

Diploma Thesis

Durability of asphalt mastic

Effects of filler and aging on fatigue strength

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

DIPLOMARBEIT

Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix

Auswirkungen des Füllers und der Alterung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit

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

von

Ing. Martin Pfanner, BSc

Matr.Nr.: 0925865

unter der Anleitung von

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

und Mitbetreuung von

Projektass. Dipl.-Ing. **Michael Steineder, BSc**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Gußhausstraße 28/230/3, A-1040 Wien

Wien, im Februar 2020

KURZFASSUNG

Ungleich der thermischen Rissbildung, den Spurrinnen oder den ermüdungsbedingten Netzsissen, kann die Ursache von Korn- und Schollenausbrüche nicht immer eindeutig einer klimatischen oder verkehrsinduzierten Belastung zugeordnet werden. Auf Basis vorhergegangener Untersuchungen, ist das mangelnde Gebrauchsverhalten von Asphaltmastix (Bitumen + Füller) als mögliche Schadensursache anzusehen. Aus diesem Grund ergab sich der Anlass zur Untersuchung der Auswirkungen der Füller & Feinanteile, sowie der Alterung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit von Asphaltmastix.

Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wurden Asphaltmastixproben mit fünf verschiedenen Füller- & Feinanteilgemischen und zwei verschiedenen Bitumensorten hergestellt. Die Mastixproben unterschieden sich lediglich in der Wahl der Gesteins- und Bitumensorte. Bindemittel-Füller-Verhältnis sowie die verwendeten Korngruppen waren bei allen Proben ident. Mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers wurden diese Proben einer Ermüdungsprüfung mit vorgegebener Schubspannung unterzogen. Dabei wird ein elektrisches Drehmoment auf Basis der vorgegebenen Schubspannung angefahren. Währenddessen werden der Betrag des komplexen Schubmoduls und der Phasenverschiebungswinkel der Mastixprobe bis zum Versagen berechnet und aufgezeichnet. Durch Mehrfachbestimmung auf unterschiedlichen Spannungsstufen konnten Wöhlerkurven ermittelt werden, die für den Vergleich der Proben herangezogen wurden. Zwei Mastixproben wurden für die Untersuchungen der Auswirkungen der Alterung herangezogen. Dafür wurden die zwei Proben labortechnisch mit jeweils zwei verschiedenen Verfahren gealtert und anschließend mit dem Dynamischen Scherrheometer einer Ermüdungsprüfung unterzogen.

Um die Auswirkungen der Füller & Feinanteile zu untersuchen, wurden die Sieblinien ermittelt, um daraus unterschiedliche Parameter zu berechnen, die mit den Ermüdungsfestigkeiten verglichen wurden. Es konnte festgestellt werden, dass ein Zusammenhang zwischen den sieblinienrelevanten Faktoren und der Ermüdungsfestigkeit besteht. Diese Aussage konnte in dieser Arbeit nur qualitativ getroffen werden. Eine Korrelationsanalyse konnte aufgrund der geringen Stichprobenzahl nicht durchgeführt werden.

Bei den gealterten Proben konnten keine Aussagen betreffend der Auswirkungen der labortechnischen Alterung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit getroffen werden. Grund dafür war, dass auf Basis der Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen eine Ertüchtigung der Proben erfolgte. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Alterung negative Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten des Bitumens hat. Ursachen dieses Phänomens könnten in den prüftechnischen Randbedingungen, sowie in der Veränderung des Bitumen-Füller-Verhältnisses aufgrund der labortechnischen Alterung liegen.

ABSTRACT

Unlike thermal cracking, ruts or fatigue-related network cracks, the cause of raveling cannot be clearly attributed to climatic or traffic-induced stress in all cases. Previous investigations consider the lack of performance of asphalt mastic (bitumen + filler) as a possible cause of damage, which created a need to investigate the effects of fillers and fines as well as aging in relation to the fatigue resistance of asphalt mastic.

In this work, asphalt mastic samples were prepared with five different filler & fines mixtures and two different types of bitumen. The only difference between the mastic samples was in the choice of the rock species and the bitumen type. The binder-filler ratio and the grain groups used were identical in all samples. Using the Dynamic Shear Rheometer, these samples were subjected to a fatigue test with specified shear stress. The test is based on the application of an electric torque, due to the specified shear stress. Meanwhile absolute value of the complex shear modulus and the phase angle of the mastic specimen are calculated and recorded until failure. By multiple determination at the different stress level, Wöhler curves could be determined, which were used for the comparison of the samples. Two mastic samples were used to investigate the effects of ageing. For this purpose, the two samples were each aged in the laboratory using two different methods and then subjected to a fatigue test with the dynamic shear rheometer.

