

Der Tubentest nach Zenke ist zur Überprüfung der Lagerstabilität eines Bindemittels. Hierbei wird eine offene Aluminiumtube mit der zu untersuchenden Probe befüllt. Nach dem Einfüllen wird das offene Tubenende mit geringem Abstand über der Oberfläche, mit einer Zange, sorgfältig luftdicht verschlossen. Das Tubenende wird platt gedrückt und mehrmals verfalzt. Die Tube wird dann für 72 Stunden bei 180°C senkrecht in den Trockenschrank gegeben. Nach der Ruhezeit wird die Tube stehend bei Raumtemperatur abgekühlt. Nach der Abkühlzeit wird die Tube sauber von der Aluminiumhülse entfernt und gedrittelt. Der mittlere Teil ist unbrauchbar und wird verworfen. Das obere und untere Tubendrittel wird zur weiteren Untersuchung herangezogen. Beispielsweise wäre ein Vergleich des Bindemittels im oberen und unteren Drittel mit dem Erweichungspunkt Ring und Kugel möglich [22]. Der Vergleich der ERK-Werte hat eine starke Differenz zwischen den Tubenenden ergeben und unterstreichen damit die Lagerinstabilität.

5.1.4 Dynamisches Scherrheometer

Das zu messende Bitumen wird im flüssigen Zustand gerührt und darauf geachtet, dass vorhandene Luftblasen im Bindemittel entweichen. Danach wird das Bitumen in Formen aus Silikongummi gegossen (ca. 2-3g), die je nach Plattengröße (8mm und 25mm) sich in ihrer Größe unterscheiden. Die Probe wird bei Raumtemperatur abgekühlt und der Rheometer auf die Messtemperatur eingestellt. Nach der Abkühlung wird das Probepfättchen mit dem Daumen aus der Silikonform auf die untere Platte des DSR gedrückt. Mit einem dafür vorgesehenen Spatel wird das überstehende Bitumen am Plattenrand abgeschnitten. Anschließend wird die obere und untere Platte auf den 1mm Messabstand bei der Messung (82°C bis 40°C) und 2mm bei der Messung (40°C bis 4°C) zusammengefahren. Dadurch entsteht ein "Bitumenbauch". Der Sensor wird auf die erwähnten Temperaturen reguliert und nach gleichmäßiger Durchtemperierung kann die Messung beginnen.[25]

Die folgenden Prüfbedingungen sind für die Messungen eingehalten worden:

- Temperatur:
 - ungealtertes Bitumen: $T_{max} = 82^{\circ}\text{C}$ bis 40°C und $T_{max} = 40^{\circ}\text{C}$ bis 4°C
 - RTFOT-gealtertes Bitumen: $T_{max} = 82^{\circ}\text{C}$ bis 40°C und $T_{max} = 40^{\circ}\text{C}$ bis 4°C
 - PAV-gealtertes Bitumen: $T_{max} = 82^{\circ}\text{C}$ bis 40°C und $T_{max} = 40^{\circ}\text{C}$ bis 4°C
- Frequenz:
 - 0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 1,592 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz

5.1.5 Rotationsviskosimeter

Das zu messende Bitumen wird im flüssigen Zustand gerührt und darauf geachtet, dass vorhandene Luftblasen im Bindemittel entweichen. Für die Untersuchungen nach SHRP-Schema reicht die Untersuchung des ungealterten Bindemittels.

Der Versuchsaufbau besteht aus einer mit etwa 12g⁴ bitumengefüllten Aluminiumhülse, der in einen Temperierbehälter gesteckt wird.(Abb. 5.3) Eine Spindel wird an einer Spindelwelle befestigt und über eine Höhenverstellungsschraube in das auf 135°C vor temperierte Bitumen getaucht. Die Spindel wird mit einer Drehzahl von 20 Umdrehungen pro Minute in Bewegung gesetzt und das Drehmoment, welches für die Aufrechterhaltung der Drehbewegung, gemessen wird, wird anschließend für die Auswertung der Viskosität herangezogen.(Abb.5.2)[25]

⁴Bitumenmenge variiert je nach Spindelart

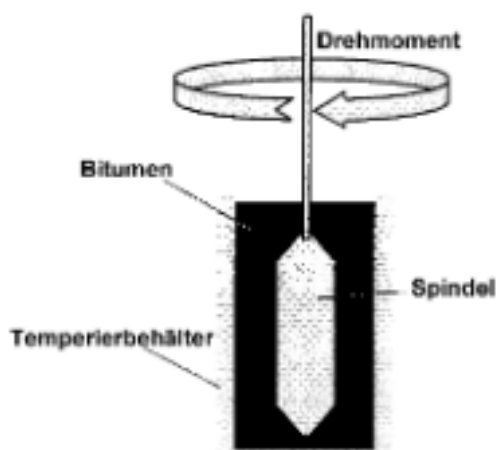


Abb. 5.2: Prinzipskizze eines Rotations-Viskosimeters, Litzka et al. 1998

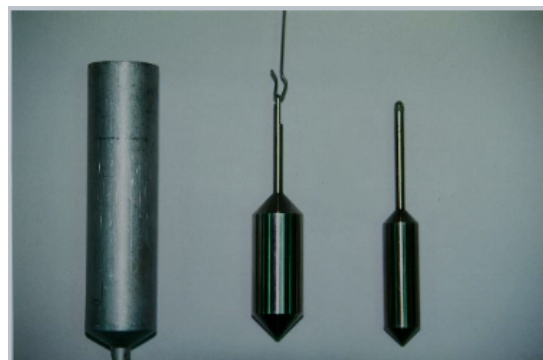


Abb. 5.3: Aluminiumhülse und Spindel, Litzka et al. 1998

5.1.6 Biegebalkenrheometer

Für das Prüfverfahren sind Bitumenbalken und die dafür benötigten Aluminiumformen, ein temperiertes Ethanolbecken und ein Belastungsstempel mit einer Last, welche von einem Kraft- und Wegaufnehmer gemessen wird, notwendig. (Abb. 5.13) Als erstes müssen die Formen, in die das Bitumen gegossen wird, zusammgebaut werden. Die Formen werden im Inneren mit Trennmittel aus Silikon bestrichen und danach werden Streifen aus Kunststoff auf jede Seite der Aluminiumformen gegeben. Nach Aufstellung der Formen in der geforderten Weise, werden sie mit O-Ringe fixiert.

Es wird abhängig von der Beschaffenheit des Bindemittels etwa 15g des PAV-gealterten Bitumens in die so präparierten Aluminiumformen gegossen. Es wird darauf geachtet, dass das Gießen in einem Zug von einer Seite zur anderen erfolgt. Die geformten Balken werden für etwa eine Stunde auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Daraufhin wird überschüssiges Bitumen auf der Oberfläche, glatt mit einem heißen Spachtel abgezogen. Das Ethanolbecken wird bereits zwei Stunden vor der Versuchsdurchführung auf die gewünschte Prüftemperatur (-18°C , -30°C) eingekühlt. Die Alugussformen werden ausgeformt. Dabei werden die Bitumenbalken kurzzeitig in Eiswasser gehalten und die Aluförmchen und O-Ringe entfernt. Durch das Eiswasser lassen sich auch die Folien leichter lösen. Nach dem Ausformen werden die Balken vorsichtig für 60 Minuten in das Ethanolbecken gelegt.

Nach der Temperierung wird der erste Probekörper auf die Auflager gesetzt und eine Vorbelastung von 30 mN wird aufgebracht. Dann wird der Balken mit einer einsekündigen Belastung von 980 mN belastet und wieder entlastet. Danach hat der Balken für 20 Sekunden Zeit in seine Ausgangsform zurückzukehren. Diese Phase dient zur Sicherstellung eines satten Kontaktes des Balkens mit den Auflagern.

Bei der eigentlichen Messung wird die Last von 980mN für 240 Sekunden aufrechterhalten. Als Reaktion auf diese Last beginnt sich der Balken durchzubiegen. Aus der Auflast und der Durchbiegung lässt sich anschließend die Steifigkeit berechnen. Wird die errechnete Steifigkeit in einem doppel-logarithmischen Graphen über die Belastungsdauer in Sekunden aufgetragen, gibt die Steigung der Tangente an der Kurve bei 60 Sekunden den m-Wert an. (Abb. 5.5) [25]

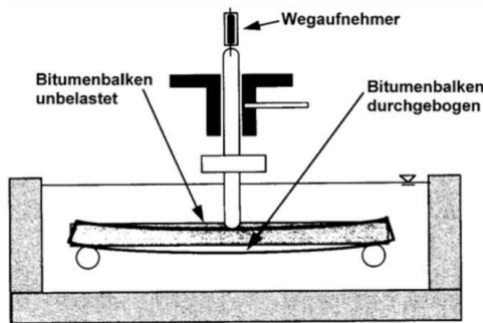


Abb. 5.4: Messprinzip BBR, Litzka et al. 1998

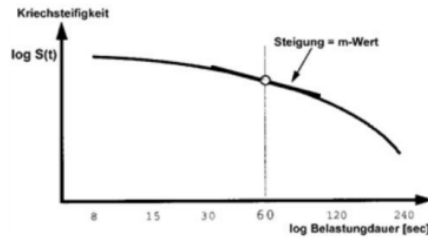
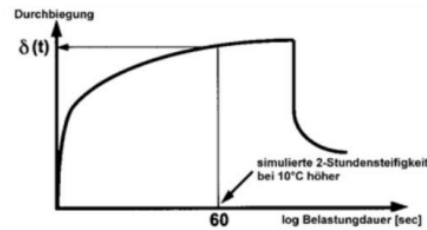


Abb. 5.5: logarithmische Graphen, Litzka et al. 1998

5.1.7 Simulation der Kurzzeitalterung mit RTFOT

Die Prüfeinrichtung besteht aus einer geschlossenen Wärmekammer mit einem darin befindlichen kreisrunden Drehgestell (Abbildung 5.6). Die Sichtebene des Drehgestells ist parallel zum Türfenster angeordnet und dreht sich in waagerechter Ebene. Es werden Glasbehälter, mit etwa 35g bitumenhaltigem Bindemittel, in die vorgesehenen Plätze des Gestells gesetzt. Ungenutzte Plätze werden mit leeren Behältern besetzt, um eine Unwucht zu verhindern. Die Heizelemente der Wärmekammer sind unter dem Boden angeordnet und heizen die Umgebungsluft auf die Prüftemperatur von 163°C auf. Eine Luftdüse, welche auf die Öffnungen der Glasbehälter gerichtet ist, bläst heiße Luft in jeden Behälter. Das Bindemittel in den Gefäßen, verflüssigt sich und durch die Zentrifugalkräfte bildet sich ein dünner Film am Mantel des Glasbehälters. Die heiße Luft trifft somit auf eine größere Oberfläche und eine Kurzzeitalterung geht vonstatten.[13]

Die erste Simulation musste wiederholt werden, da das Mischgut am Vortag hergestellt wurde und das gummimodifizierte Bitumengranulat sich in Zwischenzeit abgesetzt hatte. Die Tendenz zur Entmischung war zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt und daraufhin wurde ein Tubentest nach Zencke durchgeführt.

Die zweite Simulation wurde am selben Tag durchgeführt, an dem auch das Mischgut hergestellt wurde. Zusätzlich wurde das Mischgut kontinuierlich gerührt, um eine Entmischung bis zum Einfüllen in die RTFOT Gläser zu verhindern.



Abb. 5.6: RTFOT Prüfeinrichtung Fa.Infracore

5.1.8 Simulation der Langzeitalterung mit PAV

Mittels vorgeheizten Druckbehälter wird die Alterung eines Bindemittels durch Anwendung von hohem Druck und hoher Temperatur beschleunigt. Es werden mehrere Blechschalen mit je 50g RTFOT kurzgealterten Bindemittel eingewogen. Durch leichtes händisches Schwenken und Kippen wird das zuvor verflüssigte Bindemittel über den gesamten Schalenboden ausgebreitet und anschließend in ein Schalengestell gesetzt (Abbildung 5.7). Das Gestell einschließlich Schalen wird rasch in den Druckbehälter gestellt und anschließend mittels Bolzen und Klemmen fest geschlossen. (Abbildung 5.8) Nach Verschließen wird so lange Druckluft über ein Druckregelventil in den Kessel eingelassen, bis sich ein Druck von etwa 21 bar gebildet hat. Nun wird wieder auf die eingestellte Alterungstemperatur (100°C) aufgeheizt. Nach Ablauf der Alterungsdauer von 20 Stunden wird der Innendruck im PAV mit Hilfe des Entlüftungsventils langsam abgelassen. Der Druckbehälter wird geöffnet und das Schalengestell wird zusammen mit den Schalen vorsichtig entnommen und für weitere 30 Minuten in den Trockenschrank bei 163°C gelegt, um die restliche Luft im Bitumen entweichen zu lassen [19][25].

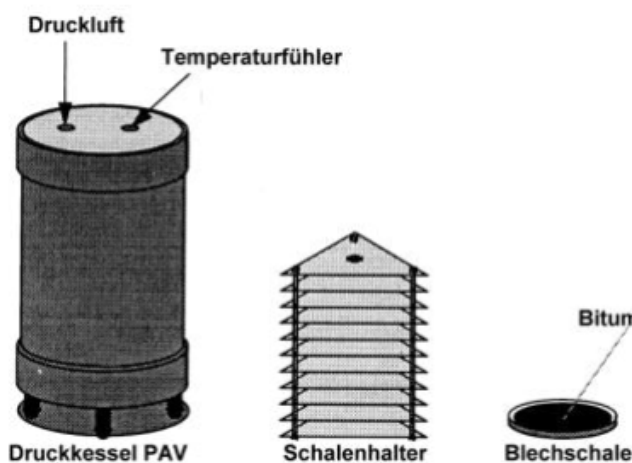


Abb. 5.7: Schematische Darstellung eines PAV-Kessels, Litzka & Strobl, 1998



Abb. 5.8: Prüfvorrichtung PAV
Fa. Prentex

5.2 Asphaltprüfungen

5.2.1 Spurbildungsversuch

Der Spurbildungsversuch ist auf Grundlage des Verfahrens B (kleinem Rad und an der Luft) nach DIN EN 12697-22 durchzuführen. Für den Versuch werden Platten gemäß Abschnitt 4.4 hergestellt. Die hergestellten Platten werden gemäß Abschnitt 4.6 gewogen und abgemessen. Die dokumentierten Plattendimensionen sind den Seiten 74 bis 77 im Anhang zu entnehmen. Die Rollräder der Spurbildungsmaschine (Abbildung 5.9) haben einen Außendurchmesser von 203mm und rollen mit einer Auflast von 710N [29]. Zunächst werden die Proben in der Spurbildungsmaschine mit der Klemmvorrichtung befestigt und für 4 h bei 60°C temperiert. Nach erfolgreicher Temperierung beginnen die Räder mit einer konstanten Geschwindigkeit über die Platten zu rollen. Die Norm DIN EN 12697-22 gibt vor, dass die Prüfung maximal nach 20000 Überrollungen beziehungsweise 10000 Belastungszyklen oder sobald eine Spurrinnentiefe von 20mm erreicht wird zu beenden ist [14].



Abb. 5.9: Spurbildungsmaschine
Fa. Infracore

5.2.2 TSRST Abkühlversuch

Der Abkühlversuch ist auf Grundlage der EN 12697-46:2020 durchzuführen. Für den Versuch werden Platten gemäß Abschnitt 4.4 hergestellt. Es werden prismatische Probekörper aus den Platten herausgeschnitten. Die hergestellten Platten werden gemäß Abschnitt 4.6 gewogen und abgemessen. Die dokumentierten Plattendimensionen sind den Seiten 79 bis 84 im Anhang zu entnehmen und die Probekörperbezeichnungen können mit der Tabelle im Abschnitt 4.7 abgeglichen werden.

Die Probekörper werden nach äußeren Mängeln untersucht und mindestens drei ausgewählt. Diese sollen in den nachfolgenden Schritten geklebt und eingespannt werden und sind daher beiseite zu stellen.

Zunächst werden 2 cm von den oberen und unteren Rändern parallele Linien eingezeichnet, welche als Grenzlinie des Klebekeils dienen. Zum Verkleben der Probekörper werden sogenannte Adapter und eine Einspannbank benötigt. Diese werden davor von Kleberesten und anderen Verunreinigungen mit Toluol und Aceton gereinigt. Der Probekörper wird auf die Einspannbank gelegt und zwischen die Adapter am Kopf- und Fußende eingespannt (Abbildung 5.10).

Ein für die Prüfung geeigneter zweikomponenten Klebstoff wird angerührt und innerhalb der 2 cm Markierung schichtweise aufgetragen. Zum Glattstreichen dient ein Spatel und diesen nutzt man abschließend zum Formen des Keils. Dabei wird der Spatel einerseits an der Markierungslinie und andererseits an der Kante des Adapter angesetzt und in einem Zug abgestrichen.

Die so hergestellten Probekörper werden für 24 h bei Raumtemperatur getrocknet und anschließend für weitere 24h in der Kühlkammer bei 10°C eingekühlt [16].

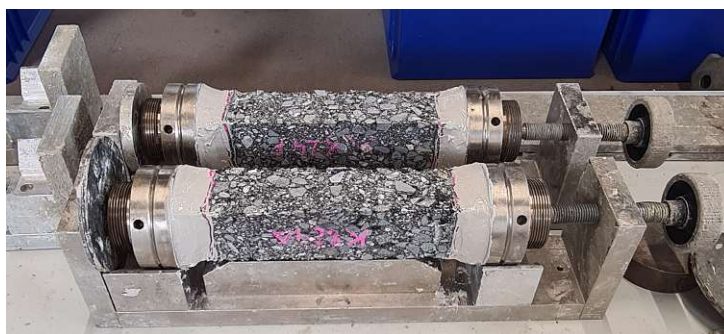


Abb. 5.10: Verklebte Probekörper auf Einspannbett

5.2.2.1 Durchführung der Prüfung

Der konditionierte Probekörper wird mit dem Adapter voran auf den unteren Lastkolben der Prüfmaschine aufgelegt und mit dem oberen Lastkolben vorgespannt. Dabei werden die oberen und unteren Adapter mit zwei Gewindemuttern von Hand festgezogen (Abbildung 5.11). Nun wird die Messvorrichtung an den eingespannten Probekörper angeschraubt und die Wegaufnehmer auf eine Genauigkeit von $\pm 100\mu\text{m}$ eingestellt [38].

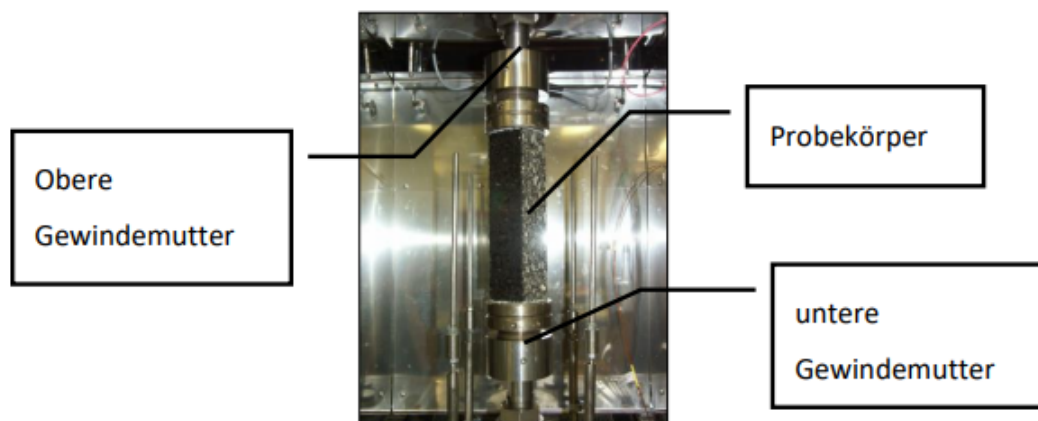


Abb. 5.11: obere und untere Einspannmutter, TU Wien, 2019

5.2.3 Steifigkeitsversuch

Der Steifigkeitsversuch ist auf Grundlage der EN 12697-26 (2018) durchzuführen. Für den Versuch werden Platten gemäß Abschnitt 4.4 hergestellt. Es werden prismatische Probekörper aus den Platten herausgeschnitten. Die hergestellten Platten werden gemäß Abschnitt 4.6 gewogen und abgemessen. Die dokumentierten Plattendimensionen sind den Seiten 86 bis 89 im Anhang zu entnehmen und die Probekörperbezeichnungen können mit der Tabelle im Abschnitt 4.7 abgeglichen werden.

5.2.3.1 Verkleben der Probekörper

Zunächst werden die vorgesehenen Klemmen von Kleberückständen und anderen Verunreinigungen gereinigt. Eine Metallschablone mit Rillen in denen die Klemmen angeordnet werden sollen, wird vorbereitet. Die Klemmen werden angeordnet und der Probekörper wird eingesetzt. Ein für die Prüfung geeigneter zweikomponenten Klebstoff wird angerührt und die Klemmeninnenseiten werden großzügig damit bestrichen. Nachdem sämtliche Klemmen angeklebt sind, wird auf der Unterseite des Probekörpers ein schmaler Aluminiumstreifen angebracht, damit der Wegaufnehmer nicht fälschlicherweise in einen Hohlraum des Prüfmediums abrutscht. (Abbildung 5.14)

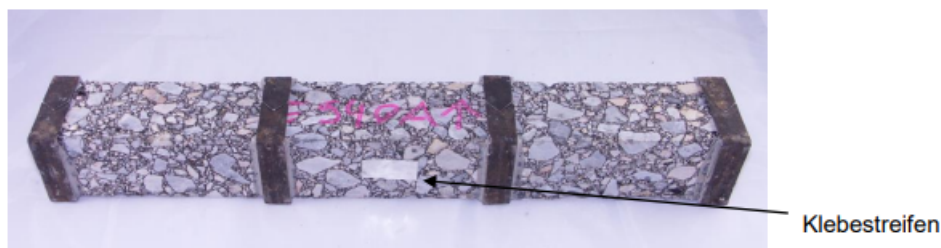


Abb. 5.12: Klemmen- und Streifenanordnung am Prüfkörper

5.2.3.2 Einbau und Ablauf der Versuchsdurchführung

Vor dem Einbau des Prüfkörpers werden vier Rollen und zwei Distanzen gelegt, um eine spätere Durchbiegung zu verhindern. Der Probekörper wird, mit weiteren Rollen auf den Klemmen, zwischen den Gestängen aufgelegt. Der Justierkörper wird aufgelegt, mit Schrauben fixiert und anschließend die Wegaufnehmer auf eine Genauigkeit von $\pm 100\mu\text{m}$ eingestellt. Abschließend wird der Versuch gestartet

Das Prüfgerät prüft mit einer Amplitude von $35\mu\text{m}/\text{m}$, welche den Probekörper in der Regel nicht beschädigt.