In order to investigate the effects of the filler & fines, the grading curves were determined in order to calculate different parameters, which were compared with the fatigue strengths. A link was discovered between the grading curve relevant factors and the fatigue stress, however a correlation analysis could not be performed in this work due to a small number of samples.

With the aged samples, no statements could be made regarding the effects of laboratory ageing on fatigue strength. The reason for this was that based on the results of the fatigue tests, the samples exhibited improved fatigue resistance, despite the known negative effect of aging on the performance of the bitumen. Causes of this phenomenon could lie in the test conditions, as well as in the change of the bitumen-filler ratio due to laboratory ageing.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Wissenschaftliche Fragestellung	1
1.2.1	Sieblinien- und Kornformrelevante Faktoren	1
1.2.2	Bitumenalterung.....	2
1.3	Zielsetzung	2
1.3.1	Sieblinienrelevante Faktoren	2
1.3.2	Bitumenalterung.....	3
2	TECHNISCHE GRUNDLAGEN	4
2.1	Asphalt.....	4
2.2	Bitumen.....	4
2.2.1	Allgemeines	4
2.2.2	Chemischer Aufbau und Strukturmodell.....	5
2.2.3	Mechanische Eigenschaften.....	6
2.2.4	ALTERUNG	9
2.3	Gesteinskörnung.....	12
2.3.1	Allgemeines	12
2.3.2	Physikalische Eigenschaften	13
2.3.3	Sieblinienrelevante Eigenschaften	13
2.3.4	Kornformrelevante Eigenschaften	15
2.4	Mehrskalenmodell des Asphalts.....	15
2.5	Asphaltmastix.....	16
2.6	Materialermüdung	17
2.6.1	Ermüdungsversuch auf Asphaltebene.....	17
2.6.2	Ermüdungsversuch auf Bitumen- bzw. Mastixebene	17
3	MATERIALAUSWAHL UND AUSGANGSSTOFFE	21
3.1	Bitumen.....	21
3.2	Füller und Feinanteile.....	21
3.2.1	Reindichte mittels Helium Pyknometer.....	23
3.3	Referenzmischgut	23
3.3.1	Sieblinie	23
3.3.2	Bindemittelgehalt	27
3.3.3	Asphaltzusammensetzung	28
3.4	Mastix	29
4	PRÜFMETHODIK.....	31
4.1	Das Prüfgerät.....	31
4.2	Prüfparameter	32
4.2.1	Prüftemperatur und Belastungsfrequenz.....	32
4.2.2	Probekörpergeometrie	32

4.2.3	Schubspannung	33
4.2.4	Probekörpervorbereitung	34
5	PRÜFPROGRAMM	35
5.1	Mastix Ermüdungsprüfungen	35
6	ERGEBNISSE UND INTERPRETATION.....	39
6.1	Ermüdungskurve	39
6.2	Wöhlerkurve.....	40
6.3	Ermüdungsprüfungen der ungealterten Mastixproben.....	40
6.3.1	Einfluss der Gesteinssorte.....	42
6.3.2	Einfluss der Sieblinienrelevanten Eigenschaften	44
6.4	Ermüdungsprüfungen der gealterten Mastixproben.....	48
6.4.1	Einfluss der prüftechnischen Parameter	51
6.4.2	Einfluss des Bindemittel-Füller & Feinanteil-Verhältnis.....	52
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	53
7.1	Zusammenfassung.....	53
7.1.1	Einfluss der Gesteinssorte.....	53
7.1.2	Einfluss der Sieblinienrelevanten Eigenschaften	53
7.1.3	Einfluss der prüftechnischen Parameter	54
7.1.4	Einfluss des Bindemittel-Füller & Feinanteil-Verhältnis.....	54
7.2	Ausblick	54