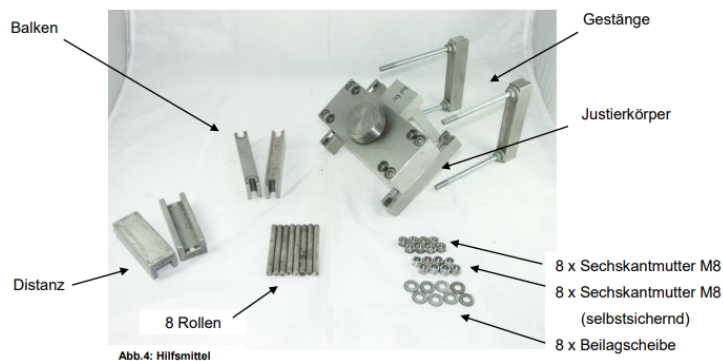


Abb. 5.13: Hilfsmittel für den 4PB-Versuch

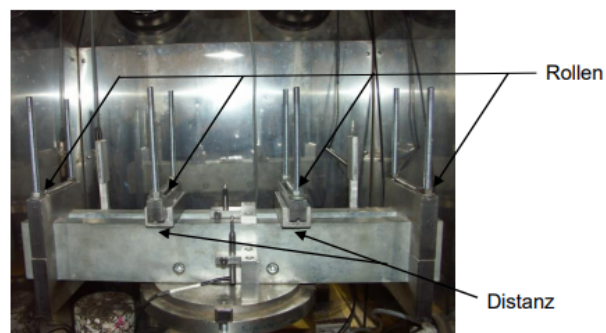


Abb. 5.14: Vor dem Einbau des Prüfkörpers

5.2.4 Langzeitalterungssimulation des Asphaltmischguts

Im Zuge dieser Arbeit werden zusätzlich Probekörper hergestellt die nach der CEN/TS 12697-52:2017 langzeit-gealtert werden. Diese Probekörper werden gemäß 4.4 vorbereitet und in einem Trockenschrank für 120 h bei 85°C konditioniert. Nach Ablauf der Zeit wird das Mischgut auf Raumtemperatur abgekühlt und für den weiteren Gebrauch beim Abkühlversuch beziehungsweise Steifigkeitsnachweis analog nach den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 bearbeitet.

Kapitel 6

Ergebnisse und Interpretation

6.1 Bitumenprüfungen

6.1.1 Konventionelle Bindemittelprüfung

6.1.1.1 Penetrationstest

In der Tabelle 6.1 sind die Messergebnisse des modifizierten(B1253) und des unmodifizierten Bindemittels(B1158) dargestellt. Die Abbildung 6.1 stellt diese grafisch dar. Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

unmodifiziertes Bindemittel B1158:

Das Straßenbaubitumen wurde nach dem Schema im Abschnitt 4.4 vorbereitet. Das Ergebnis des Nadelpenetrationstest im ungealterten Zustand entspricht dem in der Norm B 3610 geforderten Soll-Werten für 70/100 Straßenbaubitumen. Im gealterten Zustand sind die Werte um etwa 35% geringer als ungealtert und es bleiben über 65% der ursprünglichen Penetrationtiefe übrig.

modifiziertes Bindemittel B1253:

Das Ergebnis des Nadelpenetrationstest im ungealterten Zustand entspricht dem in der Norm B 3610 geforderten Soll-Werten für 35/50 Straßenbaubitumen. Im gealterten Zustand verbleibt 80% des ursprünglichen PEN-Wertes und eine Einordnung in die gleiche Bitumenklasse laut B3610 wäre möglich.

Tab. 6.1: Nadelpenetration der untersuchten Bindemittel

Bindemittel	Alterungsstufe		
	original A	RTFOT B	
	PEN	PEN	ΔAB
	[1/10 mm]	[1/10 mm]	%
B1158	83	54	-34,9
B1253	45	36	-20

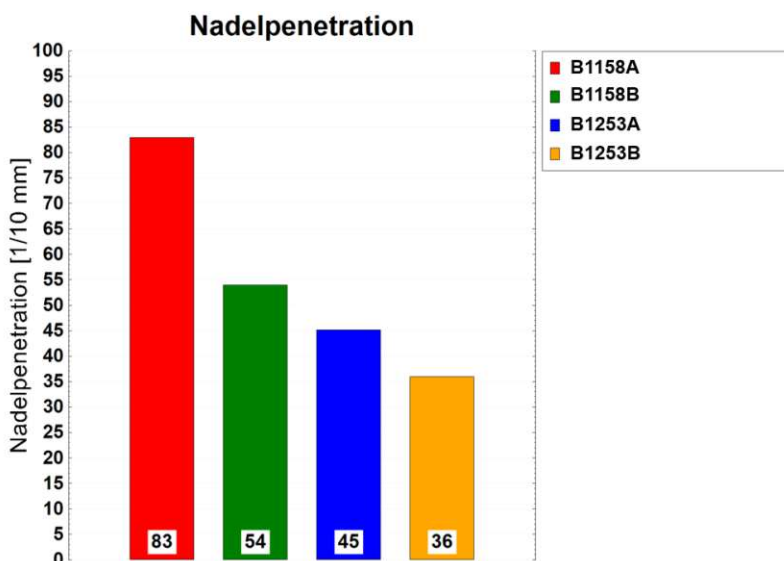


Abb. 6.1: Nadelpenetration der untersuchten Bindemittel in ungealterten und RTFOT-gealterten Zustand

6.1.1.2 Erweichungspunkt Ring und Kugel

In der Tabelle 6.2 sind die Messergebnisse des modifizierten (B1253) und des unmodifizierten Bindemittels (B1158) dargestellt. Die Abbildung 6.1 stellt diese grafisch dar. Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

unmodifiziertes Bindemittel B1158:

Das Straßenbaubitumen wurde nach dem Schema im Abschnitt 4.4 vorbereitet. Das Ergebnis des Erweichungspunktes Ring Kugel im ungealterten Zustand entspricht dem in der Norm B 3610 geforderten Soll-Werten für 70/100 Straßenbaubitumen. Im gealterten Zustand steigt der ERK-Wert um 5,8 °C und bleibt unter dem, mit maximal 9°C geforderten, Anstieg der selben Bitumenklasse.

modifiziertes Bindemittel B1253:

Das Ergebnis des Erweichungspunktes Ring Kugel im ungealterten Zustand ist vergleichbar mit dem in der Norm B 3610 geforderten Soll-Werten für 35/50 Straßenbaubitumen und die obere Grenze von 50/70 Straßenbaubitumen. Im gealterten Zustand steigt der ERK-Wert um 5 °C und bleibt unter dem, mit maximal 8°C (9°C für 50/70) geforderten, Anstieg der selben Bitumenklasse.

Tab. 6.2: Erweichungspunkt mit Ring und Kugel der untersuchten Bindemittel

Bindemittel	Alterungsstufe		
	original A	RTFOT B	
	ERK [°C]	ERK °C	ΔAB -
B1158	45,8	51,6	-5,8
B1253	54	59	-5

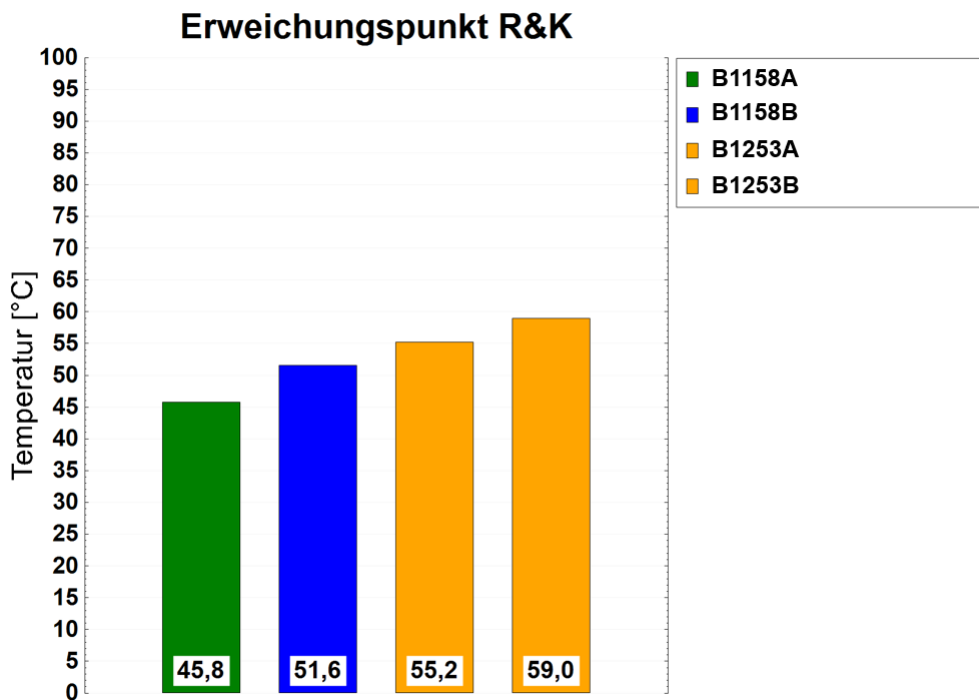


Abb. 6.2: Erweichungspunkt mit Ring und Kugel in ungealterten und RTFOT-gealterten Zustand

6.1.1.3 Zusammenfassung und Interpretation

Im Penetrationstest ist ersichtlich, dass die Modifikation mit Gilsonit und gummi-modifiziertem Gummigranulat eine Verhärtung des Materials hervorruft. Auf Grundlage der PEN-Werte im ungealterten Zustand lässt sich eine Verhärtung des Bindemittels um mehr als die Hälfte beobachten. Bei der Prüfung Erweichungspunktes Ring & Kugel lässt sich eine ähnliche Tendenz beobachten, bei der das modifizierte Bitumen im ungealterten Zustand um etwa 10°C höher erweicht und somit auf ein härteres Bindemittel deutet. Gleichzeitig erhöht sich die Gebrauchsspanne (Δ ERK/Fraaß, [25]) um denselben Wert.

Die Alterungssimulation mit RTFOT bewirkt generell eine Verhärtung des Bindemittels, durch sinken der PEN-Werte und steigen der ERK-Werte [25]. Diese Veränderung ist bei diesen Untersuchungen auch zu beobachten, jedoch ist das modifizierte Bindemittel nicht so stark gealtert wie das unmodifizierte, wie die Differenz-Beträge in den Tabellen 6.1 und 6.2 veranschaulichen.

6.1.2 Gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfungen

Die gebrauchungsverhaltensorientierten Prüfungen werden gemäß dem SHRP-System bewertet und interpretiert.

6.1.2.1 Dynamischer Scherrheometer (DSR)

Die Ergebnisse aus allen Temperatur- und Frequenzbereichen der DSR-Prüfungen wird auf die für uns relevante Frequenz von 1,59 Hz umgerechnet und die Diagramme in den Abbildungen stellen die, für das SHRP-System anwendbare, Messwerte dar.

unmodifiziertes Bindemittel B1158:

Die Abbildungen 8.2 und 8.3, so genannte Isochronen, zeigen den komplexen Schubmodul G^* und Phasenverschiebungswinkel gemessen bei 1,59 Hz. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Temperatur der komplexe Schubmodul sinkt und der Phasenverschiebungswinkel auf ein Maximum von 90° ansteigt. Der Widerstand gegen bleibende Verformung respektive die Scherfestigkeit nimmt bei Temperaturanstieg somit um fünf Zehnerpotenzen ab und das elastische Materialverhalten geht in ein viskoses über. Es ist erkennbar, dass sich ein hoher Phasenverschiebungswinkel von $>80^\circ$ bereits ab 40°C einstellt, welches sich negativ auf den Verformungswiderstand auswirkt. Die Alterungssimulation mittels RTFOT bewirkt ein elastischeres Bindemittel, durch Sinken des Phasenwinkels und einen höheren Schubmodul. Aus den Abbildungen 8.6, 8.7, 8.8 und 8.9 geht auch hervor, dass $G^*/\sin\delta$ und $G^*\cdot\sin\delta$ mit zunehmender Temperatur abnehmen.

In der Abbildung 8.10 wird das Black-Diagramm dargestellt, welches die ungealterte und RTFOT-gealterte Kurve in Abhängigkeit des Schubmoduls und des Phasenverschiebungswinkels zeigt.

unmodifiziertes Bindemittel B1253:

Die Abbildungen 8.4 und 8.5 zeigen den komplexen Schubmodul G^* und Phasenverschiebungswinkel gemessen bei 1,59 Hz. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Temperatur der komplexe Schubmodul in allen Alterungsstufen gleichermaßen (parallel) und stetig sinkt. Der Phasenwinkel steigt steiler im tieferen Temperaturbereich ($4-22^\circ\text{C}$), flacht etwas im mittleren Temperaturbereich ($22^\circ-58^\circ$) mit Ausnahme $52^\circ-58^\circ\text{C}$ und ein weiteres Mal im hohen Temperaturbereich $64^\circ-82^\circ\text{C}$ ab. Die ungealterte Probe hat einen maximalen Phasenwinkel von etwa 81° . Die flache Zunahme des Phasenwinkel im Temperaturanstieg begünstigt ein positives Spurbildungsverhalten. Die Verläufe der Alterungsstufen des Bindemittels sind weitestgehend in allen Temperaturbereichen parallel, womit eine zuverlässige Abschätzbarkeit über die Lebensdauer der Asphaltdeckschicht möglich ist. Aus den Abbildungen 8.6, 8.7, 8.8 und 8.9 geht abermals hervor, dass $G^*/\sin\delta$ und $G^*\cdot\sin\delta$ mit zunehmender Temperatur abnehmen. Besonders steil kann man bei den Temperaturbereichen $46-40^\circ\text{C}$ und $10-4^\circ\text{C}$ beobachten.

In der Abbildung 8.10 wird das Black-Diagramm dargestellt, welches die ungealterte RTFOT-gealterte und PAV-gealterte Kurve in Abhängigkeit des Schubmoduls und des Phasenverschiebungswinkels zeigt.

6.1.2.2 Biegebalken Rheometer(BBR)

Die Ergebnisse der BBR-Messungen sind die Verläufe der Biegezugsteifigkeiten S und m -Werte in Abhängigkeit der Temperatur nach 60 sekundiger Belastung durch den Laststempel. Wie in der Abbildung 6.3 unschwer erkennbar ist, ist dass die Modifikation einen geringfügigen Einfluss auf den Verlauf der Steifigkeit und der Relaxationsfähigkeit des Bindemittels hat. Somit ist hinsichtlich Tieftemperaturverhalten keine merkliche Verschlechterung durch die Modifikation nachweisbar. Die eingezeichneten horizontalen Linien sind die SHRP-Grenzwerte auf die im Abschnitt 6.1.2.4 näher eingegangen wird.

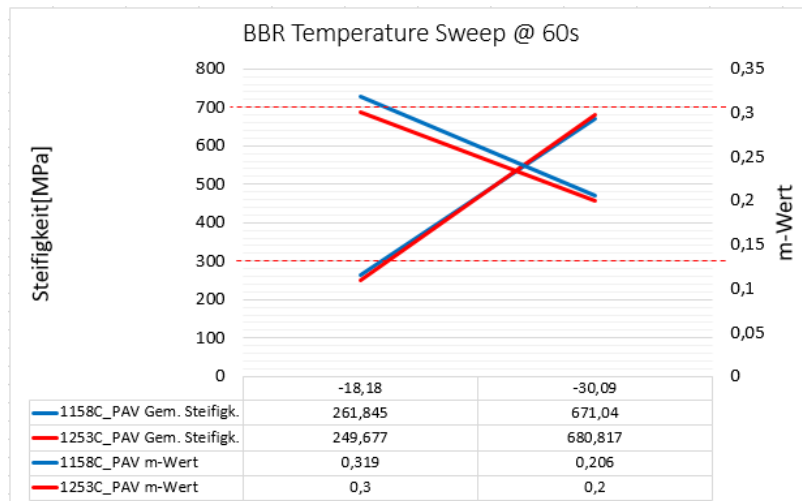


Abb. 6.3: BBR, Temperatursweep (S,m-Wert)

6.1.2.3 Rotations-Viskosimeter(RV)

Der Rotations-Viskosimeter wird für das ungealterte Bindemittel B1253 im Temperaturbereich 120-180°C gemessen. Zum Vergleich wird in der Abbildung 6.4 eine vergleichbare Kurve eines ungealterten B1158 dargestellt. Das Diagramm zeigt eine deutliche Zunahme der dynamischen Viskosität (5,5 fache bei 135°C) des modifizierten verglichen zum unbehandelten Bindemittels bei Temperaturanstieg, dennoch wird der SHRP-Grenzwert von $\nu = 3000$ [mPa.s] bei 135°C nicht überschritten. Die B1253 Probe ist somit hinsichtlich Pumpfähigkeit und Verarbeitbarkeit geeignet.

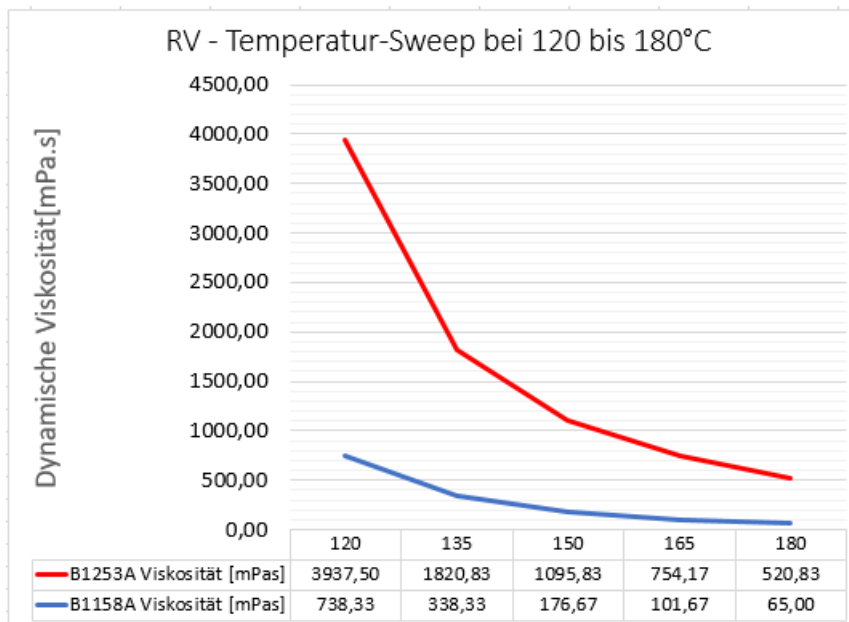


Abb. 6.4: RV-Viskositätsmessung für B1253

6.1.2.4 Performance Grade(PG)

Anhand der vorliegenden Messergebnisse werden alle die untersuchten in das bestehende Performance Grade System (6.1.2.4) eingeordnet.

Eine Zuordnung zur PG-Einteilung erfolgt durch das Vergleichen der Messergebnisse mit den einzuhaltenden Grenzwerten die in der folgendermaßen aufgelistet sind. Es gibt Grenzwerte, welche die Wärmeeigenschaften("High PG") definieren und andererseits Werte die die Kälteeigenschaften("Low PG") definieren. Die Klammerbegriffe im Folgenden sind die zu verwendenden Prüfmethoden.

- **Verarbeitbarkeit**
 - ungealterte Bindemittel(RV): ≤ 3000 [mPa.s] bei 135°C
- **Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen**
 - Die Mindesttemperatur dieser Messergebnisse definiert das "High PG"
 - ungealterte Bindemittel(DSR): $|G^*|/\sin(\delta) \geq 1,0kPa$
 - RTFOT-gealtertes Bindemittel(DSR): $|G^*|/\sin(\delta) \geq 2,2kPa$
- **Ermüdungsverhalten**
 - RTFOT-gealtertes und PAV-gealtertes Bindemittel(DSR): $|G^*| * \sin(\delta) \leq 5.000kPa$
- **Verformungsverhalten bei tiefen Temperaturen**
 - Die Höchsttemperatur dieser Messergebnisse zuzüglich 10K definiert das "Low PG"
 - RTFOT-gealtertes und PAV-gealtertes Bindemittel(BBR): S bei 60 Sekunden $\leq 300MPa$
 - RTFOT-gealtertes und PAV-gealtertes Bindemittel(BBR): m bei 60 Sekunden $\geq 0,3$
 - RTFOT-gealtertes und PAV-gealtertes Bindemittel(DTT): $\epsilon \geq 1\%$

Es ist anzumerken, dass in diesen Untersuchungen keine Direct Tension Tests(DTT) durchgeführt werden.

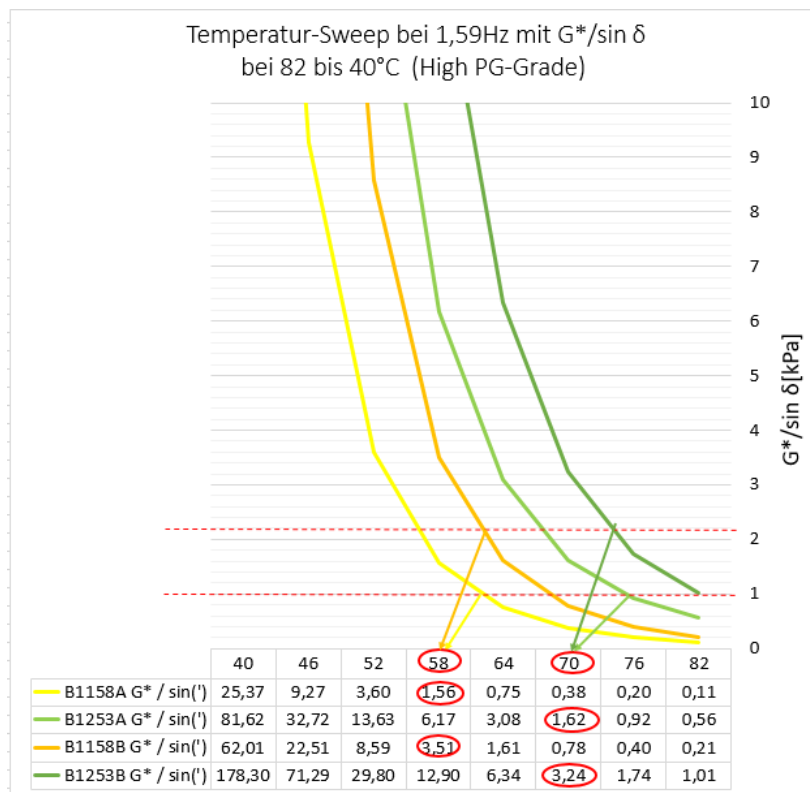


Abb. 6.5: Ermittlung des "High PG"

Die Abbildung 6.5 zeigt exemplarisch die Einteilung des Bindemittels für den High PG vor. Für das ungealterte Bindemittel wird in der Datentabelle die erste Temperatur gesucht bei dem der Schubmodul $\geq 1,0 \text{ kPa}$ ist. Bei der Probe B1158 ist es bei 58°C mit 1,56 kPa und bei B1253 ist es bei 70°C mit 1,62 kPa. Diese Werte werden zunächst mit der nächst höheren Temperaturstufe interpoliert um exakte Werte zu erhalten. Analog dazu wird das Schema für die RTFOT-gealterte Proben wiederholt mit dem Grenzwert $\geq 2,2 \text{ kPa}$. Die kleinste so ermittelte Temperatur gibt den exakten High PG vor.

So ist eine Einteilung gemäß Tabelle 3.1 möglich. In der Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse sämtlicher Bindemittel-Prüfungen mit der Berechnung des PG ersichtlich. Die exakten PG-Werten werden der nächst niedrigeren Stufe zugeordnet

Tab. 6.3: PG Einteilung der untersuchten Bindemittel

Probe	Wärmeigenschaften "High PG"		Kälteeigenschaften "Low PG"		Ermüdungsverhalten Alterungsstufe C $G^*/\sin \delta(T) \leq 5.000 \text{ kPa}$ DSR[C°]	Verarbeitbarkeit Alterungsstufe A $\eta \leq 3000 \text{ mPa.s}$ bei 135°C RV[mPa.s]	PG exakt	PG eingeteilt
	Alterungsstufe A $G^*/\sin \delta(T) \geq 1,0 \text{ kPa}$ DSR[C°]	Alterungsstufe A $G^*/\sin \delta(T) \geq 2,2 \text{ kPa}$ DSR[C°]	Alterungsstufe C $S(T) \leq 300 \text{ MPa}$ BBR[C°]	Alterungsstufe C $m(T) \geq 0,3 \text{ BBR[C°]}$				
B1158	61,4	62,1	-19,2	-20	19	338,33	61,4 -29,2	58-28
B1253	74,5	74,2	-19,4	-18	20,2	1820,83	74,2 -28,0	70-28

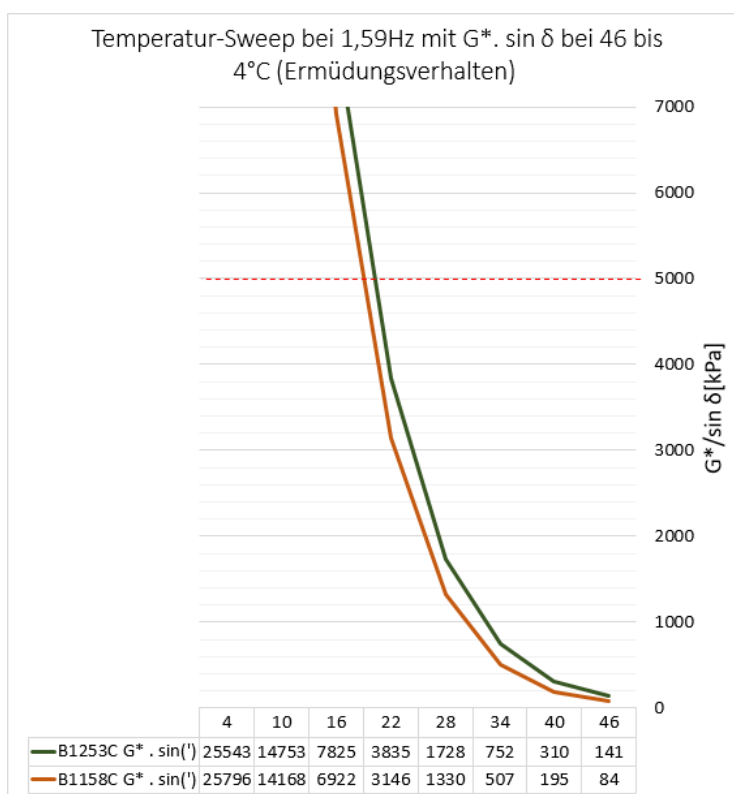


Abb. 6.6: Die PAV-gealterten DSR Versuche zum Vergleich des Ermüdungsverhaltens

6.1.2.5 Zusammenfassung und Interpretation

Die Ergebnisse aus den Bindemittelprüfungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

Standfestigkeit:

Die Modifikation hat einen entscheidenden Einfluss auf das Bindemittel hinsichtlich der Standfestigkeit. Die Penetrationstests und der Erweichungspunkt Ring und Kugel haben gezeigt, dass das Bitumen sich verhärtet hat. Je härter das Bitumen, desto höher liegt unter anderem das Niveau des komplexen Schubmoduls G^* [25]. Das hat wiederum Einfluss darauf, wie sehr der Phasenverschiebungswinkel in höheren Temperaturbereichen steigt. Die Abbildung 6.5 zeigt, dass der steilere Verlauf der Kurven, bei der Probe B1253 mit Betrachtung der Grenzlinie, die Schnittpunkte nach rechts verschiebt. Der Schnittpunkt drückt die Temperatur aus bei der das Bindemittel noch ausreichend standfest ist. Daraus folgt ein höherer Widerstand gegen Verformung und das wirkt sich mindernd auf die Bildung von Spurrillen aus. Selbiges kann bei Betrachtung der Abbildungen 8.2 und 8.4 mithilfe des Phasenverschiebungswinkel abgeleitet werden. Die Probe B1158B hat bereits bei etwa 50°C den gleichen δ wie die B1253B bei 82°C und zeigt somit früher viskoses Verhalten.

Ermüdungsverhalten:

Hinsichtlich Ermüdungsverhalten gibt die DSR-Untersuchung der PAV-gealterten Proben in der Abbildung 6.6 eine gute Darstellung. Wenn die Werte unterhalb der eingezeichneten Linie beim Höchstwert von 5.000 kPa und im Temperaturbereichs von (4°-40°C) sind, ist das Bindemittel duktil und elastisch genug, um nicht bei mittleren Temperaturen vorschnell zu ermüden. Bei

Betrachtung der Kurven ist erkennbar, dass die Linie des modifizierten Bindemittels B1253C etwas höher liegt und somit die Grenzlinie weiter rechts schneidet. Somit verschlechtert die Beigabe der Additive das Ermüdungsverhalten ein wenig. Generell werden Straßenbaubitumen mit niedrigerer Penetration anfälliger gegenüber Ermüdungsrisse. [25] In Anbetracht dessen, dass sich der PEN-Wert im ungealterten beinahe halbiert hat, hatte das einen geringfügigen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten.

Alterungsempfindlichkeit:

Hinsichtlich Alterungsempfindlichkeit zeigen die Abbildungen 8.4 und 8.11, dass die A,B und C Isochrone weitestgehend parallele Verläufe zeigen. Somit ist der Einfluss der Alterung auf das modifizierte Bindemittel abschätzbar und zeigt keine Anomalien auf.

Verarbeitbarkeit:

Der Rotations-Viskosimeter zeigt einen steilen Anstieg der dynamischen Viskosität des B1253 im Vergleich zum B1158 in höheren Temperaturen. Das Bindemittel wird entsprechend zähflüssig und deckt sich gut mit den Erfahrungen beim Anmischen des Mischguts(Abschnitt 4.3). Jedoch ist der Grenzwert von 3.000 mPa*s bei beiden Proben nicht überschritten und ist somit laut SHRP-System hinreichend pumpfähig, mischbar, einbaufähig und verdichtbar.

Tiefentemperaturverhalten: Das Tiefentemperaturverhalten wird ganzheitlich betrachtet durch die Modifikation kaum beeinflusst. Die Modifikation bringt eine Absenkung der Steifigkeit und ist somit leichter verformbar, jedoch ist der m-Wert der unmodifizierte Probe etwas höher und ist somit relaxationsfähiger.

6.2 Asphaltprüfungen

6.2.1 Konventionellen Prüfmethode

6.2.1.1 Spurbildungsprüfungen(WTT)

Die Ergebnisse des Spurbildungsversuchs sind in den Abbildungen 8.12 und 8.13 dargestellt. Die Spurrinnentiefe in Millimeter ist in der Ordinatenachse angegeben und in der Abszissenachse werden die Überrollungen respektive die Lastzyklen in einer logarithmischen Skala dargestellt. Zwei Überrollungen entsprechen einem Belastungszyklus

Es werden vier Bemessungsgrößen laut EN 12697-22:2020 nach Verfahren B berechnet.

- Die Spurbildungsrate an der Luft wird je 1.000 Belastungszyklen in Millimeter mit der folgenden Formel berechnet. d_{5000}, d_{10000} entspricht der vertikalen Verformung nach 5000,10000 Belastungszyklen.

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5} \quad (6.1)$$

- Die proportionale Spurrinnentiefe für jeden geprüften Probekörper bei n Zyklen in % wird wie folgt berechnet:

$$PRD_{AIR} = 100 \frac{(d_n - d_0)}{h} \quad (6.2)$$

Tab. 6.4: Ergebnisse des Spurbildungsversuchs

Mischgut	Probe -bezeichnung	Spurbildungs- -rate	Spurbildungsrate (linearer Teil)	Spurrinntiefe	prop. Spurrinntiefe	Dicke
		$\frac{mm}{1000Zyklen}$	$\frac{mm}{1000Zyklen}$	[mm]	[%]	[mm]
modifiziert	T939	0,05	0,06	2,3	5,6	40
	T 940	0,04	0,06	1,9	4,7	
	Mittelwert	0,05	0,06	1,9	4,7	
unmodifiziert	T942	unzul.	unzul.	unzul.	unzul.	50
	T943	unzul.	unzul.	unzul.	unzul.	
	Mittelwert	unzul.	unzul.	unzul.	unzul.	

Dabei ist

- PRD_{AIR} die proportionale Spurrinntiefe der iten Wiederholung, in Prozent (%)
 - d_n die vertikale Verschiebung nach n Belastungszyklen, in Millimeter (mm)
 - d_0 die vertikale Anfangsverformung, in Millimeter (mm)
 - h die Probekörperdicke, in Millimeter (mm).
- Die in der Zeile *Mittelwert* der Tabelle 6.4 angeführten Werte entsprechen dem Mittelwert der beiden geprüften Probekörper.
 - Nach einer gewissen Anzahl von Belastungszyklen stellt sich ein linearer Verlauf dessen Berechnung in der Spalte *linearer Teil* aufgeführt ist

Laut EN 12697-22:2020 ist eine Evaluation der Spurbildungsrate nur möglich, wenn der linearen Teil der Kurve der Spurrinntiefe einen Bereich von mindestens 2000 Belastungszyklen abdeckt. In dieser Untersuchung musste die Prüfung aufgrund zu großer Verformungen nach 1500 Belastungszyklen abgebrochen werden. Eine Berechnung der Proben T942 und T943 ist gemäß EN 12697-22:2020 nicht möglich.

Nichtsdestotrotz kann bei den unmodifizierten Proben bei etwa 1500 Belastungszyklus eine Spurrinntiefe von etwa 13 mm in der Abbildung 8.13 abgelesen werden. Die proportionale Spurrinntiefe wäre ohne Berücksichtigung der Anfangsverformung, einer Dicke von 50mm und nach 1500 Belastungszyklen bei

$$PRD_{LuftT942|943} = 100 \cdot \frac{13}{50} = 26\% \quad (6.3)$$

im Vergleich die modifizierten bei 1500 Belastungszyklen

$$PRD_{LuftT939|940} = 100 \cdot \frac{1,25}{40} = 3,125\% \quad (6.4)$$

6.2.2 Gebrauchverhaltensorientierte Prüfmethode

6.2.2.1 Abkühlversuch(TSRST)

Die Abkühlversuche werden für ungealterte und gealterte Asphaltprobekörper durchgeführt. Die Herstellung der gealterten Proben wird im Abschnitt 5.2.4 erläutert. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 8.14 bis 8.21 dargestellt und die Probekörperabmessungen sind im Anhang auf den Seiten 79 bis 84 beigefügt. Die linken Abbildungen stellen den kryogenen Spannungsverlauf dar und die rechten Abbildungen geben den Mittelwert der Bruchtemperatur wieder.

Für die Probereihe K823 (unmodifiziert und ungealtert) ergibt sich eine gemittelte Bruchtemperatur von $-25,8^{\circ}\text{C}$, dies entspricht der Kategorie $TSRST_{max-25^{\circ}\text{C}}$ gemäß EN 13108-1:2016.

Für die Probereihe K824 (modifiziert und ungealtert) ergibt sich eine gemittelte Bruchtemperatur von $-21,8^{\circ}\text{C}$, dies entspricht der Kategorie $TSRST_{max-20^{\circ}\text{C}}$ gemäß EN 13108-1:2016.

Für die Probereihe K830 (unmodifiziert und gealtert) ergibt sich eine gemittelte Bruchtemperatur von $-19,4^{\circ}\text{C}$, dies entspricht der Kategorie $TSRST_{max-15^{\circ}\text{C}}$ gemäß EN 13108-1:2016.

Für die Probereihe K831 (modifiziert und gealtert) ergibt sich eine gemittelte Bruchtemperatur von $-16,2^{\circ}\text{C}$, dies entspricht der Kategorie $TSRST_{max-15^{\circ}\text{C}}$ gemäß EN 13108-1:2016.

Die Abbildung 6.7 zeigt die mittleren Bruchtemperaturen und -spannungen im Vergleich.

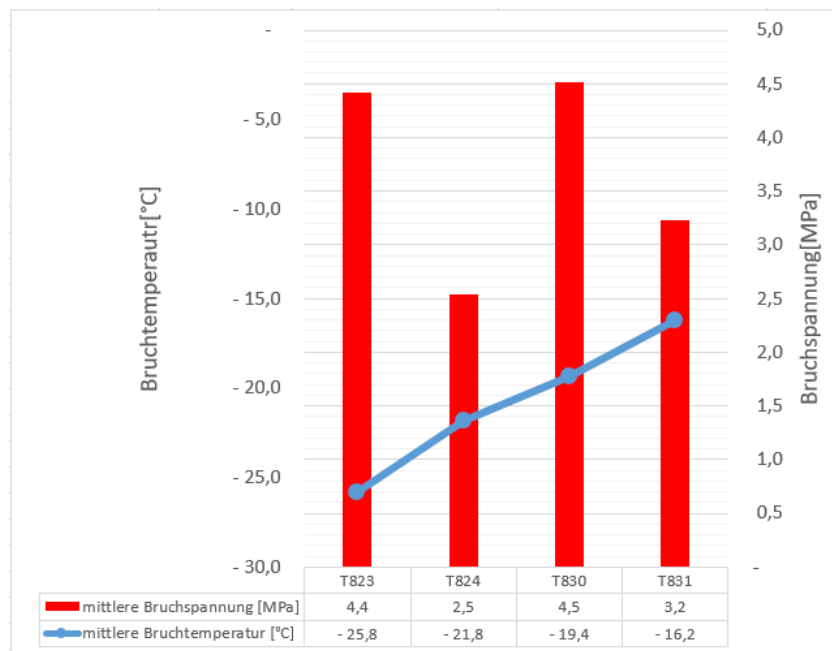


Abb. 6.7: Gemittelte Bruchtemperaturen und -spannungen der Asphaltprobekörper

Es ist erkennbar, dass im ungealterten Zustand die Bruchtemperaturen niedriger liegen und mit der Alterung eine Verschiebung der maximalen Bruchtemperatur um eine bzw. zwei Kategorie(n) gemäß EN 13108-1:2016 stattfindet. Zudem steigen die kryogenen Spannungen mit der Alterung bis zum Zeitpunkt des Bruches steiler an, wie im Vergleich der Spannungsverläufe in den Abbildungen 8.14, 8.16, 8.18, 8.20 erkennbar ist.

Die Modifikation der Probekörper T824 und T831 bewirkt somit ein früheres Versagen der modifizierten Proben durch Kälteeinwirkung und niedrigere kryogene Zugspannungen im Augenblick des Versagens verglichen zum Referenzprobekörper. In der Abbildung 8.22 werden die Versagenstemperaturen mit ihrer Standardabweichung dargestellt. Die modifizierten Probereihen, die zu je drei Probekörpern geprüft werden, weisen untereinander eine breitere Streuung der Versagenstemperaturen auf.

6.2.2.2 Steifigkeitsnachweis(4PBB)

Die Asphaltmischgüter werden am 4PB auf ihre Steifigkeit geprüft. Die Prüfungen erfolgen bei drei Temperaturstufen +20°C, +10°C, 0°C. Die erforderliche Kraft respektive Spannung, die nötig ist um die vordefinierte Verformung zu erreichen, wird während der Versuchsdauer als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Das Resultat der Messung dient als Berechnung des Betrags des komplexen Moduls $|E^*|$ in $[N/mm^2]$, der elastischen(E_1) und viskosen(E_2) Anteilen sowie des Phasenwinkels ϕ bei den Prüffrequenzen 0,1; 1; 3; 5; 8; 10; 20; 30 und 40 Hz. Mit den folgenden Gleichungen lassen sich die Werte im Anhang in den Abbildungen 8.23 bis 8.31 nachrechnen.

$$E^* = E_1 + i + E_2 \quad (6.5)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \times \cos(\phi) \quad (6.6)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \times \sin(\phi) \quad (6.7)$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (6.8)$$

In der Abbildung 6.8 ist der Einfluss der Alterung und der Modifikation auf die dynamische Steifigkeit bei einer Frequenz von 1 Hz erkennbar.

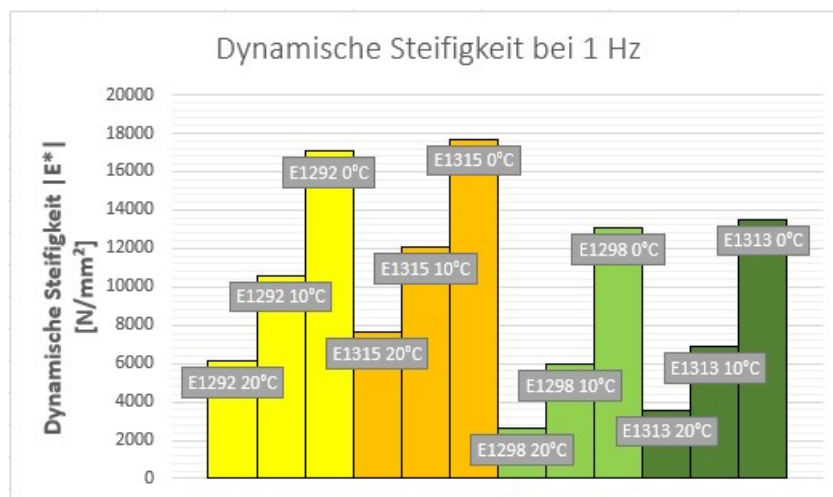


Abb. 6.8: Dynamische Steifigkeit bei 1Hz; gelb+orange modifiziert und grün+dunkelgrün unmodifiziert

Die dynamische Steifigkeiten der modifizierten Probekörper(E1292 und E1315) verdoppeln sich bei 20°C und verhalten sich auch mit sinkenden Prüftemperaturstufen steifer als die unmodifizierten Probekörper. Die Alterung trägt auch bei beiden Prüfkörperarten zur weiteren Versteifung bei. Die dynamische Steifigkeit besteht aus einem elastischen(E_1 ,Speichermodul) und

viskosen (E_2 , Verlustmodul) Anteil.

Bei Betrachtung der Verläufe in den Abbildungen 8.29 bis 8.31 ist deutlich erkennbar, dass die elastischen Anteile der modifizierten Asphaltmischgüter (E1292 und E1315) stark zum Gesamtanstieg der dynamischen Steifigkeit beitragen. Die viskosen Anteile sinken schwach und mit der Alterung wird der Effekt leicht verstärkt.