1 EINLEITUNG

1.1 ALLGEMEINES

In den letzten Jahren wurden in Österreich vermehrt frühzeitige Schäden in Form von Korn- und Schollenausbrüchen in Asphalt Deckschichten beobachtet. Ungleich der thermischen Rissbildung, den Spurrinnen oder den ermüdungsbedingten Netzzissen, kann die Ursache von Korn- und Schollenausbrüchen nicht eindeutig einer klimatischen oder verkehrsinduzierten Belastung zugeordnet werden. Auf Basis vorhergegangener Untersuchungen ist das mangelnde Gebrauchsverhalten von Asphaltmastix als mögliche Schadensursache anzusehen. Als Asphaltmastix wird ein Gemisch aus Bitumen und mineralischem Gesteinsmehl bezeichnet. Eine unzureichende Qualität der Mastixkomponenten oder mangelnde Kompatibilität von Bitumen und Gestein kann Auswirkungen wie eine reduzierte Kornbindung oder eine verringerte Festigkeit zufolge haben [1].

Im Zuge des Forschungsprojekts „Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix - Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriteriums“ [1] am Institut für Verkehrswissenschaften wurde eine standardisierte Prüfmethode zur Bewertung der Mastixqualität entwickelt [1]. Diese Prüfmethode soll herangezogen werden, um Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix zu erforschen. In weiterführenden Untersuchungen ist kann die Korrelation zu den gebrauchsverhaltensorientierten Prüfmethoden für Asphalt erforscht werden. Dadurch könnte in Zukunft die Ermüdung auf Mastixebene mit Hilfe eines dynamischen Scherrheometers als einziges Prüfgerät abgeschätzt werden. Das hätte eine erhebliche Vereinfachung des Prüfaufwands sowie eine Einsparung des Materialbedarfs für die Probekörperherstellung zufolge.

1.2 WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNG

Um den Einfluss der Mineralogie des Gesteinsmehls im Asphaltmastix in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen, wurden im oben genannten Forschungsprojekt insgesamt 14 Mastixproben mit verschiedenen Füller (Gesteinsmehl $< 63 \mu\text{m}$) und Feinanteilen (Gesteinsmehl $< 125 \mu\text{m}$ und $> 63 \mu\text{m}$) beprobt. Eine Gegenüberstellung der erzielten Lastwechsel bei einer konstanten Schubspannung von 300 kPa zeigt, dass eine alleinige Betrachtung der Mineralogie zur Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit nicht ausreicht [1].

1.2.1 SIEBLINIEN- UND KORNFORMRELEVANTE FAKTOREN

Bei Hospodka [1] wurden in einer Korrelationsanalyse verschiedene Einflussvariablen einer Zielvariablen (Ermüdungsfestigkeit bei einer Schubspannung von 300 kPa) gegenübergestellt und das jeweilige Bestimmtheitsmaß R^2 und das Signifikanzniveau berechnet. Die Einflussvariablen waren folgende: Dichte, Hohlraumgehalt, Quarzgehalt, Karbonatgehalt, Korngröße bei 10 % Siebdurchgang d_{10} , Korngröße bei 30 % Siebdurchgang d_{30} , Korngröße

bei 60 % Siebdurchgang d_{60} , Ungleichförmigkeitszahl C_u , Krümmungszahl C_c , Anteil $< 6,3 \mu\text{m}$, Anteil $< 20 \mu\text{m}$, Anteil $< 63 \mu\text{m}$ und Anteil $< 125 \mu\text{m}$. Es wurde festgestellt, dass die Sieblinienrelevanten Faktoren, genauer Anteil $< 20 \mu\text{m}$ und Korngröße bei 60 % Siebdurchgang einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben. Das Bestimmtheitsmaß R^2 betrug bei beiden Faktoren 0,5. Somit lässt sich mit diesen Einflussfaktoren nur ein Teil der Ermüdungsfestigkeit erklären. Ein möglicher Faktor mit signifikantem Einfluss ist die Kornform [1].

1.2.2 BITUMENALTERUNG

Eines der Hauptkomponenten des Asphaltbetons ist Bitumen. Bitumen ist ein Mineralölprodukt, welches sich aus komplexen organischen Verbindungen zusammensetzt. Während dem Mischen, dem Einbau und der Nutzungsdauer des Asphaltbetons werden die Komponenten einer Temperaturbelastung und UV-Strahlung ausgesetzt. Diese Belastung führt beim Bitumen zu einer Oxidation, die eine Veränderung der chemischen Struktur und somit der mechanischen Eigenschaften zur Folge hat [2].

Bisher werden Ermüdungsversuche am Dynamischen Scherrheometer an ungealterten Bitumen- und Asphaltmastix-Proben durchgeführt. Im Zuge dieser Diplomarbeit soll die Auswirkung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht werden.