Die Veränderung in Richtung elastischem Materialverhalten ist ebenfalls bei der Betrachtung der Phasenwinkel in der Abbildung 6.9 erkennbar. Der Phasenwinkel ist vergleichsweise niedriger bei den modifizierten Probekörpern sowohl im gealterten als auch im ungealterten Zustand. Diese Beobachtung kann in allen Temperatur- und Frequenzstufen, bei Betrachtung der Kurven 8.26 bis 8.28, gemacht werden.

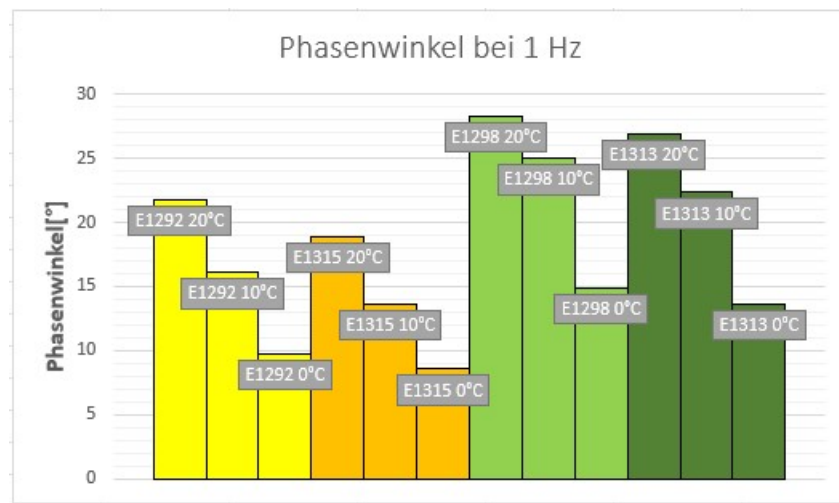


Abb. 6.9: Phasenwinkel bei 1Hz; gelb+orange modifiziert und grün+dunkelgrün unmodifiziert

6.2.2.3 Zusammenfassung und Interpretation

Die Ergebnisse aus den Asphaltprüfungen lässt sich folgendermaßen zusammenfassen.

Einerseits hängt der Steifigkeitsmodul des Asphaltmischguts von der Belastungszeit ab. Die Reaktion auf Verformungen ist auf viskose und elastische Anteile im Bindemittel aufgeteilt. Bei sehr kurzen Belastungszeiten (Hochfrequenz) federt die Verformung nach der Entlastung zurück, somit überwiegt die elastische Reaktion. Je länger die Belastungszeit (Niederfrequenz) desto größer wird die viskose Reaktion, welche bleibende Verformungen hervorruft [45].

Andererseits verhält sich Asphalt bzw. Bitumen im Allgemeinen gemäß der Abbildung 2.1 temperaturabhängig.

Langsame Verkehrsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen Temperaturen sind typischen Extrembedingungen etwa an Kreuzungen. Der Steifigkeitsmodul ist unter diesen Umständen am niedrigsten und Verformungen in Form von Spurbildungen treten sehr häufig auf. Das andere Extrembeispiel ist die zu hohe Steifigkeit bei niedrigen Temperaturen auf hoch frequentierten Autobahnen, bei denen Kälterisse vorherrschen [32].

Die Resultate aus dem Nachweis der dynamischen Steifigkeit mit dem 4PB haben besonders den Anstieg der elastischen Anteile, und damit die gesamte dynamische Steifigkeit, in allen Frequenz- und Temperaturbereichen durch Beigabe der Modifikatoren ergeben. Die Zunahme des komplexen Moduls E^* hat in dieser Hinsicht mehrere Effekte, welche durch die übrigen Asphaltprüfungen

untermauert werden.

Erhöhung des Verformungswiderstands in Hochtemperaturbereich

Der Spurbildungsversuch hat eine wesentliche Erhöhung des Verformungswiderstands des modifizierten Asphalts ergeben. Der Versuch zeichnet sich durch langsam wiederholende Überrollungen bei 60°C Lufttemperatur aus. Die höheren elastischen Anteile im Steifigkeitsmodul und der niedrigere Phasenverschiebungswinkel des modifizierten Mischguts deuten einen besseren Widerstand gegen bleibende Verformungen an.

Stärkere Zunahme der kryogenen Spannungen

Bitumen ist in der Lage, aufgezwungene Spannungen durch viskose Verformungen abzubauen. Dieser Spannungsabbau erfolgt nicht spontan, sondern allmählich, und die Geschwindigkeit des Spannungsabbaus hängt von der Viskosität ab.[45] Daraus folgend bauen sich die kryogenen Spannungen beim modifizierten Asphalt viel langsamer ab, da die elastischen Anteile im Bitumen dominanter vertreten sind und sich temperaturbedingt ohnehin elastischer verhält. Der Probekörper erreicht vergleichsweise deutlich niedrigere Spannungsspitzen als der unmodifizierte Asphalt und erreicht die Bruchtemperatur im Schnitt um 5K früher. Die Alterung des modifizierten Asphaltmischguts hat hierbei zwei Auswirkungen gezeigt. Einerseits kommt es, wie im Abschnitt 2.3.4 beschrieben, nach einer Alterungszeit von 120h zu einer Depolymerisation der Gummipartikel im Bindemittel, womit die Viskosität sinkt und das komplexe Schubmodul (und die dynamische Steifigkeit) zusätzlich ansteigt. Andererseits verhärtet sich generell unter Einfluss der Alterung den Asphalt[34]. Diese zwei Effekte führen zu einem früheren Kältebruch.

Absenkung des Phasenwinkels

Der Phasenwinkel wird nach der Beigabe der Modifikatoren reduziert und ist im Niederfrequenzbereich(längere Belastungszeit) niedriger als beim unmodifizierte Mischgut. Mit sinkenden Temperaturniveaus nähern sich die Kurven des Phasenwinkels und die der elastischen Anteile E1 des unmodifizierten Mischgutes einerseits den modifizierten Kurven andererseits. Der Phasenwinkel der unmodifizierten Kurven verhält sich mit sinkenden Temperatur- und Frequenzstufen viskoser, durch den höheren Phasenwinkel. Das viskosere Materialverhalten in den Tieftemperaturen ist auch zuständig für den besseren Spannungsabbau und die darausfolgenden niedrigeren Bruchtemperaturen.

6.3 Korrelationen der Untersuchungen auf Asphalt- und Bindemittlebene

Kälteverhalten

Die für die Kälteeigenschaften wichtigen Parameter Bruchtemperatur und -spannung sind im Wesentlichen von der Viskosität und Steifigkeit des vorhandenen Bindemittels abhängig [9], [45] und [25]. Eine wesentliche Rolle spielt auch der Härtegrad des Bitumens. Je weicher das Bitumen, desto schneller erfolgt der Abbau der kryogenen Spannung durch Relaxation. Der Penetrationstest hat eine deutliche Verhärtung (Abbildung 6.1) des modifizierten Bindemittels ergeben.

Der Rotationsviskosimeter hat einen fünffachen Anstieg der dynamischen Viskosität(Zähigkeit) ergeben, dass unter anderem zu einem merkbaren Anstieg der Steifigkeit im Asphaltprobekörper

führt, welches der Nachweis mit dem 4PB zeigt.

Im Gegenzug hat interessanterweise die BBR-Untersuchung keine vergleichbaren Veränderung hinsichtlich der Steifigkeit und Relaxationsfähigkeit(m-Wert)(Abbildung 6.3) ergeben. Die BBR-Untersuchung ist im SHRP-System essentiell für die Einstufung des Bindemittels im Tieftemperaturbereich, jedoch hat der Abkühlversuch einen großen Unterschied in der Bruchtemperatur der beiden Versuchsgruppen ergeben. Die Studie [10] hat auf Basis von 40 verschiedenen Asphaltbetonproben mit unterschiedlichen Additiven keine eindeutige Korrelation zwischen den BBR- und TSRST-Resulate feststellen können. In der Studie [24] wird die Umrechnung der Spannung von der Querschnittsfläche der BBR-Proben auf die Fläche der TSRST-Proben gemacht, um somit einen Vergleich zu versuchen. Die Ergebnisse haben auch hierbei keine eindeutige Korrelation gezeigt. Die BBR-Untersuchungen beschränken sich auf die alleinige Wirkung auf das Bindemittel, wohingegen das Prüfergebnis beim Abkühlversuch auf eine dreifache Interaktion aus Bindemittel, Füller und Gesteine zurückzuführen ist. Das führt auch in diesem Fall zu einer merkbaren Differenz der kritischen Bruchtemperaturen.

Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten ist nicht nur von den Eigenschaften des Bindemittels abhängig, sondern der optimale Verdichtungsgrad einer Asphaltschicht kann gegenüber plastischen Verformungen beständiger sein. Weiters weisen Asphalte mit Bitumen, die eine geringere Viskosität besitzen, auch niedrige Steifigkeiten auf und sind somit anfälliger gegenüber plastischen Verformungen. [9]. In den DSR-Prüfungen ist eine Verschiebung des Phasenwinkel in Richtung elastisch erkennbar und selbiges hat sich bei den Steifigkeitsnachweisen in allen Temperatur- und Frequenzstufen ergeben. Das zunehmend elastische Materialverhalten begünstigt den Widerstand gegenüber bleibenden Verformungen. Das Resultat der Spurbildungsversuche untermauert diese Verhaltensänderung.

Ermüdungsverhalten

Für das Ermüdungsverhalten kann in dieser Arbeit keine Korrelation der Bindemittelprüfungen mit den Asphaltprüfungen gemacht werden, da dafür Ermüdungsnachweise mit dem 4PB erforderlich sind. Anschließend können die PAV-gealterten DSR-Untersuchungen zum Vergleich herangezogen werden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In dieser Diplomarbeit wurde die Doppelmodifikation einer Asphaltdeckschicht des Typs AC 11 deck 70/100 mit dem Naturasphalt Gilsonit und gummimodifiziertem Bitumengranulat untersucht. Das Ziel war es ein Asphaltmischgut herzustellen, welche den heutigen klimatischen und verkehrstechnischen Anforderungen österreichischer Straßen erfüllen kann. Besonders auf die Eigenschaften hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit, Widerstand gegen bleibende Verformungen und Tiefentemperaturverhalten im ungealterten, in kurzzeitgealterten (RTFOT) bzw. in langzeitgealterten (PAV) Zustand wurde ein besonderes Augenmerk gelegt.

Zunächst wurde das modifizierte Bindemittel gemäß einem dafür vorgesehenen Herstellungsprozess erstellt und die Additive händisch beigemischt. Bei der Nachbereitung des Mischguts offenbarte sich die Neigung zur Entmischung und das Prüfprogramm wurde auf kurzfristige Verarbeitung des Materials eingestellt.

Die Prüfungen am Bindemittel ergab, bei Beigabe der Modifikatoren, eine deutliche Zunahme des komplexen Schubmoduls G^* , sie führte zu einer Reduktion des PEN-Wertes, Anstieg des ERK-Wertes und dem deutlichen Anstieg der dynamischen Viskosität. Das Bitumen wurde dadurch härter, zäher und schwer verformbarer verglichen zum Referenzbitumen. Der RV-Test zeigte, dass das Bindemittel unter dem Grenzwert des SHRP-Schemas lag und somit problemlos verarbeitet werden konnte. Die DSR-Untersuchungen veranschaulichten den merkbar langsameren Anstieg des Phasenverschiebungswinkels mit Temperaturanstieg und dem dadurch elastischeren Materialverhalten. Aus dem Vergleich der Kurven der $G^* \cdot \sin(\delta) < 5000 \text{ kPa}$ und dem Vergleich der dynamischen Steifigkeit bei 0°C stellte sich ein unwesentlicher Vorteil im Ermüdungsverhalten zugunsten des unmodifizierten Bindemittels heraus. Aus den BBR-Untersuchungen konnte am gealterten Bindemittel hinsichtlich Steifigkeit und Relaxationsfähigkeit bei bis zu -30°C keine Veränderung abgeleitet werden. Nach Abschluss der Bindemitteluntersuchungen wurde der PG bewertet, welcher sich im Hochtemperaturbereich von (58-28) bei Stb 70/100 auf (70-28) verbesserte.

Die Asphaltprüfungen begannen mit dem Spurbildungsversuch. Der Versuch beim unmodifizierten Bindemittel musste aufgrund der zu großen Verformungen bei 7000 Überrollungen abgebrochen werden. Mit dem modifizierten Mischgut steigerte sich der Widerstand gegen bleibende Verformungen merklich und die Lebensdauer einer so verbesserten Asphaltdeckschicht würde sich hier wesentlich verlängern. Aus den Steifigkeitsversuchen mittels 4PB konnten im Wesentlichen die Ergebnisse der DSR-Untersuchungen auf Asphalzebene belegt werden. Die dynamische Steifigkeit stieg wesentlich an, welche ausschließlich durch den Anstieg des Speichermoduls im modifizierten Mischgut erfolgte. Die Alterung verstärkte den Anstieg der elastischen Anteile des komplexen Moduls noch weiter. Abschließend offenbarte der Abkühlversuch einen deutlichen Unterschied zwischen den unmodifizierten und modifizierten Asphaltmischgütern. Durch das steifere und härtere Bindemittel waren die elastischen Anteile verhältnismäßig höher als die für den Spannungsabbau zuständigen viskosen Anteile. Die kryogenen Spannungen konnten dadurch nicht schnell abgebaut werden und die Probekörper versagten früher.

Aus diesen Untersuchungsergebnissen konnten somit die zuvor definierten Forschungsfragen beantwortet werden:

Konnte das gummimodifizierte Bitumengranulat die mangelnde Viskosität bei Tieftemperaturen eliminieren, bei gleichzeitigem Anstieg des Verformungswiderstands in höheren Temperaturen durch das Gilsonit?

Die Ergebnisse des Spurbildungsversuchs haben die deutliche Erhöhung des Verformungswiderstands bewiesen, die sich aus den Bindemittelsprüfungen herauszeichneten.

Die Modifikation erhöhte den Gesamtbetrag der dynamischen Steifigkeit, jedoch blieb dabei das Verlustmodul unverändert. Der Phasenwinkel war niedriger und das Material verhielt sich bei tiefen Temperaturen in Summe elastischer. Das führte zu einer steilen Zunahme der kryogenen Spannungen bei den Abkühlversuchen. Als Folge daraus versagten die modifizierten Proben merklich früher als die unmodifizierten Proben. Demnach leistete die Beigabe des gummimodifizierten Bitumengranulats keinerlei positiven Beitrag zum Tieftemperaturverhalten.

Eignete sich das doppelmodifizierte Mischgut hinsichtlich Gebrauchseigenschaften und Verarbeitungseigenschaften?

In der Bindemittelproduktion konnte die Modifikation durch händisches Einfüllen der Additive bewerkstelligt werden und die Homogenisierung erfolgte durch ein Rührwerk. Für die Produktion waren somit keine Spezialanfertigungen notwendig. Einzig die Entmischung des gummimodifizierten Bitumengranulats nach längerer Stehzeit, könnte durch gelegentliches Rühren und rascher Weiterverarbeitung verhindert werden. Dabei wurde die generelle Verarbeitbarkeit durch den RV-Test bestätigt.

Bei der industriellen Verarbeitung gibt es einerseits die Möglichkeit, beide Additive direkt in den Mischer hinzuzufügen, wobei die Gesteine zuvor erhitzt werden müssen oder andererseits durch Vormischung des Gilsonits im Bitumentank und durch Zugabe der gummimodifizierten Bitumengranulate in der Trockenmischphase.

Hinsichtlich Gebrauchseigenschaften könnten die deutliche Steigerung des Widerstandes gegen bleibende Verformungen und die gute Ermüdungsfestigkeit bei mittleren Temperaturen eine solide Grundlage für den Gebrauch bei stark verkehrsbeanspruchten Asphaltdeckschichten wie Streckenabschnitte mit vermehrtem Schwerverkehr bieten. Weiters würde sich dieser Asphalt bei stehendem Verkehr wie etwa bei Haltestellen und Kreuzungen eignen. Auch die Nutzung der eben erwähnten Beispielen in Kombination mit trockenen Gebieten mit heißen Asphalttemperaturen wäre durchaus denkbar.

Die letzte Frage, welche sich in dieser Diplomarbeit klären sollte, war ob sich Ergebnisse in den Bindemitteluntersuchungen und den Asphaltuntersuchungen korrelieren.

Diese konnte bis auf die Resultate aus dem Tieftemperaturverhalten positiv beantwortet werden. Es konnte keine plausible Erklärung gefunden werden, wie die BBR-Untersuchungen ähnliche Steifigkeiten und Relaxationsfähigkeiten ankündigten, aber die Abkühlversuche deutlich zu Ungunsten des modifizierten Asphaltmischguts ausgingen. Nachvollziehbar war jedoch, dass die Verhärtung, der Anstieg der Zähigkeit und der niedrigere Phasenverschiebungswinkel mit sinkenden Temperaturen im Bindemittel das Ergebnis des Abkühlversuchs erklärte. Weiterführende

Forschung könnte eine Variation des Mischverhältnisses und die Beobachtung der in dieser Untersuchung festgelegten Vergleichsparameter beleuchten. Hinsichtlich Entmischungsneigung wäre eine Extraktion des Bindemittels aus einer mehrjährig eingebauten Asphaltdeckschicht interessant. Im Hinblick des Tieftemperaturverhalten wäre für den Einsatz auf österreichischen Strecken, eine mehrjährige Studie notwendig, bei dem die eingebaute Asphaltdeckschicht besonders in den Wintermonaten hinsichtlich Kälterisse untersucht wird. Sinnvoll wäre es auch das gummimodifizierte Bitumengranulat oder das Gilsonit durch weichmachende Additive wie etwa Wachse zu ersetzen.

Jedenfalls könnte diese Arbeit für die zukünftige Forschung, Alternativen zu polymermodifiziertem Bitumen geben und eine Lösung für Streckenabschnitten mit größerer Anfälligkeit zur Spurbildungen besonders in heißen Klimazonen bieten.

Kapitel 8

Anhänge

8.1 Mischgutherstellung

Mengenermittlung für die Plattenherstellung									
Plattenart	Dicke	Gesamtmasse	Einzuwägende BM-Masse(b)	davon 70/100	Anteil am einzuwägenden BM	davon Gilsonit	Anteil am BM	davon Gummigranulat	Anteil am BM
	(a)	Gesamtdicke zweier Platten							
	(b)	Einzuwägende Masse berücksichtigt Klebenbleiben am Mischer und an den Kübeln							
Spurbildung	8 cm (a)	19000 g (a)	1500 g	975 g	65%	300 g	20%	225 g	15%
Kältezug	7 cm	25000 g	2000 g	1300 g	65%	400 g	20%	300 g	15%
4PB	8 cm	28000 g	2000 g	1300 g	65%	400 g	20%	300 g	15%
Kältezug nach Alt	7 cm	25000 g	2000 g	1300 g	65%	400 g	20%	300 g	15%
4PB nach Alt	8 cm	28000 g	2000 g	1300 g	65%	400 g	20%	300 g	15%
Triaxial	13 cm	43000 g	3000 g	1950 g	65%	600 g	20%	450 g	15%
		168000 g				2500 g		1875 g	
Iranisches Gilsonit			Anteil am Ges.Gilsonit(Iran)	Iranisches Gilsonit			Anteil an der Gesamtmasse(Iran)		
2010,9 g	÷	2500 g	80,44%	2010,9 g	÷	168000 g	=	1,20%	
USA Gilsonit			Anteil am Ges.Gilsonit(USA)	USA Gilsonit			Anteil an der Gesamtmasse(USA)		
489,1 g	÷	2500 g	19,56%	489,1 g	÷	168000 g	=	0,29%	

Abb. 8.1: Mengenermittlung zur Plattenherstellung

8.2 DSR-Ergebnisse

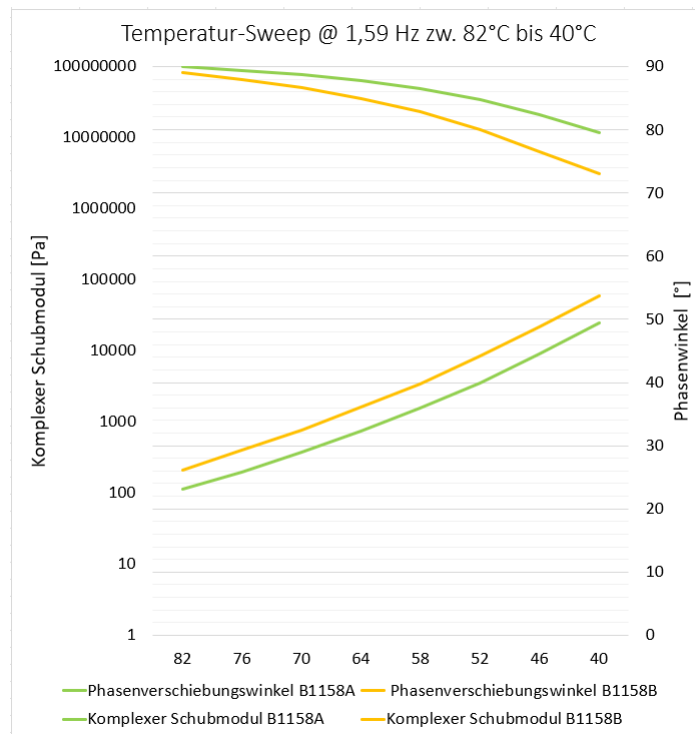


Abb. 8.2: DSR-Temperatursweep des B1158 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 82 und 40 °C

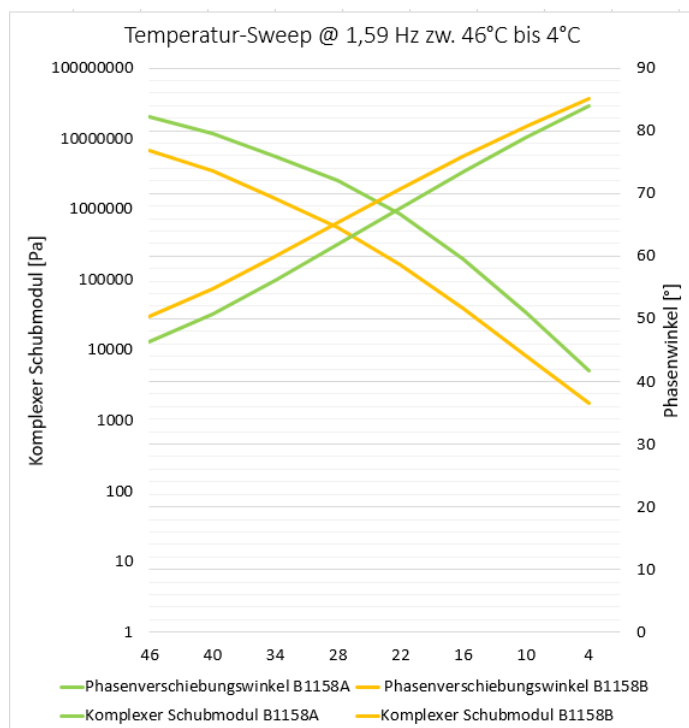


Abb. 8.3: DSR-Temperatursweep des B1158 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 46 und 4 °C

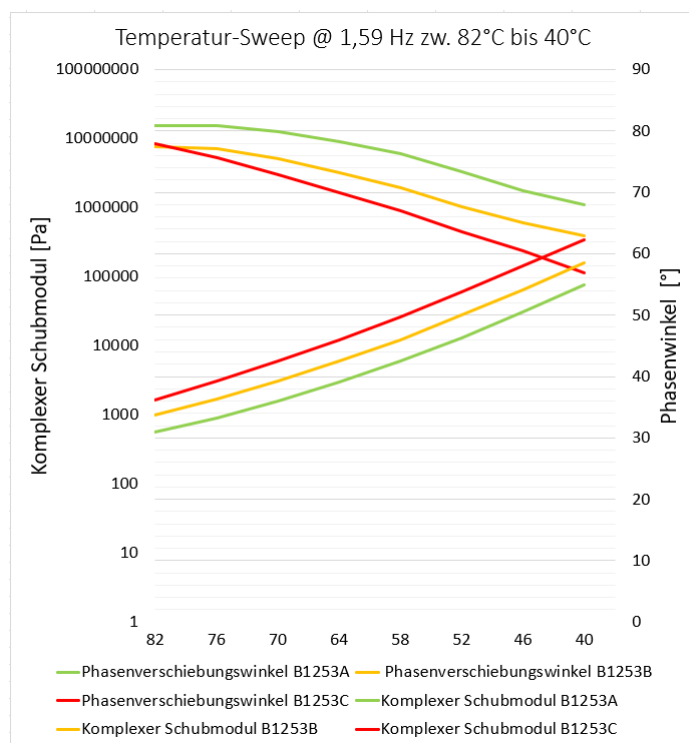


Abb. 8.4: DSR-Temperatursweep des B1253 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 82 und 40 °C

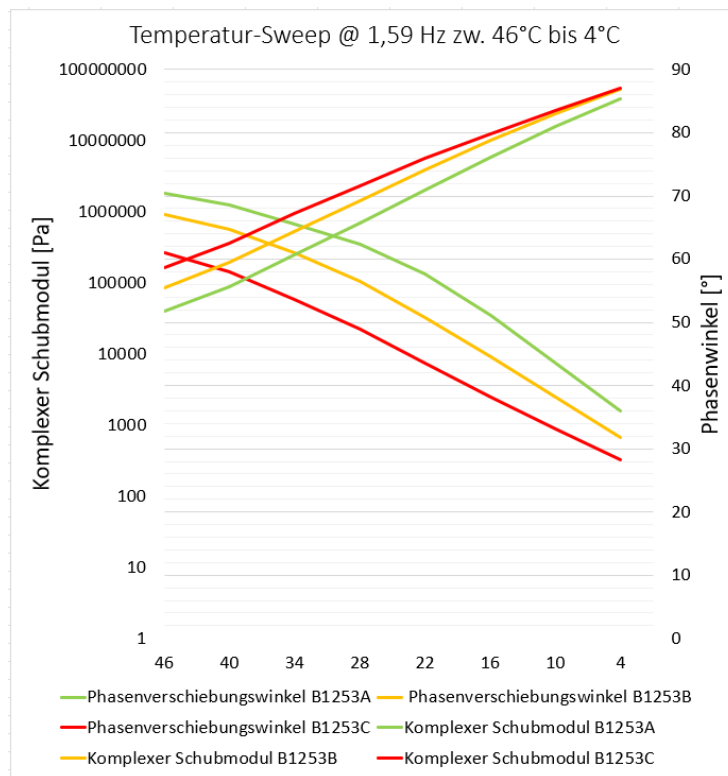


Abb. 8.5: DSR-Temperatur sweep des B1253 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 46 und 4 °C

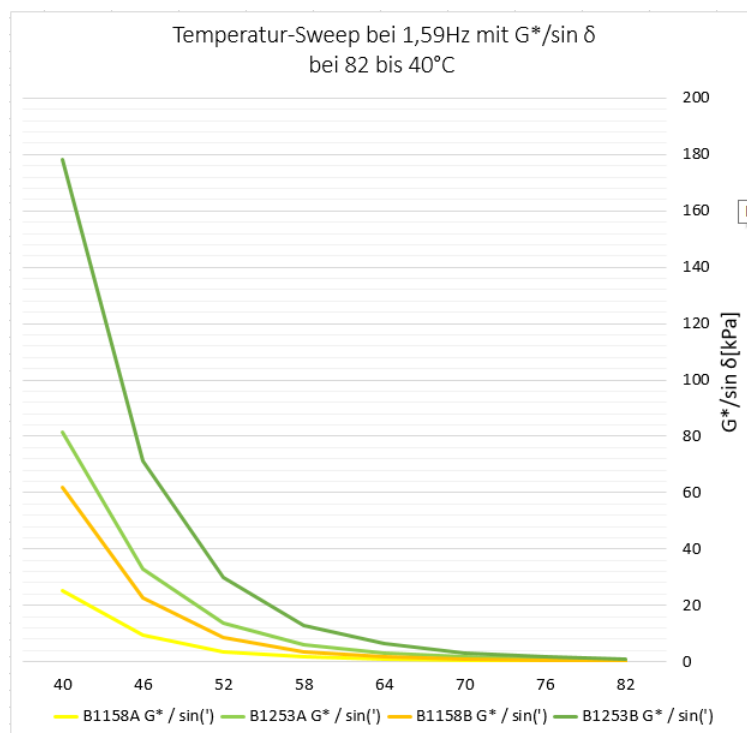


Abb. 8.6: DSR-Temperatur sweep des B1158 bei 1,59 HZ ($G^*/\sin \delta$) im Temperaturbereich 82 und 40 °C

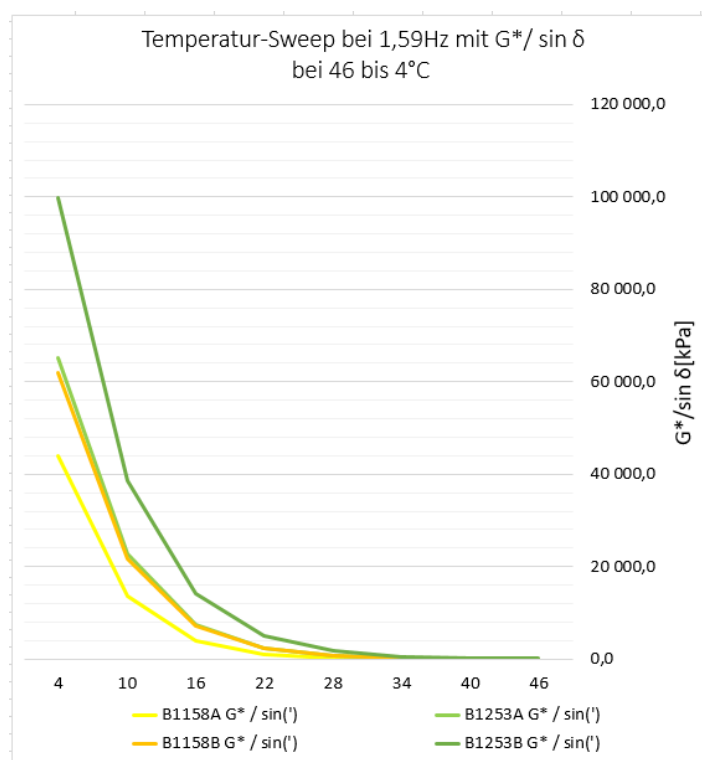


Abb. 8.7: DSR-Temperatur sweep des B1158 bei 1,59 HZ ($G/\sin\delta$) im Temperaturbereich 46 und 4 °C

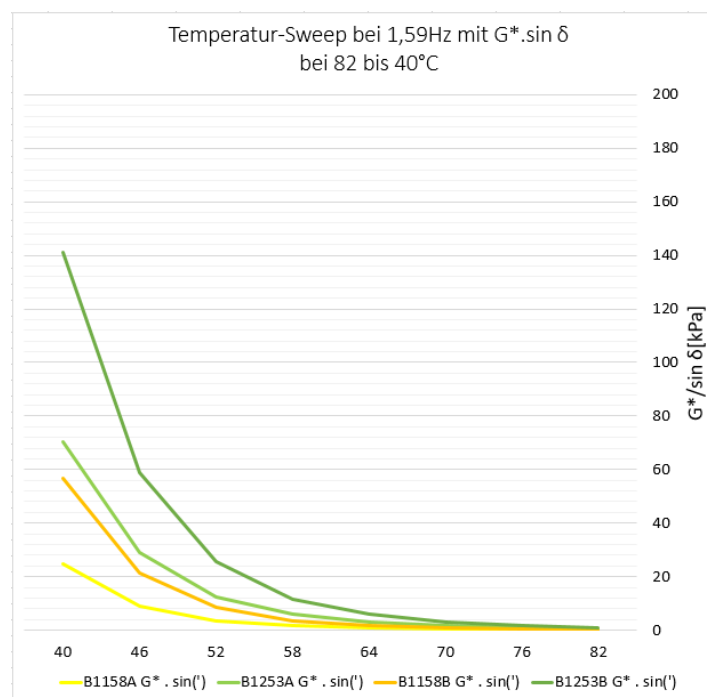


Abb. 8.8: DSR-Temperatur sweep des B1253 bei 1,59 HZ ($G.\sin\delta$) im Temperaturbereich 82 und 40 °C

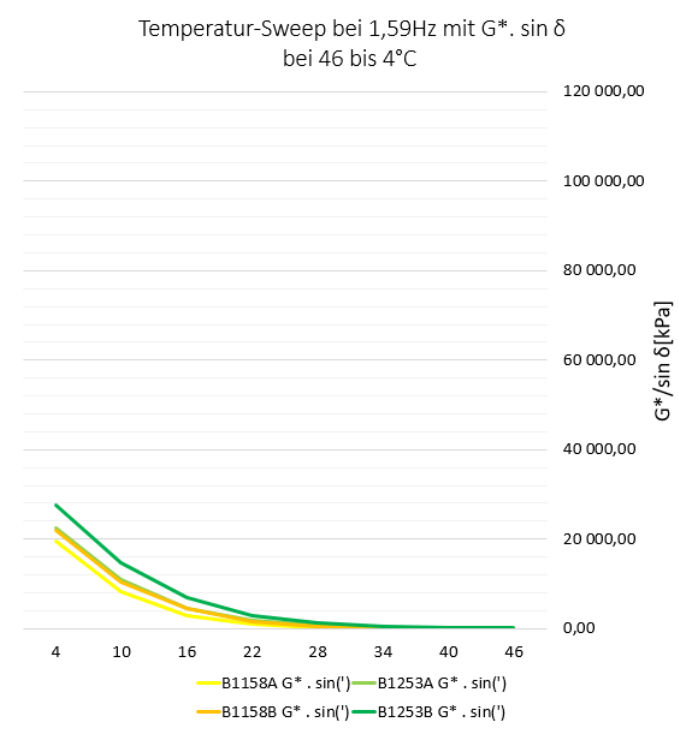


Abb. 8.9: DSR-Temperatursweep des B1253 bei 1,59 Hz ($G \cdot \sin \delta$) im Temperaturbereich 46 und 4 °C

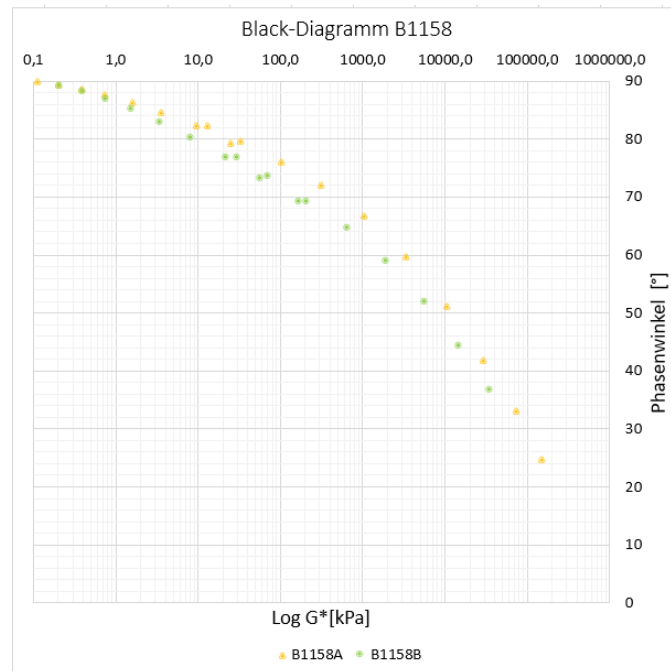


Abb. 8.10: Black Diagramm für B1158

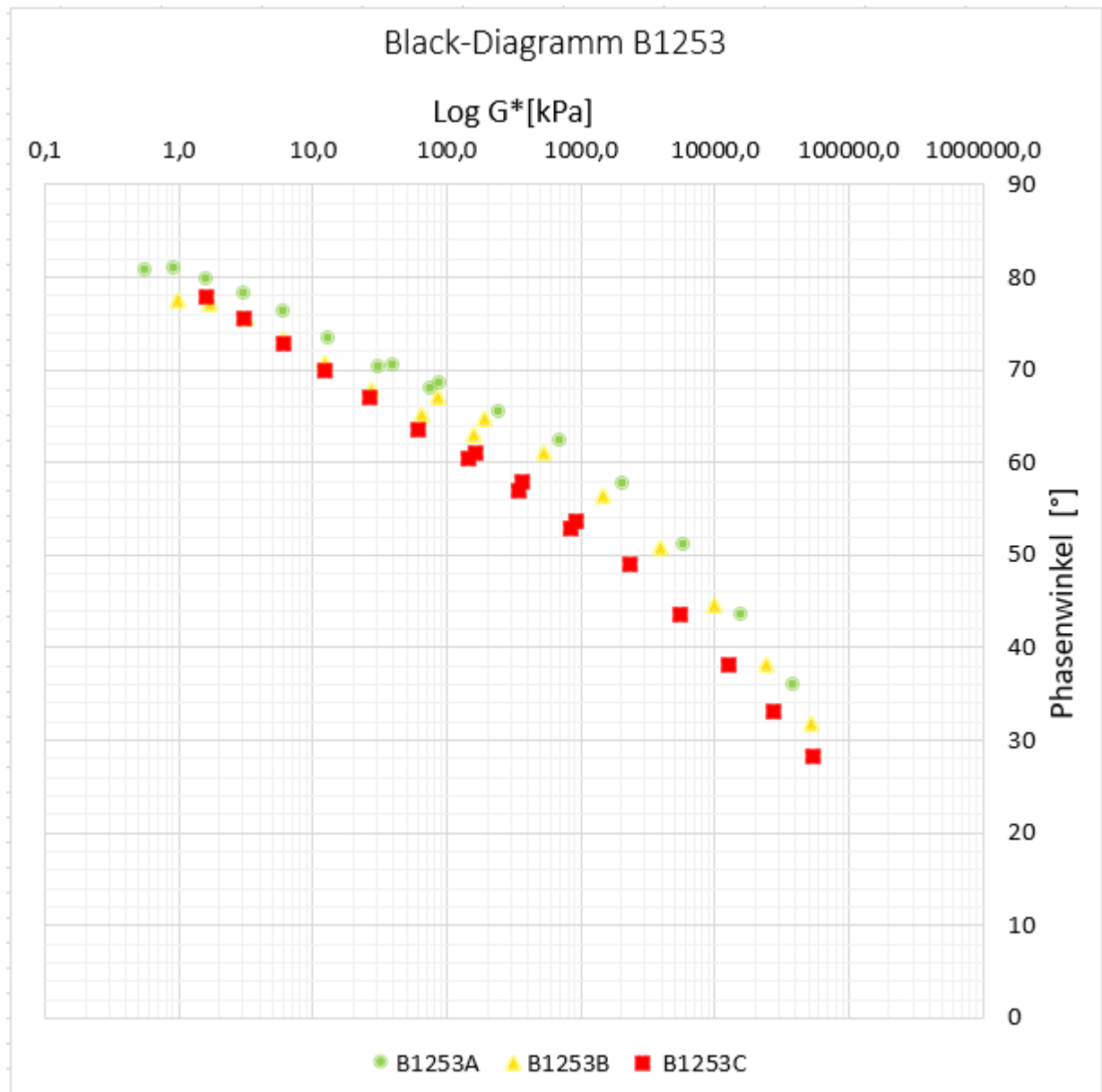


Abb. 8.11: Black Diagramm für B1253

8.3 Spurbildungsversuch

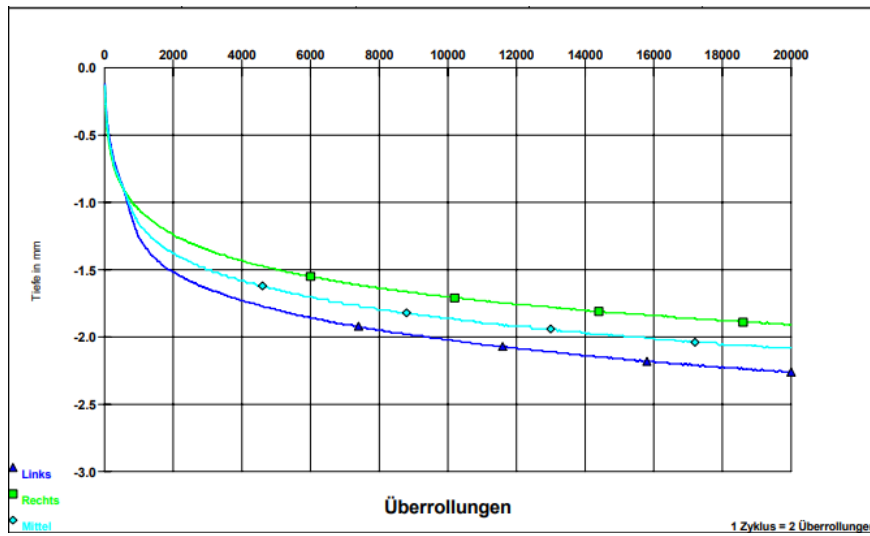


Abb. 8.12: T939 und T940, Spurrinntiefe nach 20000 Überrollungen

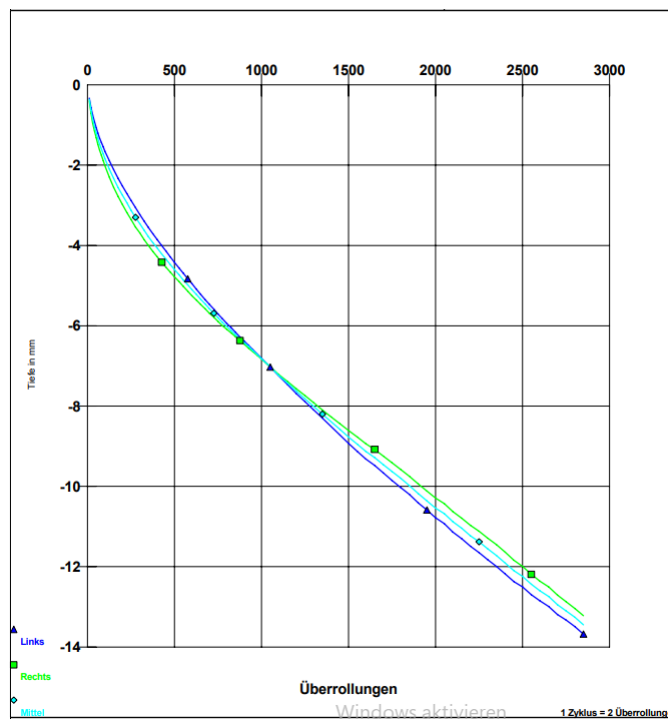


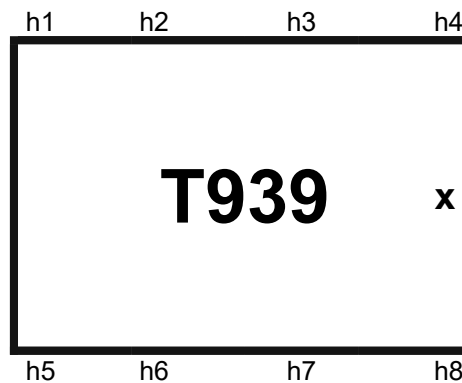
Abb. 8.13: T942 und T943, Spurrinntiefe nach 3000 Überrollungen