1.3 ZIELSETZUNG

Anhand von Versuchen am Dynamischen Scherrheometer sollen verschiedene Mastixproben, die sich nur in der Bindemittel- und Gesteinssorte unterscheiden, untersucht werden. Dabei sollen die Ermüdungsfestigkeiten ermittelt werden. Durch das konstante Bindemittel-Füller-Verhältnis soll eine Vergleichsbasis geschaffen werden.

Anhand der Sieblinien- und Kornformrelevanten Faktoren sowie der Alterungseffekte sollen die zu erwartende Varianz der Ermüdungsfestigkeiten näher untersucht werden.

1.3.1 SIEBLINIENRELEVANTE FAKTOREN

Gem. EN 933-10:2009 handelt es sich beim Füller um eine Gesteinskörnung, deren überwiegender Teil durch ein $0,063 \text{ mm}$ Sieb hindurchgeht [3]. Das heißt, der Füller entspricht einer Korngruppe mit erlaubtem Überkorn.

Durch Siebung der Ausgangsstoffe soll sichergestellt werden, dass keine ungünstigen mineralischen Bestandteile $> 125 \mu\text{m}$ im Füller und Feinanteil vorhanden sind. Auf Basis eines festgelegten Referenzmischguts (AC 11 deck A1) sollen die Mastixproben im selben Bitumen-Füller-Verhältnis hergestellt werden.

1.3.2 BITUMENALTERUNG

Durch labortechnische Alterung soll eine Langzeitalterung am Asphaltmastix simuliert und anschließend mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers untersucht werden. Somit sollen die Auswirkungen der Mastixalterung auf die Ermüdungsfestigkeit analysiert werden. Die Alterung erfolgt zum einen mit einer, am Institut für Verkehrswissenschaften entwickelten Methode, die VBA – „*Viennese Binder Aging*“ Methode [7], eine Weiterentwicklung des Alterungsverfahrens VAPro – „*Viennese Aging Procedur*“ [4]. Zum anderen soll die Alterung in Anlehnung an das kombinierte RTFOT- und PAV- Verfahren erfolgen [5,6].

2 TECHNISCHE GRUNDLAGEN

2.1 ASPHALT

Asphalt ist ein technisch hergestelltes, homogenes Gemisch aus groben und feinen Gesteinskörnungen, Füller und Bitumen als Bindemittel. Das Haupteinsatzgebiet von Asphalt ist die Straßenbefestigung [8].

Im Allgemeinen bestehen technische Asphalte für Trag- und Deckschichten im Straßenbau aus ca. 93 bis 96 M.-% Gesteinsmaterial (grobe und feine Gesteinskörnungen und Füller) und entsprechend 4 bis 7 M.-% Bindemittel (Bitumen) [9]. Durch die Variation der Zusammensetzung kann das Gebrauchsverhalten verändert werden.

Natürlich vorkommende Gemische werden Naturasphalte genannt. Das bekannteste Vorkommen von Naturasphalt gibt es auf der Insel Trinidad [9]. In der gegenständlichen Arbeit werden ausschließlich technische Asphalte behandelt, im Allgemeinen als Asphalt bezeichnet.

2.2 BITUMEN

2.2.1 ALLGEMEINES

Bitumen ist eine, aus der Rohöldestillation gewonnene Substanz. Das dunkelfärbige Gemisch aus überwiegend organischen Kohlenwasserstoffverbindungen kommt in der Asphaltherstellung als Bindemittel zum Einsatz [8].

Im Straßenbau kommen bitumenhaltige Baustoffe in verschiedenen Anwendungen und Arten zum Einsatz. Die nachfolgende Abb.1 zeigt eine Übersicht der im Straßenbau üblichen bitumenhaltigen Baustoffe. In der gegenständlichen Arbeit werden ausschließlich das Straßenbaubitumen 70/100 und das Polymermodifizierte Bitumen PmB 45/80-65 behandelt.

Durch Zugabe von sorgfältig ausgewählten Polymeren werden aus herkömmliche Straight Run Bitumen, Polymermodifizierte Bitumen hergestellt. Polymermodifizierte Bitumen (PmB) weisen im Vergleich zu Straßenbaubitumen verbesserte Gebrauchseigenschaften auf. Zu den verbesserten Eigenschaften gehören die Gebrauchsspanne (Plastizitätsspanne), die Elastizität, die Verformungsbeständigkeit und die Alterung [9].