**Prüfbericht: Bestimmung der Maße von Asphalt-
 Probekörpern**
P432
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	25.05.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Arbeitsanweisung	-
Norm	EN 12697-29 (2020)

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100 + GRM40/15+Naturasphalt(Gilsonit), A1,GS	Laborcode	AS1595
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G926, G902, G964
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	B1158A 70/100 + 20%Gilsonite +15% S254 GRM 40/15	Laborcode	B1253A

Prüfergebnisse

Abmessungen [mm]

Länge	320,0	h1	40,4	h5	40,6
Breite	260,0	h2	40,7	h6	40,7
		h3	41,6	h7	40,8
		h4	40,9	h8	40,5
Mittelwert Höhe			40,9		40,7

Raumdichtebestimmung Verfahren D - Ausmessen

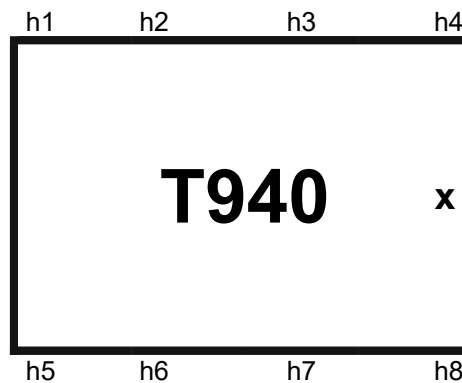
Masse trocken [g]	7933,2	Raumdichte [Mg/m³]	2,340
Volumen [cm³]	3392,5		

**Prüfbericht: Bestimmung der Maße von Asphalt-
 Probekörpern**
P432
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	25.05.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Arbeitsanweisung	-
Norm	EN 12697-29 (2020)

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100 + GRM40/15+Naturasphalt(Gilsonit), A1,GS	Laborcode	AS1595
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G926, G902, G964
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	B1158A 70/100 + 20%Gilsonite +15% S254 GRM 40/15	Laborcode	B1253A

Prüfergebnisse

Abmessungen [mm]

Länge	320,0	h1	40,4	h5	40,2
Breite	260,0	h2	40,6	h6	40,6
		h3	40,5	h7	40,6
		h4	40,6	h8	40,3
Mittelwert Höhe			40,5		40,4

Raumdichtebestimmung Verfahren D - Ausmessen

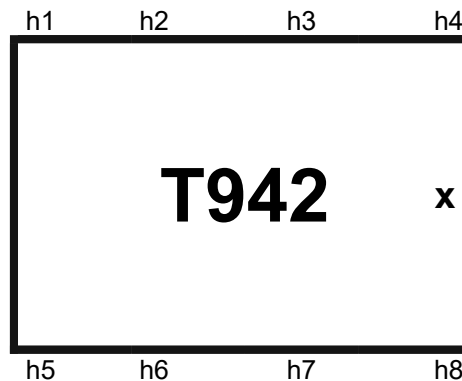
Masse trocken [g]	7897,4	Raumdichte [Mg/m³]	2,350
Volumen [cm³]	3367,5		

**Prüfbericht: Bestimmung der Maße von Asphalt-
 Probekörpern**
P432
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	07.06.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Arbeitsanweisung	-
Norm	EN 12697-29 (2020)

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100, A1, GS	Laborcode	AS1600
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G901, G902, G903
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	70/100	Laborcode	B1158A

Prüfergebnisse

Abmessungen [mm]

Länge	320,0	h1	41,1	h5	41,6
Breite	260,0	h2	41,3	h6	41,7
		h3	41,9	h7	42,2
		h4	41,4	h8	41,7
Mittelwert Höhe			41,4		41,8

Raumdichtebestimmung Verfahren D - Ausmessen

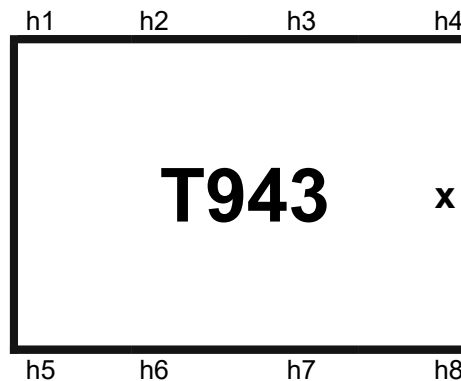
Masse trocken [g]	7902,8	Raumdichte [Mg/m³]	2,280
Volumen [cm³]	3462,8		

**Prüfbericht: Bestimmung der Maße von Asphalt-
 Probekörpern**
P432
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	07.06.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Arbeitsanweisung	-
Norm	EN 12697-29 (2020)

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100, A1, GS	Laborcode	AS1600
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G901, G902, G903
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	70/100	Laborcode	B1158A

Prüfergebnisse

Abmessungen [mm]

Länge	320,0	h1	41,8	h5	42,0
Breite	260,0	h2	42,3	h6	41,9
		h3	42,3	h7	41,9
		h4	41,9	h8	42,0
Mittelwert Höhe			42,1		41,9

Raumdichtebestimmung Verfahren D - Ausmessen

Masse trocken [g]	7854,9	Raumdichte [Mg/m³]	2,250
Volumen [cm³]	3494,0		

8.4 Abkühlversuch

Prüfbericht: Rohdichte, Abmessungen, Raumdichten und Hohlraumgehälter
P429-PR
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	01.06.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Arbeitsanweisung	-
Normen	EN 12697-05:2010, EN 12697-8:2003, EN 12697-29:2003

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100, A1, GS	Laborcode	AS1594
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G901, G902, G903
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	70/100	Laborcode	B1158A

Prüfergebnisse

Rohdichte des Mischgutes						
Rohdichte [Mg/m³]	2,524	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren			
Prüftemperatur [°C]	-	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m³]	Hohlraumgehalt [V%]
K823A	222,7	50,2	50,2	1370,6	2,466	2,3
K823B	222,7	50,1	50,6	1382,9	2,471	2,1
K823C	222,4	50,2	50,5	1382,1	2,473	2,0
K823D	222,9	50,0	52,4	1440,1	2,319	8,1
K823E	222,4	49,7	50,1	1361,1	2,478	1,8
K823F	222,5	49,8	50,5	1364,0	2,471	2,1
K823G	222,6	50,1	50,6	1381,4	2,462	2,5
K823H	222,7	50,9	50,7	1392,0	2,476	1,9

Prüfbericht: Rohdichte, Abmessungen, Raumdichten und Hohlraumgehälter
P429-PR
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	21.06.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Arbeitsanweisung	-
Normen	EN 12697-05:2010, EN 12697-8:2003, EN 12697-29:2003

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100 + GRM40/15+Naturasphalt(Gilsonit), A1,GS	Laborcode	AS1596
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G926, G902, G964
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	B1158A 70/100 + 20%Gilsonite +15% S254 GRM 40/15	Laborcode	B1253A

Prüfergebnisse

Rohdichte des Mischgutes			
Rohdichte [Mg/m³]	2,542	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren
Prüftemperatur [°C]	-	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser

Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m³]	Hohlraumgehalt [V%]
K824A	229,3	50,4	51,9	1359,2	2,303	9,4
K824B	228,7	50,1	49,8	1298,3	2,312	9,0
K824C	228,6	50,1	49,9	1300,3	2,308	9,2
K824D	228,1	49,7	51,0	1293,3	2,287	10,0
K824E	228,0	49,7	51,9	1313,0	2,278	10,4
K824F	227,3	50,0	50,3	1297,1	2,296	9,7
K824G	226,8	50,1	50,9	1314,0	2,303	9,4
K824H	226,8	49,8	49,0	1249,2	2,278	10,4

Prüfbericht: Rohdichte, Abmessungen, Raumdichten und Hohlraumgehälter
P429-PR
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	24.08.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	Armin Noei
Arbeitsanweisung	-
Normen	EN 12697-05:2010, EN 12697-8:2003, EN 12697-29:2003

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100, A1, GS	Laborcode	AS1632
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G901, G902, G903
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	70/100	Laborcode	B1158A

Prüfergebnisse

Rohdichte des Mischgutes						
Rohdichte [Mg/m³]	2,524	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren			
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m³]	Hohlraumgehalt [V%]
K830A	224,6	50,4	50,0	1406,6	2,503	0,8
K830B	224,7	50,2	50,2	1403,5	2,504	0,8
K830C	224,5	50,1	50,2	1398,7	2,500	1,0
K830D	224,4	50,2	50,2	1401,4	2,497	1,1
K830E	224,5	49,9	50,6	1398,5	2,496	1,1
K830F	224,3	50,3	50,2	1398,0	2,501	0,9
K830G	224,1	50,1	50,1	1394,3	2,502	0,9
K830H	224,6	51,0	50,2	1420,4	2,474	2,0

Prüfbericht: Rohdichte, Abmessungen, Raumdichten und Hohlraumgehälter
P429-PR
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	01.09.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	Armin Noei
Arbeitsanweisung	-
Normen	EN 12697-05:2010, EN 12697-8:2003, EN 12697-29:2003

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100 + GRM40/15+Naturasphalt(Gilsonit), A1,GS	Laborcode	AS1633
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G926, G902, G964
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	B1158A 70/100 + 20%Gilsonite +15% S254 GRM 40/15	Laborcode	B1253A

Prüfergebnisse

Rohdichte des Mischgutes			
Rohdichte [Mg/m³]	2,524	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser

Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m³]	Hohlraumgehalt [V%]
K831A	222,8	50,2	49,6	1331,0	2,440	3,3
K831B	222,6	50,3	50,1	1360,0	2,459	2,6
K831C	222,2	50,1	50,3	1356,3	2,457	2,7
K831D	222,3	49,7	50,3	1334,9	2,433	3,6
K831E	222,8	50,7	50,5	1363,3	2,432	3,6
K831F	222,9	50,1	50,4	1354,9	2,443	3,2
K831G	222,6	50,3	50,4	1370,2	2,456	2,7
K831H	222,2	50,3	50,3	1356,0	2,433	3,6

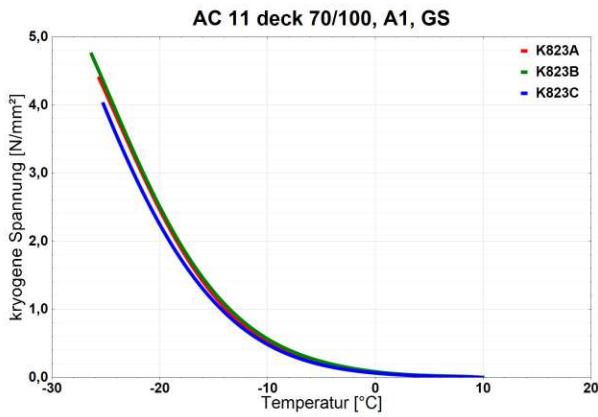


Abb. 8.14: kryogene Spannungsverlauf K823

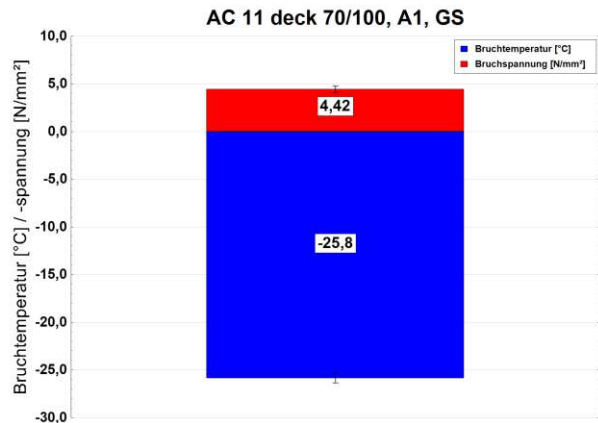


Abb. 8.15: Mittelwert der Bruchtemperatur und -spannung K823

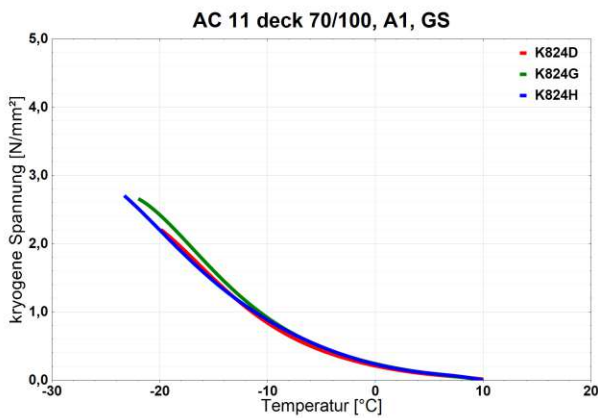


Abb. 8.16: kryogene Spannungsverlauf K824

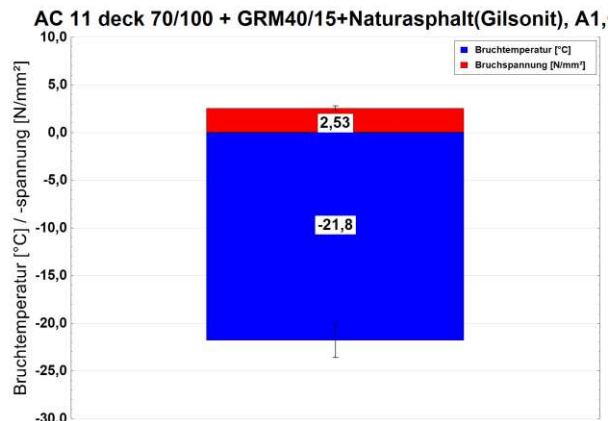


Abb. 8.17: Mittelwert der Bruchtemperatur K824

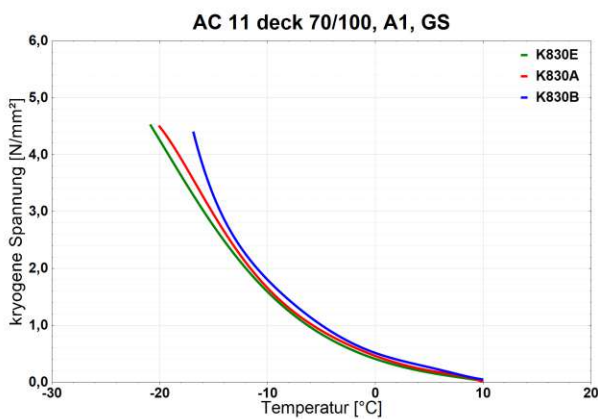


Abb. 8.18: kryogene Spannungsverlauf K830

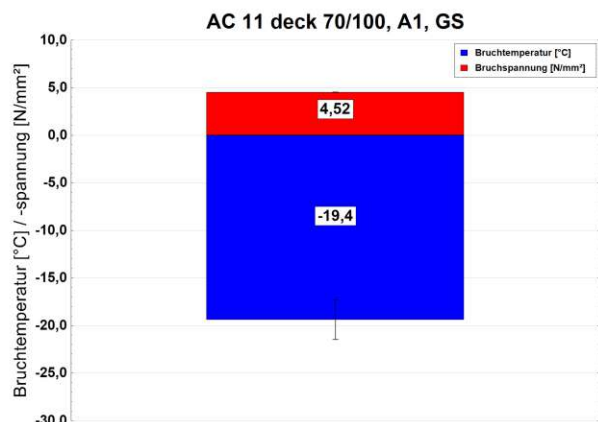


Abb. 8.19: Mittelwert der Bruchtemperatur K830

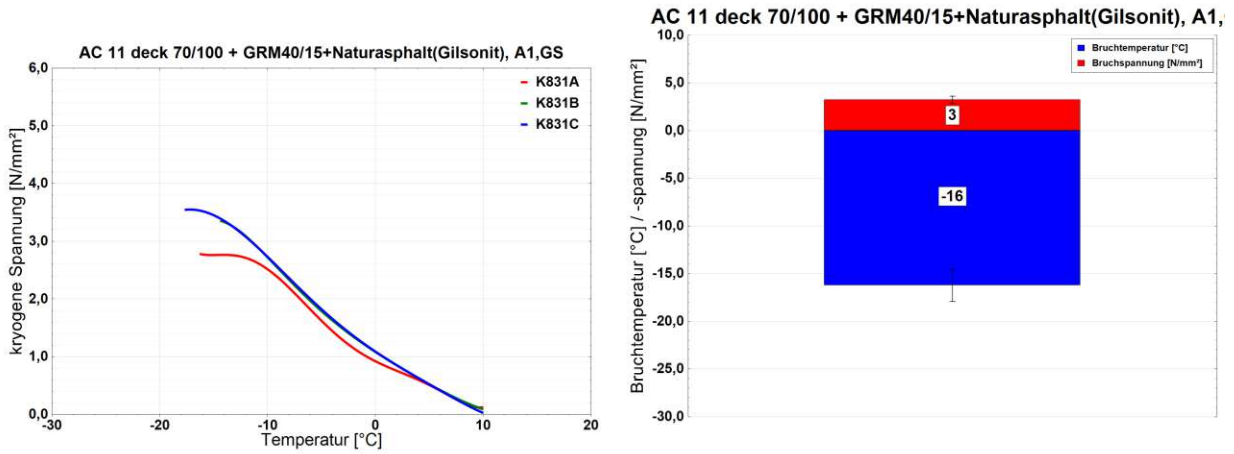


Abb. 8.20: kryogene Spannungsverlauf K831

Abb. 8.21: Mittelwert der Bruchtemperatur K831

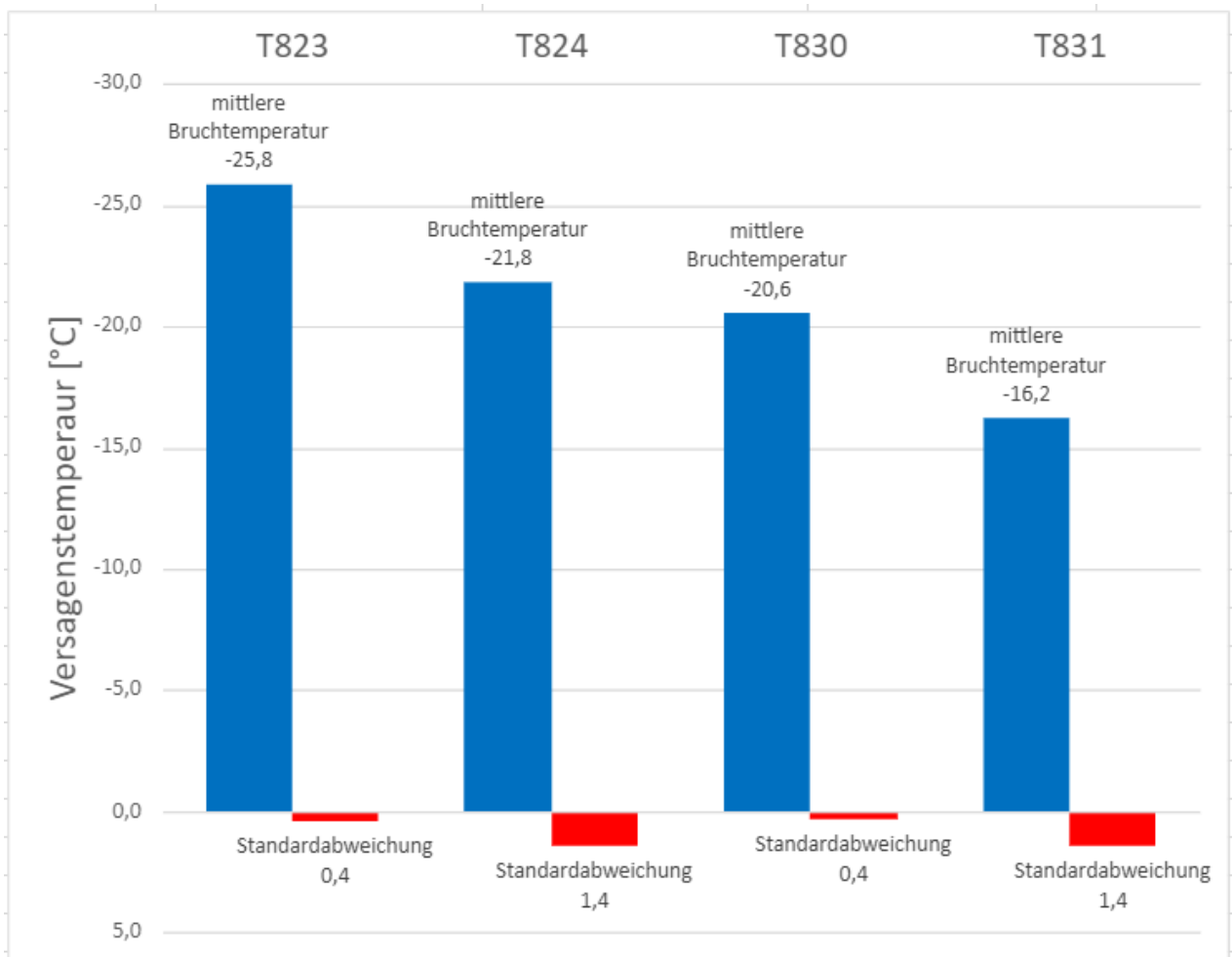


Abb. 8.22: effektive Versagenstemperatur beim Abkühlversuch und dessen Standardabweichung

8.5 Steifigkeitsnachweis(4PBB)

**Prüfbericht: Einwaage für die Herstellung von Probepplatten
am Walzsegmentverdichter**

**P404
Seite 1 von 1**

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	25.05.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Norm	EN 12697-35 (2016)