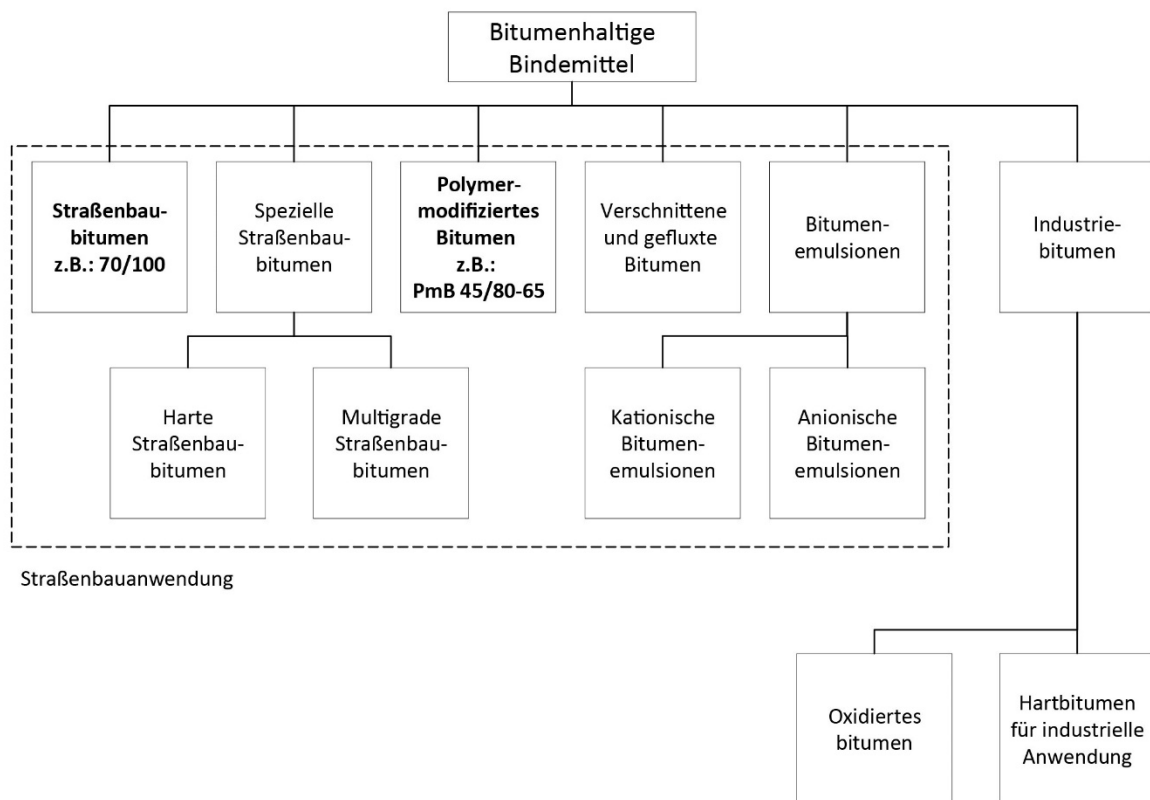


Abb.1 Auszug der Einteilung bitumenhaltiger Bindemittel gem. ÖNORM EN 12597 [11]

2.2.2 CHEMISCHER AUFBAU UND STRUKTURMODELL

Aufgrund der hohen Anzahl der verschiedenen Kohlenwasserstoffgruppen und den molaren Massen zwischen 600 und 1000 ist es unmöglich, die Einzelinhaltsstoffe eines Bitumens zu erfassen. Ein Kohlenwasserstoff mit der molaren Masse $M \sim 600$ besitzt ca. 42 Kohlenstoff Atome. Bei 40 Kohlenstoff Atomen besteht die Möglichkeit für $6,1^{13}$ Isomere (chem. Verbindungen mit der gleichen Anzahl an Atomen, jedoch unterschiedlicher Struktur) [9]. Jedoch lassen sich die Bestandteile in spezifische Stoffgruppen zusammenfassen. In stark vereinfachter Weise lässt sich das Strukturmodell von Bitumen als ein kolloidales System beschreiben. Das kolloidale System - eine Dispersion - besteht aus höhermolekularen Partikeln (Asphaltenen), umhüllt von Harzen, in einem niedermolekularen Gel (Maltene). Die Maltene bilden die flüssige, ölige, lösliche Phase der homogenen Dispersion. Die Mizellen, gebildet aus Asphaltene, die von Harzen umhüllt sind, bilden gemeinsam die zweite Phase der Dispersion und sind verantwortlich für das Steifigkeitsverhalten des Bitumens. Die Erdölharze sind je nach Temperatur fest oder flüssig und sind für die Schmelzbarkeit des Bitumens verantwortlich. Die Formbestimmende, unlösliche, feste rußartige Phase wird durch die Asphaltene gebildet. Diese Temperaturabhängigkeit verleiht dem Bitumen seine komplexe visko-elasto-plastische Materialeigenschaft. Die mechanischen Eigenschaften des Baustoffs sind temperatur- und zeitabhängig [10].

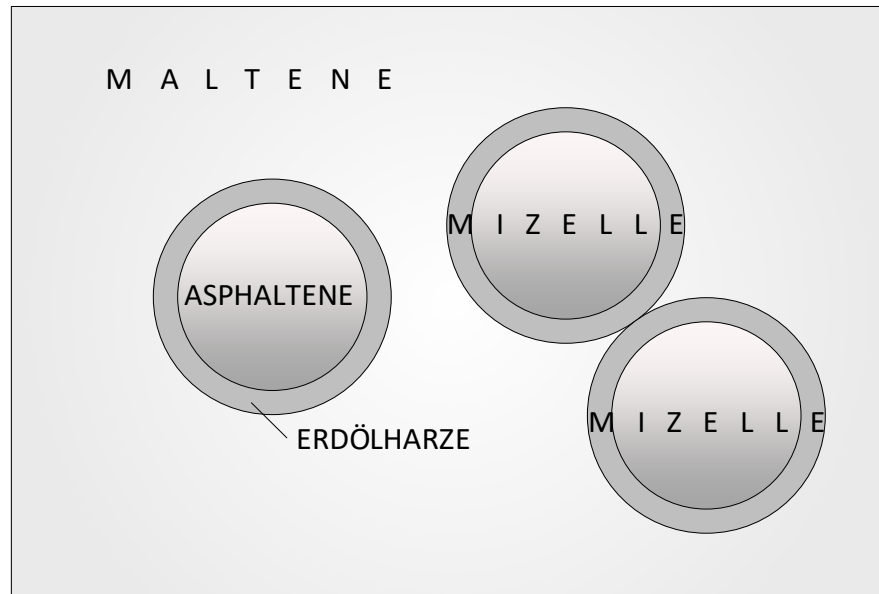


Abb.2 Strukturmodell von Bitumen als kolloidales System

Solange die Maltene die Asphaltene bzw. Mizellen in kolloidaler Lösung halten kann, ist das System im Gleichgewicht. Die Zugabe von Polymeren ist im Strukturmodell den Partikeln zuzuordnen (Asphaltene). Dadurch wird die Viskosität erhöht. Der Modifizierung mit Polymeren sind jedoch Grenzen gesetzt, da sonst eine sogenannte Phasenumkehr stattfinden kann und man bitumenmodifizierte Kunststoffe erhält [9].

2.2.3 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

2.2.3.1 Konsistenz

Eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale oder Einteilungskriterien ist die Konsistenz. Die Quantifizierung der Konsistenz erfolgt über das Maß der Penetration alleine oder in Kombination mit dem Erweichungspunkt [9]. Die Bitumensorte 70/100 beschreibt ein Straßenbaubitumen mit einer Penetration von 70-100 Zehntel-Millimeter (7-10 mm). Bei der Bezeichnung PmB 45/80-65 handelt es sich um ein Polymermodifiziertes Bitumen mit einer Penetration von 45-80 Zehntel- Millimeter und einem Erweichungspunkt ≥ 65 °C.

2.2.3.1.1 Penetration

Gem. ÖNORM EN 1426 [12] ist die Penetration ein Maß zur Beschreibung der Konsistenz. Zur Bestimmung der Penetration wird die Bitumenprobe im Wasserbad bei konstanter Temperatur von 25 °C mit einer genormten Nadel (Gesamtmasse 100g) 5 s lang belastet. Das Maß der Penetration ist die zurückgelegte Wegstrecke in Zehntel- Millimeter [12].

Durch die Modifizierung mit Polymeren wird die Penetration nur geringfügig beeinflusst [9].