Angaben zum Asphalt

Laborcode	AS1598	Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100 + GRM40/15+Naturasphalt(Gilsonit), A1,GS
Ist-Rohdichte [g/cm ³]	2,520	Ziel-Hohlraumgehalt [V%]	4,0
Ziel-Raumdichte [g/cm ³]		2,419	

Angaben für die Probekörperherstellung

Plattenummer	Verdichter	Dicke [cm]/ Anzahl [Stk]	Masse pro Platte [g]	Gesamtmasse [g]
E1292	Freundl	8,0	25 160	25 160
			erforderliche Masse [g]	25 160
			aufgerundete Masse [g]	28 000

Einwaage

			Anteil [M%]	Masse [g]	
Bindemittel	Ziel-Bindemittelgehalt		5,60	1568,0	
	Einzuwägende Masse (Klebenbleiben am Mischer)			1602,5	
Zusatz	-		-	-	
Gestein	F053, G900, G902, G926, G964		94,40	26432,0	
	Laborcode	Material	Masse-%	Soll [g]	Ist [g]
Bitumen	B1253A	B1158A 70/100 + 20%Gilsonite +15% S254 GRM 40/15	5,60	1568,0	
Füller	F053	Kalksteinmehl	6,00	1680,00	
[0 - 2]	G900	Loja 0/2	35,00	9800,00	
[2 - 4]	G926	Loja 2/4	14,00	3920,00	
[4 - 8]	G902	Loja 4/8	18,00	5040,00	
[8 - 11]	G964	Loja 8/11	21,40	5992,00	
Summe			100,00	28 000,0	

Prüfbericht: Rohdichte, Abmessungen, Raumdichten und Hohlraumgehalte
P429-PR
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	19.07.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	David Valentin
Arbeitsanweisung	-
Normen	EN 12697-05:2010, EN 12697-8:2003, EN 12697-29:2003

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100, A1, GS	Laborcode	AS1611
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G901, G902, G903
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	70/100	Laborcode	B1158A

Prüfergebnisse

Rohdichte des Mischgutes						
Rohdichte [Mg/m ³]	2,524	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren			
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1298A	500,0	59,3	59,4	4349,0	2,498	1,0
E1298B	500,0	59,4	59,6	4378,2	2,498	1,0
E1298C	500,0	59,6	59,9	4418,2	2,497	1,1

**Prüfbericht: Rohdichte, Abmessungen, Raumdichten und
 Hohlraumgehalte**
**P429-PR
 Seite 1 von 1**

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	05.09.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	Armin Noei
Arbeitsanweisung	-
Normen	EN 12697-05:2010, EN 12697-8:2003, EN 12697-29:2003

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100, A1, GS	Laborcode	AS1631
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G901, G902, G903
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	70/100	Laborcode	B1158A

Prüfergebnisse

Rohdichte des Mischgutes						
Rohdichte [Mg/m ³]	2,524	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren			
Prüftemperatur [°C]	-	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1313A	500,0	59,5	59,9	4346,1	2,471	2,1
E1313B	500,0	59,8	59,5	4339,9	2,465	2,3
E1313C	500,0	59,5	60,2	4376,1	2,464	2,4

Prüfbericht: Rohdichte, Abmessungen, Raumdichten und Hohlraumgehälter
P429-PR
Seite 1 von 1

AuftraggeberIn	TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften - Straßenwesen
Datum	31.08.2022
Projekt	22407
ProjektleiterIn	Bernhard Hofko
PrüferIn	Thomas Riedmayer
Arbeitsanweisung	-
Normen	EN 12697-05:2010, EN 12697-8:2003, EN 12697-29:2003

Probedaten

Asphaltsorte	AC 11 deck 70/100 + GRM40/15+Naturasphalt(Gilsonit), A1,GS	Laborcode	AS1633
Gesteinsart	Loja	Laborcode(s)	G900, G926, G902, G964
Fremd-Füller	Kalksteinmehl	Laborcode(s)	F053
Zusatz	N/V	Laborcode(s)	N/V
Bitumen	B1158A 70/100 + 20%Gilsonite +15% S254 GRM 40/15	Laborcode	B1253A

Prüfergebnisse

Rohdichte des Mischgutes						
Rohdichte [Mg/m³]	2,524	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren			
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m³]	Hohlraumgehalt [V%]
E1315A	500,0	59,3	59,3	4316,3	2,463	2,4
E1315B	500,0	59,5	59,4	4336,1	2,463	2,4
E1315C	500,0	59,9	60,2	4348,6	2,450	2,9

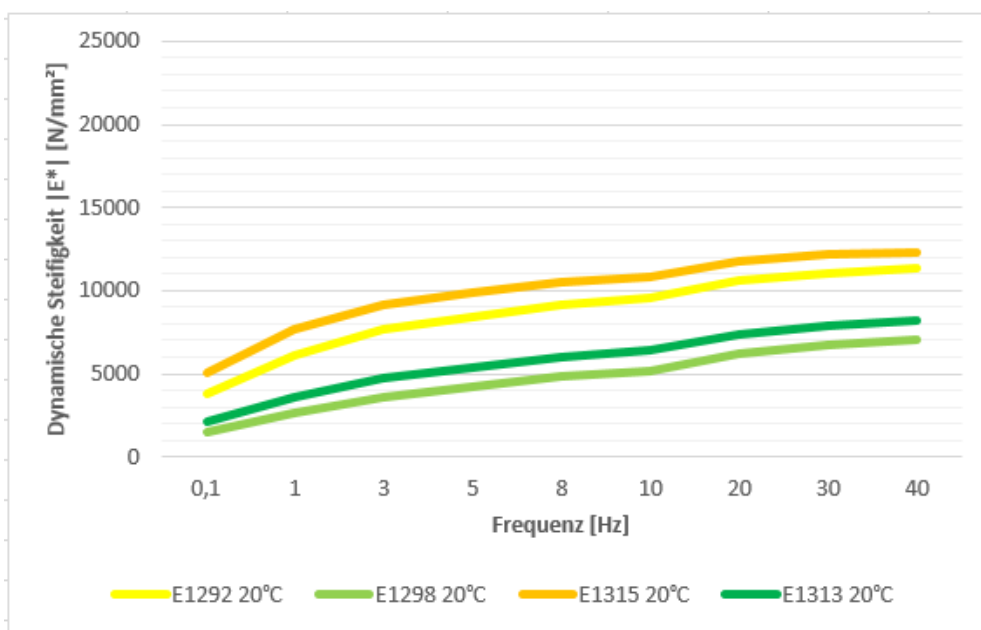


Abb. 8.23: Steifigkeiten $|E^*|$ der geprüften Asphaltmischungen bei 20°C

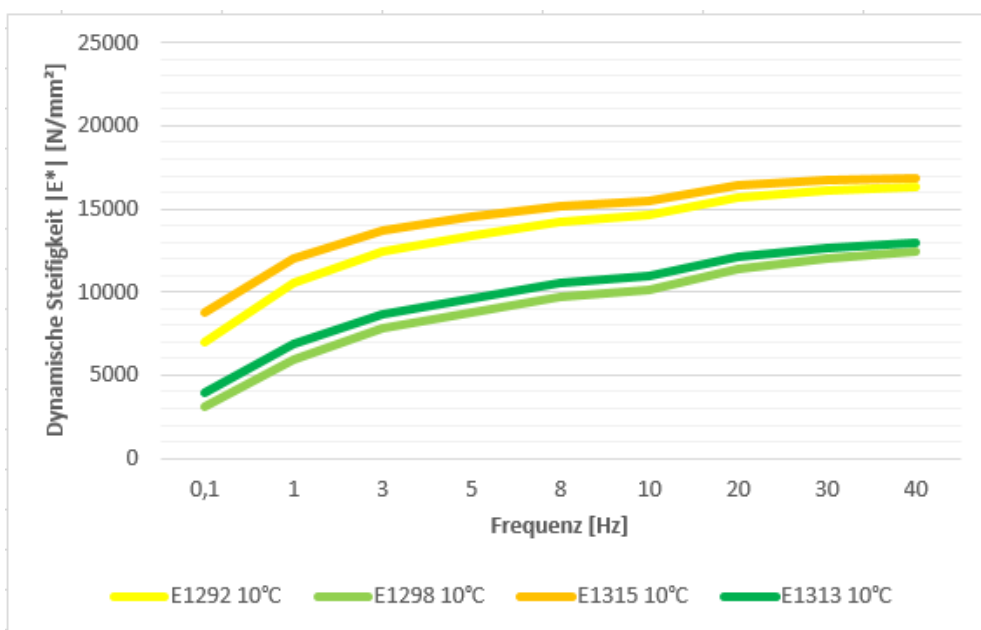


Abb. 8.24: Steifigkeiten $|E^*|$ der geprüften Asphaltmischungen bei 10°C

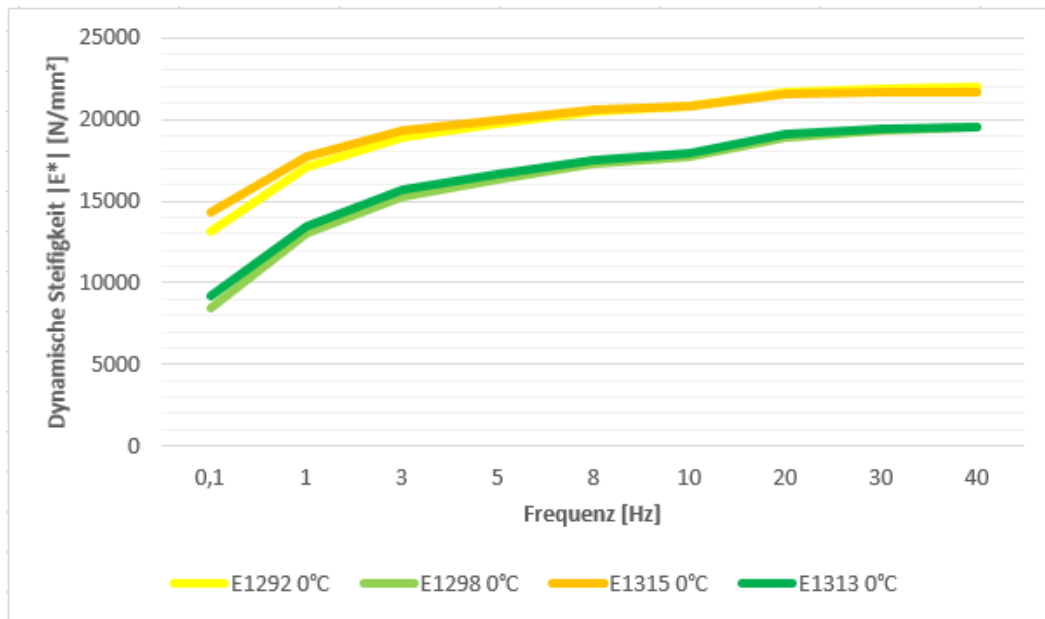


Abb. 8.25: Steifigkeiten $|E^*|$ der geprüften Asphaltmischungen bei 0°C

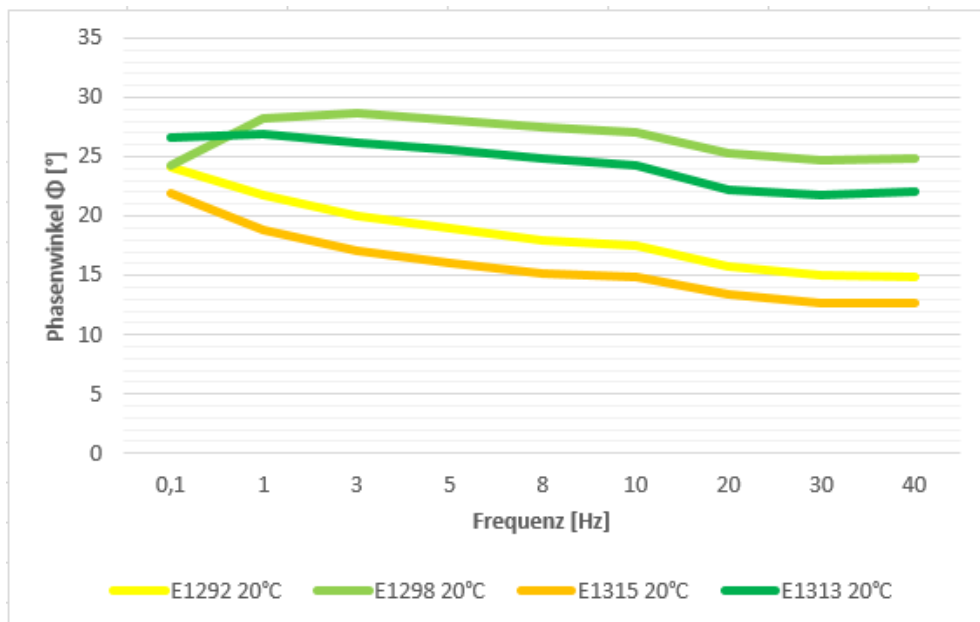


Abb. 8.26: Phasenwinkel Φ der geprüften Asphaltmischungen bei 20°C

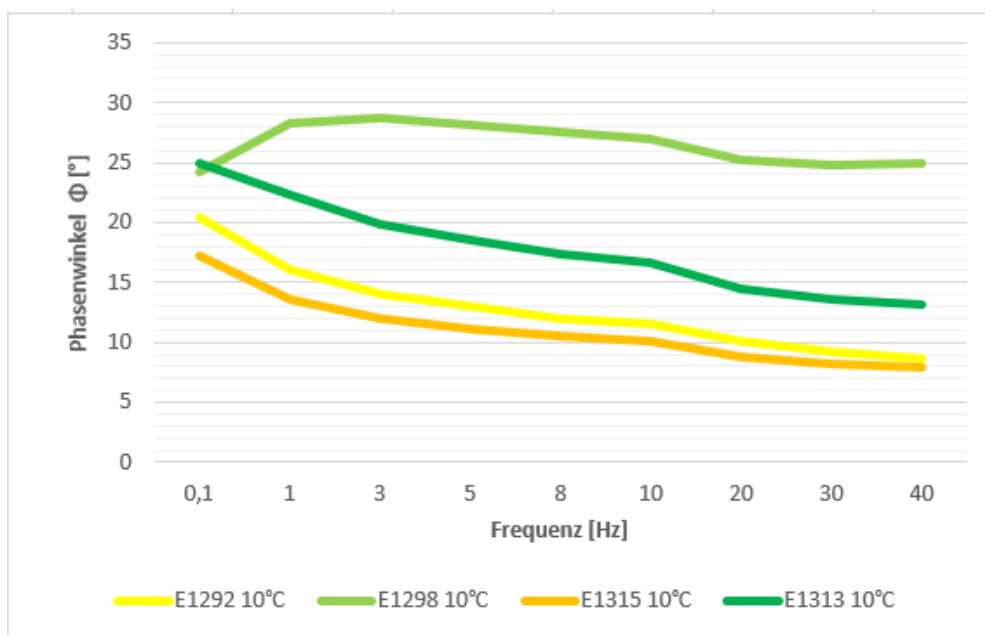


Abb. 8.27: Phasenwinkel Φ der geprüften Asphaltmischungen bei 10°C

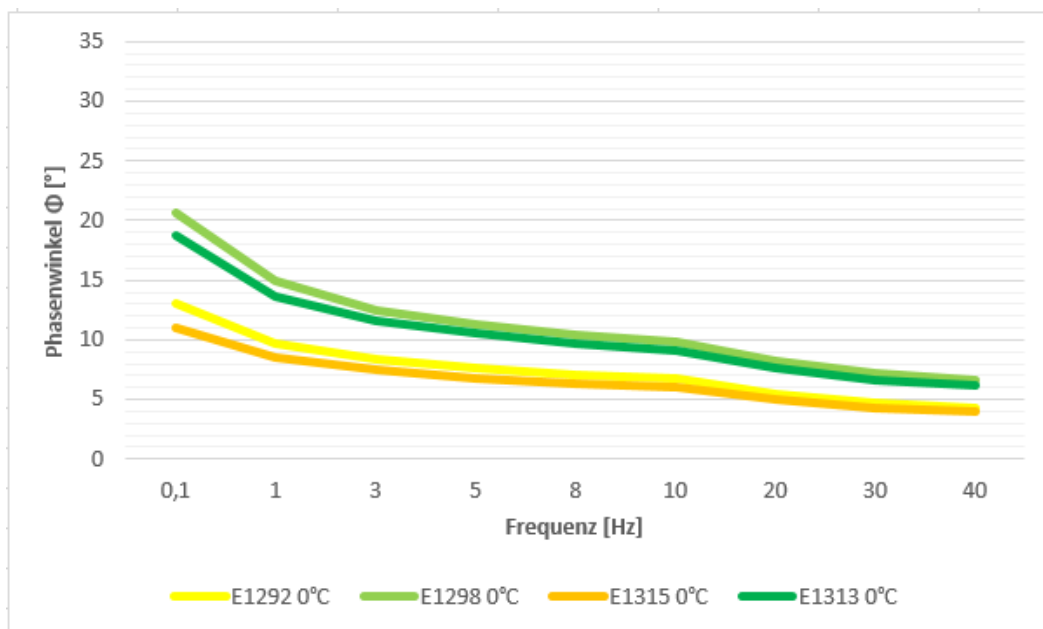


Abb. 8.28: Phasenwinkel Φ der geprüften Asphaltmischungen bei 0°C

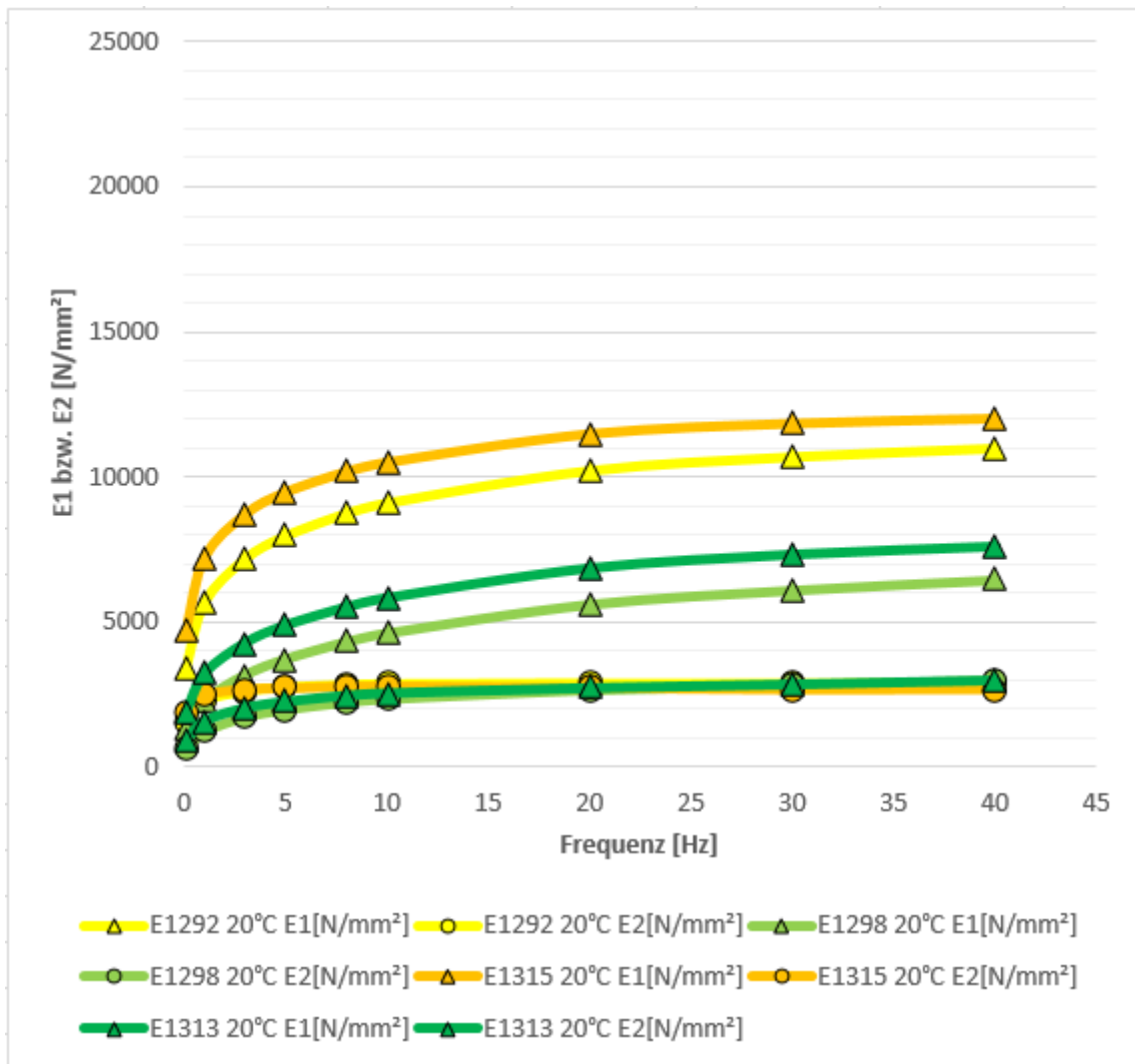


Abb. 8.29: Verlauf der elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteile der geprüften Asphaltmischungen bei 20°C