2.2.3.1.2 Erweichungspunkt

Aufgrund der komplexen Struktur besitzt Bitumen keinen exakten Schmelzpunkt, siehe 2.2.2. Beim Erwärmen wird Bitumen kontinuierlich weicher, bis es schließlich flüssig ist. Zur Beschreibung dieses Erweichungsverhaltens wird das „Ring- und Kugel-Verfahren“ gem. ÖNORM EN 1427 [13] herangezogen [9]. Der Erweichungspunkt ist jene Temperatur, bei der die Bitumenprobe eine Verformung von 25,4 mm erfährt. Das Bitumen wird in einen genormten Stahlring gegossen und mit einer Stahlkugel belastet. Das Wasserbad oder Glycerolbad, in dem sich die Probe befindet wird nach festgelegten Bedingungen erwärmt, bis die (Stahlkugel umhüllende) Bitumenschicht sich um das vorgegebene Maß verformt. Der Erweichungspunkt wird für die Klassifizierung bzw. Kennzeichnung von Polymermodifizierten Bitumen und Hartbitumen herangezogen [13].

Durch die Modifizierung mit Polymeren wird der Erweichungspunkt wesentlich beeinflusst, bei PmB liegt er höher. Der Erweichungspunkt wird um ca. 2 - 4 °C pro % Kunststoffzugabe erhöht [9].

2.2.3.1.3 Brechpunkt nach Fraaß

Zur Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß gem. ÖNORM EN 12593 [14] wird das Bitumen in gleichmäßiger Dicke auf ein Metallblech aufgebracht. Das Blech wird mit einer vorgeschriebenen Geschwindigkeit abgekühlt und wiederholt gebogen. Der Brechpunkt nach Fraaß ist jene Temperatur, bei der es zum ersten Riss in der Bitumenschicht kommt [14].

2.2.3.1.4 Gebrauchsspanne – Plastizitätsspanne

Die Gebrauchs- oder Plastizitätsspanne ist jener Temperaturbereich, der zwischen dem Brechpunkt nach Fraaß und dem Erweichungspunkt liegt. Bitumen verhält sich unterhalb der Brechpunkttemperatur spröde und oberhalb des Erweichungspunktes zunehmend flüssig. Innerhalb dieser Grenzwerte verhält sich das Bitumen visko-elasto-plastisch. Die Dauergebrauchstemperaturen sollten auf die Plastizitätsspanne abgestimmt sein. Dadurch kann die Neigung zu Rissbildung oder Verformung vermindert werden [9].

Polymermodifizierte Bitumen weisen große Plastizitätsspannen von bis zu 100 °C auf. Bei herkömmlichen Straßenbaubitumen liegt die Plastizitätsspanne bei ca. 50 bis 60 °C [9].

2.2.3.1.5 Elastizität

Als Maß der Elastizität dient die elastische Rückstellung gem. ÖNORM EN 13398 [17]. Zur Ermittlung der elastischen Rückstellung wird ein genormter Prüfkörper aus Bitumen hergestellt und bei vorgegebener Prüftemperatur im Wasserbad auf eine Länge von 200 mm ausgezogen. Die Geschwindigkeit hat dabei 50 mm/min zu betragen. Der entstandene Bitumenfaden wird in der Mitte zerschnitten. Nach Ablauf von 30 Minuten ist die Verkürzung der Fäden zu messen und die elastische Rückstellung als prozentuelles Maß der Verkürzung zu ermitteln. Die Bestimmung der elastischen Rückstellung kommt besonders bei Polymermodifizierten Bitumen zum Einsatz [17].

2.2.3.2 Fließverhalten – Rheologie

Bei genügend hohen Temperaturen verhält sich Bitumen annähernd wie eine Newton'sche Flüssigkeit. Das bedeutet, dass das Bitumen ein linear viskoses Fließverhalten aufweist. Die Schergeschwindigkeit ist streng proportional zur Schubspannung. Der Proportionalitätsfaktor beschreibt die Viskosität, ist konstant und nur temperatur- und nicht zeitabhängig. Das gegensätzliche Grenzverhalten des Bitumens ist das spröde-elastische Materialverhalten. Bei linear-elastischem Materialverhalten kommt das Hooke'sche Gesetz zur Anwendung, welches besagt, dass Spannung und Dehnung linear proportional sind. Der gebrauchtsrelevante Temperaturbereich für Bitumen liegt zwischen den Grenzzuständen. Die Fließeigenschaften in diesem Temperaturbereich können nur anhand von komplexen rheologischen Modellen beschrieben werden [8,9].