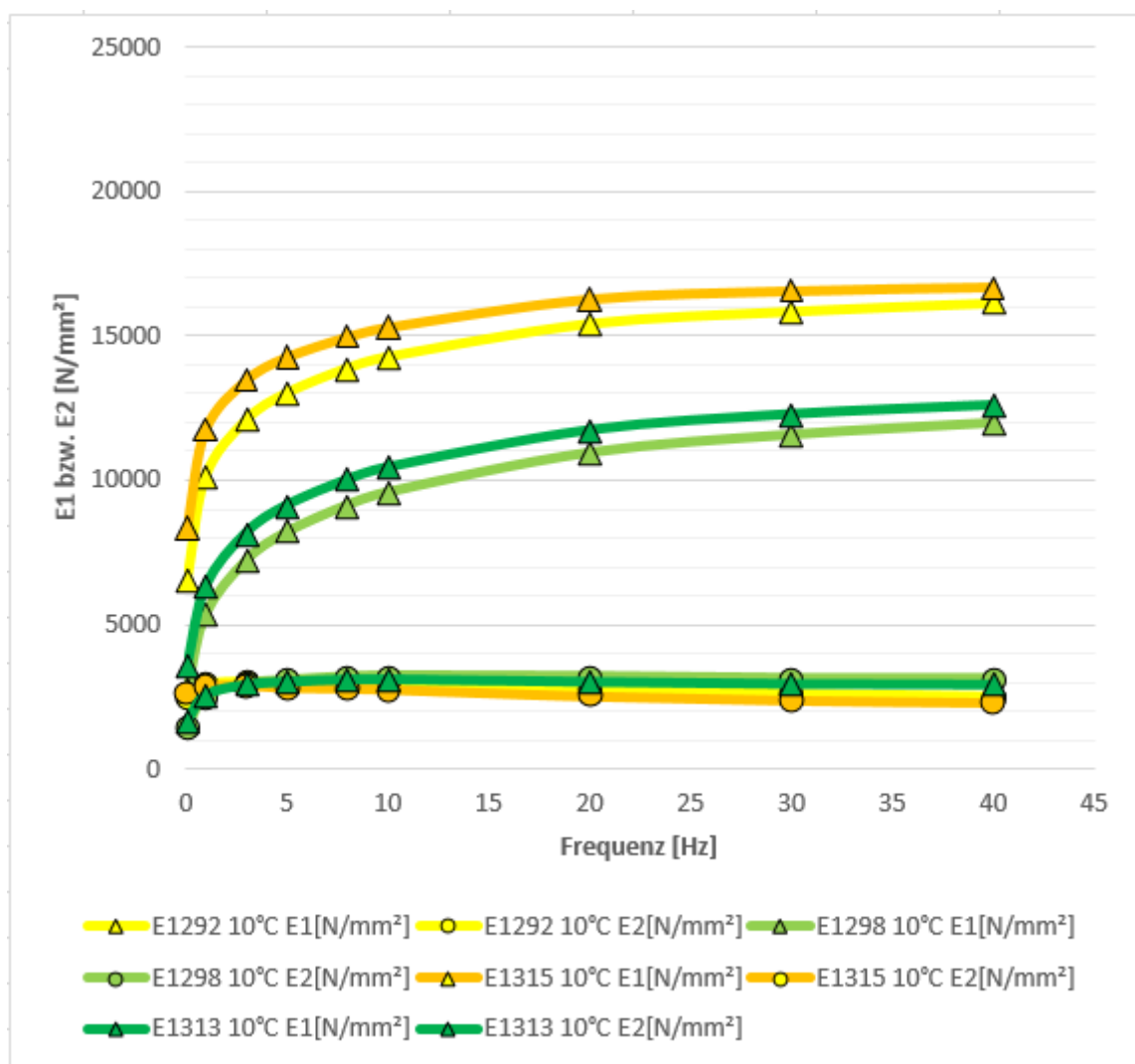


Abb. 8.30: Verlauf der elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteile der geprüften Asphaltmischungen bei 10°C

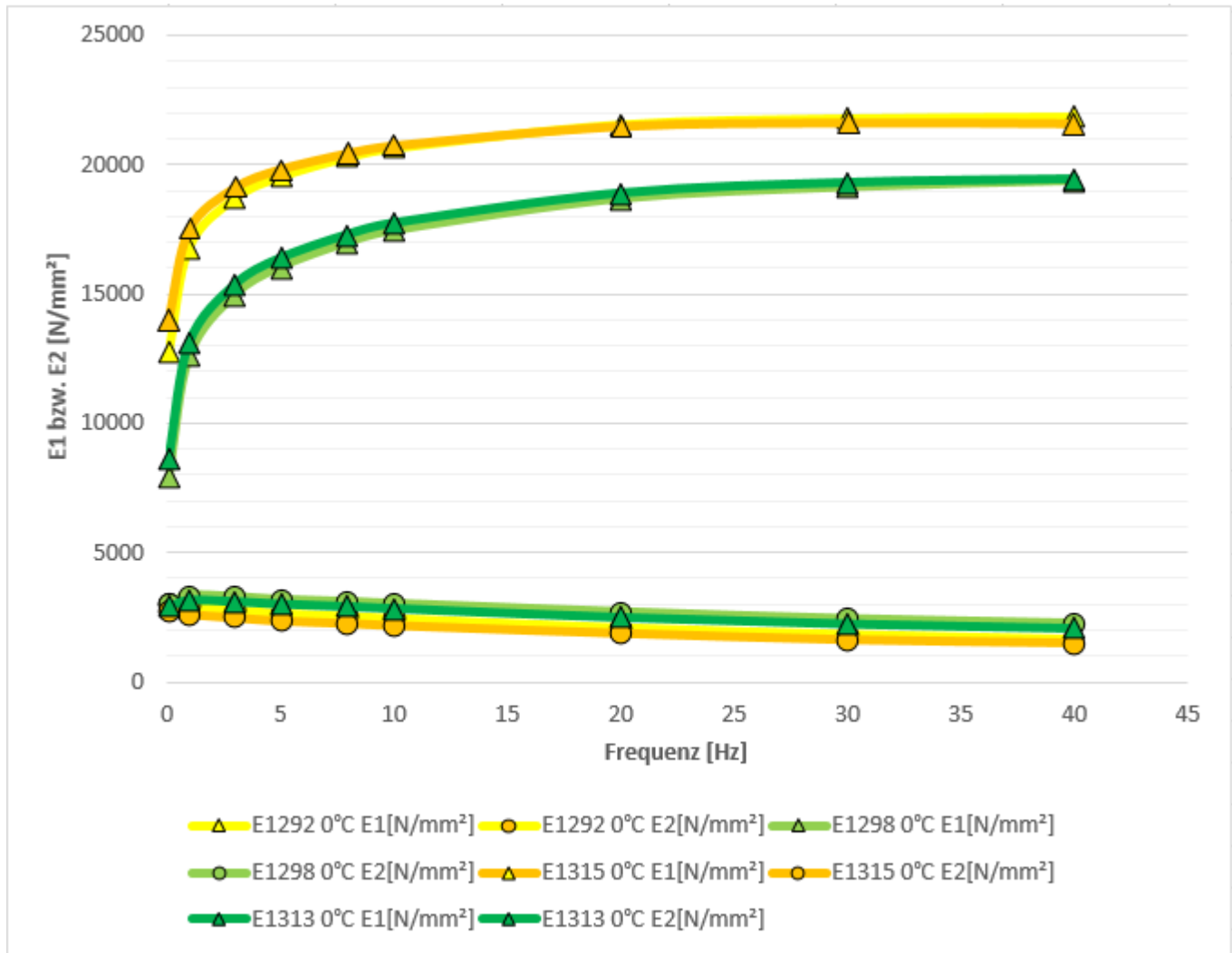


Abb. 8.31: Verlauf der elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteile der geprüften Asphaltmischungen bei 0°C

Literatur

- [1] H. et al. *Alles altert - Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt*. 2013. URL: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_222485.pdf (Zugriff am 05/2022).
- [2] N. et al. „Chemical Characterization of Gilsonite Bitumen“. In: *J Pet Environ Biotechnol* 5 (2014), S. 1–21.
- [3] P. et al. „Energy and Environmental Life Cycle Assessment of Sustainable Pavement Materials and Technologies for Urban Roads“. In: *Sustainability* 12 (Jan. 2020), S. 704. DOI: 10.3390/su12020704.
- [4] W. et al. *CEDR Transnational Road Research Programme Call 2012: Recycling: Road construction in a post-fossil fuel society*. 2013. URL: https://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/call_2012/recycling/earn/earn_d5_modelling.pdf (Zugriff am 05/2022).
- [5] A. Ameli, R. Babagoli, S. Asadi und N. Norouzi. „Investigation of the performance properties of asphalt binders and mixtures modified by Crumb Rubber and Gilsonite“. In: *Construction and Building Materials* 279 (2021), S. 122424. ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122424>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821001847>.
- [6] Ameri, Mansourian, Ashani und Yadollahi. *Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction*. 2011. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810004381> (Zugriff am 03/2011).
- [7] *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 35: Herstellung von Asphalt im Labor*. DIN, März 2014.
- [8] *Asphalt und Bitumen - Werkstoffe I*. ETH Zürich, März 2011.
- [9] D. Asphaltinstitut. *Entwicklung von Asphalten für zukünftige schwerste Verkehrsbelastungen*. URL: https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/downloads/forschungsberichte/18472-Forschungsbericht_Aspalthe_f%C3%BCr_schwerste_Verkehrsbelastung.pdf.
- [10] S. Badeli, F. Bilodeau, A. Carter und D. Perraton. „Comparison of Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) Results with Bending Beam Rheometer (BBR) Results to evaluate the thermal cracking properties of bituminous materials“. In: Juni 2018.
- [11] *Bitumen*. 2022. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Bitumen.html>.
- [12] D.Holde. *Kohlenwasserstofföle und Fette*. Springer Verlag, 1933.
- [13] *DIN EN 12607-1:2015-01 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren*; DIN, März 2014.
- [14] *DIN EN 12697-22 Asphalt–Prüfverfahren – Teil 22: Spurbildungstest*. DIN, - 2020.
- [15] *DIN EN 12697-26:2018 Asphalt–Prüfverfahren–Teil 26: Steifigkeit*. DIN, - 2018.

- [16] *DIN EN 12697-46 Asphalt-Prüfverfahren-Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tief-temperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen.* DIN, - 2020.
- [17] *DIN EN 1426 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration.* DIN, März 2015.
- [18] *DIN EN 1427 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren.* DIN, März 2015.
- [19] *DIN EN 14769 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV).* DIN, März 2022.
- [20] *EN 12697-29:2020 Bestimmung der Maße von Asphalt-Probekörpern.* DIN, - 2020.
- [21] *EN 12697-6:2020 Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern.* DIN, - 2020.
- [22] *EN 13399:2017 Bestimmung der Lagerbeständigkeit von modifiziertem Bitumen.* DIN, - 2017.
- [23] Euromark. *Die korrekte Anwendung von GILSONITE.* URL: <https://www.euromark-berlack.com/test/fachbereich-schwarz/additive-fuer-die-asphaltproduktion/gilsonite/die-korrekte-anwendung-von-gilsonite/> (Zugriff am 05/2022).
- [24] A. C. Falchetto, K. H. Moon und M. P. Wistuba. „Development of a simple correlation between bending beam rheometer and thermal stress restrained specimen test low-temperature properties based on a simplified size effect approach“. In: *Road Materials and Pavement Design* 18.sup2 (2017), S. 339–351. DOI: 10.1080/14680629.2017.1305147. eprint: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1305147>. URL: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1305147>.
- [25] *Gebrauchsverhaltenorientierte Bitumenprüfungen.* Wien, 1998.
- [26] Gestrada. *Asphalt Magazin Journal Ausgabe 159.* URL: https://gestrata.at/wp-content/uploads/2020/11/Gestrata_Journal_159-1.pdf.
- [27] B. e. a. Gubler Renken. „Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH – Initialprojekt“. In: 1 (2008), S. 7, 26–27, 170.
- [28] *Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH.* 2022. URL: <https://www.loja.at/#!/produkte>.
- [29] Infratest. *Spurbildungstestgerät Luft.* URL: https://infratest.net/wp-content/uploads/2021/04/20-4000_Spurbildungstestgera%CC%88t_0020-DE-202012.pdf.
- [30] T. Instruments. *Einführung in die Rheologie von Polymerschmelzen und deren Nutzung in der Polymerverarbeitung.* URL: https://www.labo.de/upload_weka/nwo/003/770/5_weg_e_zu_erfolgreicher_polymercharakterisierung_3770977.pdf.
- [31] J. Liu und P. Li. „Experimental Study on Gilsonite-Modified Asphalt“. In: *Airfield and Highway Pavements*, S. 222–228. DOI: 10.1061/41005(329)20. eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41005%28329%2920>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41005%5C%28329%5C%2920>.
- [32] H. van Loon. „Asphalt Stiffness Master Curves“. In: Sep. 2001.
- [33] M. A. Magnini. „Tieftemperatur-Charakterisierung von Bitumen mit dem 4mm-DSR und Zusammenhang mit der chemischen Zusammensetzung“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2021.
- [34] R. und Manke. *Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel*. URL: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2148/file/07.0247.pdf> (Zugriff am 05/2022).

- [35] D.-I. D. Morgenbesser. *FSV-aktuell STRASSE November 2016*. 2016. URL: <http://www.fsv.at/publikationen/getfsvaktuell.aspx?ID=afda7a95-9a3f-4227-85e5-f3b818674e12>.
- [36] *Pavement Design and Modelling*. TU Wien, Apr. 2021.
- [37] *Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät* *W.SVFreundl.* DIN, - 2010.
- [38] *Prüfmaschine: Tieftemperatur - Abkühlversuch*. DIN, - 2019.
- [39] *Prüfung von ausgewählten Eigenschaften an Gussasphalten unterschiedlicher Zusammensetzung*. Berlin, Juli 2017.
- [40] *Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 27: Probenahme*. DIN, März 2014.
- [41] *Road Pavement Materials*. TU Wien, Apr. 2021.
- [42] Schmalz. *Technische Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen TL RmB-StB By.* 2010. URL: https://www.gesetze-bayern.de/Content/Resource?path=resources%2FBayVwV236756_BayVV913-I-1082-A001.PDF (Zugriff am 05/2022).
- [43] R. simplyscience. *Wie entsteht Erdöl?* 2012. URL: <https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/wie-entsteht-erdoel>.
- [44] *Straßenbau und Straßenerhaltung*. TU Wien, Apr. 2020.
- [45] *Straßenbautechnik / Teil 1*. Institut für Straßenwesen, Uni Siegen, Okt. 2018. URL: https://www.bau.uni-siegen.de/subdomains/strassenbau/lehrinhalte/ungeschuetzt/20180903_skript_strassenwesenteil_1_3_sept_2018_mit_quellen.pdf.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Materialverhalten von Asphalt, TU Wien	9
2.2	Vom Rohöl zum Bitumen, Partl.M,2011	10
2.3	Gilsonitpulver	10
2.4	gummi-modifiziertes Bitumengranulat GRM 40/15	12
2.5	oben: Verlauf der Viskosität; mitte: Verlauf der Gummipartikelgröße; unten: Veränderung der Bitumenmatrix	13
3.1	Alterungsverlauf von Bitumen, TU Wien, 2020	15
3.2	Schematische Darstellung eines RTFOT-Ofens, Litzka & Strobl, 1998	16
3.3	Schematische Darstellung eines Penetrationstests, Litzka & Strobl, 1998	17
3.4	Beispiel einer PG Karte mit einer Zuverlässigkeit von 50%, Vereinigte Staaten, Litzka & Strobl, 1998	19
3.5	Vektordiagramm, Litzka et al., 1998	20
3.6	Arbeitsweise DSR, Litzka et al. 1998	20
3.7	kleines Spurbildungsgerät, TU Wien	22
3.8	Walzsegmentverdichter, TU Wien	22
3.9	Prüfeinrichtung (links) und grafische Darstellung der Zugspannung und Dehnung in Relation zur Umgebungstemperatur, TU Wien	23
3.10	Darstellung der Phasenverzögerung, TU Wien, 2020	24
3.11	Anordnung des Prüfkörpers in der Prüfmaschine, TU Wien	24
4.1	Sieblinie AC 11, TU Wien, 2022	26
4.2	Komponenten im Wärmeschrank	29
30		
4.5	E30waage des Bindemittels und Beigabe zur Mischtrommel	31
4.6	Walzsegmentverdichter	31
4.7	Vorbereitete Platte für die Spurbildungsversuche	31
4.8	Einwaage des Mischguts, TU Wien	32
4.9	Wasserbad, TU Wien	32
4.10	Hilfsmittel zum Entnehmen und Zerteilen der Probe, TU Wien	33
4.11	Pyknometer	33
5.1	Prüfeinrichtung des Erweichungspunktes nach Ring und Kugel	37
5.2	Prinzipskizze eines Rotations-Viskosimeters, Litzka et al. 1998	39
5.3	Aluminiumhülse und Spindel, Litzka et al. 1998	39
5.4	Messprinzip BBR, Litzka et al. 1998	40
5.5	logarithmische Graphen, Litzka et al. 1998	40
5.6	RTFOT Prüfeinrichtung Fa. Infratest	40
5.7	Schematische Darstellung eines PAV-Kessels, Litzka & Strobl, 1998	41
5.8	Prüfvorrichtung PAV Fa. Prentex	41
5.9	Spurbildungsmaschine Fa. Infratest	42
5.10	Verklebte Probekörper auf Einspannbett	43
5.11	obere und untere Einspannmutter, TU Wien, 2019	43

5.12	Klemmen- und Streifenanordnung am Prüfkörper	44
5.13	Hilfsmittel für den 4PB-Versuch	45
5.14	Vor dem Einbau des Prüfkörpers	45
6.1	Nadelpenetration der untersuchten Bindemittel in ungealterten und RTFOT-gealterten Zustand	47
6.2	Erweichungspunkt mit Ring und Kugel in ungealterten und RTFOT-gealterten Zustand	48
6.3	BBR, Temperatursweep (S,m-Wert)	50
6.4	RV-Viskositätsmessung für B1253	50
6.5	Ermittlung des "High PG"	52
6.6	Die PAV-gealterten DSR Versuche zum Vergleich des Ermüdungsverhaltens	53
6.7	Gemittelte Bruchtemperaturen und -spannungen der Asphaltprobekörper	56
6.8	Dynamische Steifigkeit bei 1Hz; gelb+orange modifiziert und grün+dunkelgrün unmodifiziert	57
6.9	Phasenwinkel bei 1Hz; gelb+orange modifiziert und grün+dunkelgrün unmodifiziert	58
8.1	Mengenermittlung zur Plattenherstellung	65
8.2	DSR-Temperatursweep des B1158 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 82 und 40 °C	66
8.3	DSR-Temperatursweep des B1158 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 46 und 4 °C	67
8.4	DSR-Temperatursweep des B1253 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 82 und 40 °C	67
8.5	DSR-Temperatursweep des B1253 bei 1,59 HZ (G^* , δ) im Temperaturbereich 46 und 4 °C	68
8.6	DSR-Temperatursweep des B1158 bei 1,59 HZ ($G/\sin\delta$) im Temperaturbereich 82 und 40 °C	68
8.7	DSR-Temperatursweep des B1158 bei 1,59 HZ ($G/\sin\delta$) im Temperaturbereich 46 und 4 °C	69
8.8	DSR-Temperatursweep des B1253 bei 1,59 HZ ($G.\sin\delta$) im Temperaturbereich 82 und 40 °C	69
8.9	DSR-Temperatursweep des B1253 bei 1,59 HZ ($G.\sin\delta$) im Temperaturbereich 46 und 4 °C	70
8.10	Black Diagramm für B1158	70
8.11	Black Diagramm für B1253	71
8.12	T939 und T940, Spurrinntiefe nach 20000 Überrollungen	72
8.13	T942 und T943, Spurrinntiefe nach 3000 Überrollungen	72
8.14	kryogene Spannungsverlauf K823	82
8.15	Mittelwert der Bruchtemperatur und -spannung K823	82
8.16	kryogene Spannungsverlauf K824	82
8.17	Mittelwert der Bruchtemperatur K824	82
8.18	kryogene Spannungsverlauf K830	82
8.19	Mittelwert der Bruchtemperatur K830	82
8.20	kryogene Spannungsverlauf K831	83
8.21	Mittelwert der Bruchtemperatur K831	83
8.22	effektive Versagenstemperatur beim Abkühlversuch und dessen Standardabweichung	83
8.23	Steifigkeiten $ E^* $ der geprüften Asphaltmischungen bei 20°C	89
8.24	Steifigkeiten $ E^* $ der geprüften Asphaltmischungen bei 10°C	89

8.25	Steifigkeiten $ E^* $ der geprüften Asphaltmischungen bei 0°C	90
8.26	Phasenwinkel Φ der geprüften Asphaltmischungen bei 20°C	90
8.27	Phasenwinkel Φ der geprüften Asphaltmischungen bei 10°C	91
8.28	Phasenwinkel Φ der geprüften Asphaltmischungen bei 0°C	91
8.29	Verlauf der elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteile der geprüften Asphaltmischungen bei 20°C	92
8.30	Verlauf der elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteile der geprüften Asphaltmischungen bei 10°C	93
8.31	Verlauf der elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteile der geprüften Asphaltmischungen bei 0°C	94

Tabellenverzeichnis

3.1	Performance Grade nach SUPERPAVE	18
3.2	Performance Grade einiger Stationen Österreichs	19
4.1	Testresultate Eigenschaften Gilsonit, Research Institute of Petroleum(RIPI), 2018	27
4.2	Eigenschaften, American Gilsonite Company, 2019	27
4.3	Kenngrößen gummimodifizierter Bitumengranulat der Sorte 40/15 und 40/20, [42], 2010	28
4.4	Prüfprogramm für die Bindemittel und die zugehörigen Laborcodes	34
4.5	Prüfprogramm für die Asphaltprobekörper und die zugehörigen Laborcodes . . .	35
6.1	Nadelpenetration der untersuchten Bindemittel	46
6.2	Erweichungspunkt mit Ring und Kugel der untersuchten Bindemittel	47
6.3	PG Einteilung der untersuchten Bindemittel	52
6.4	Ergebnisse des Spurbildungsversuchs	55