Die in der Literatur beschriebenen rheologischen Modelle basieren alle auf den zwei oben beschriebenen Grundmodellen (Die Hooke'sche Feder und der Newton'sche Dämpfer). Die Hooke'sche Feder beschreibt das elastische Verhalten des Bitumens anhand einer masselosen Spiralfeder, die sich linear proportional zur aufgebrachten Einwirkung verformt. Der Newton'sche Dämpfer beschreibt das viskose Verhalten des Bitumens anhand eines masselosen Kolbens in einem endlosen Zylinder. Der Zylinder ist gefüllt mit einer ideal-viskosen Flüssigkeit, welche die Bewegung des Kolbens dämpft. Durch die Kombination dieser Modellkörper in einer seriellen oder parallelen Anordnung lassen sich typische rheologische Eigenschaften von viskoelastischen Flüssigkeiten und Festkörpern beschreiben [8].

Bei Temperaturen unterhalb oder nahe des Erweichungspunktes findet noch kein vollständiges Fließen statt. Die Viskosität ist nicht ausschließlich von der Temperatur abhängig. Die sogenannte „scheinbare Viskosität“ unterhalb des reinviskosen „Newton'schen Bereichs“ ist zeit- und belastungsabhängig. Das bedeutet, dass die Belastungsdauer bei Überlagerung von elastischen und viskosen Verformungsanteilen eine Rolle für die bleibende Verformung spielt [9].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die mechanischen Eigenschaften von Bitumen, unter anderem der Steifigkeitsmodul, sowohl von der Belastungsdauer (Lastfrequenz), als auch von der Temperatur abhängig ist.

2.2.3.3 Haftverhalten – Adhäsion

Das Haftverhalten (Adhäsion) von Bitumen wird durch die Wechselwirkung von Bitumen und anderen Stoffen bestimmt. Die Adhäsion ist keine alleinige Eigenschaft des Bitumens, sondern eine Eigenschaft von Stoffpaaren. Beide Stoffe sind für die Bindungsfestigkeit verantwortlich. Im Asphalt sind das Wasser und Gesteinsanteile in unterschiedlicher Körnung und Zusammensetzung. Silikatisches Gestein und verwitterte Basalte weisen ungünstige Haftungseigenschaften gegenüber Bitumen auf. Karbonate weisen hingegen ein gutes Haftvermögen auf. Der Beitrag des Bitumens zum Haftvermögen wird von seiner chemischen Eigenschaft bestimmt. Polymermodifizierte Bitumen weisen ein ausgezeichnetes Haftverhalten auf. Der Haftverbund ist auch bei tiefen Temperaturen, aufgrund der elastischen Eigenschaften des Kunststoffes, gegeben. Voraussetzung für eine gute Haftung ist immer eine

einwandfreie Benetzung. Dazu sollten die Oberflächen der Stoffpartner staubfrei und trocken sein. Durch Erhöhung der Temperatur des Bitumens beim Benetzen kann die Viskosität gesenkt werden und eine optimale Ausbreitung des Bitumens erzielt werden [9].

2.2.4 ALTERUNG

Aufgrund seines organischen Ursprungs ist Bitumen ständiger Alterung ausgesetzt. Dabei kommt es zu chemischen und strukturellen Änderungen, die eine Verhärtung und Versprödung des Bindemittels zur Folge haben. Dadurch wird die Rissbildung bei niedrigen Temperaturen, sowie die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit begünstigt [2]. Im Straßenbau wird zwischen Kurzzeitalterung und Langzeitalterung unterschieden. Bei der Kurzzeitalterung kommt es im Bitumen zu einer schnellen Oxidation und einer sogenannten destillativen Alterung. Dabei findet aufgrund hoher Temperaturen und hoher spezifischer Oberfläche eine Verdampfung flüchtiger Komponenten im Bitumen statt. Die Langzeitalterung hingegen ist die Folge einer langsamen Oxidation durch atmosphärische Sauerstoffe und andere in der Luft vorkommende hochoxidative Gase (z.B. Ozon) bzw. reaktive Sauerstoffspezies (ROS) [4].

2.2.4.1 Oxidative Alterung

In 2.2.2 wird das Strukturmodell von Bitumen als kolloidales System beschrieben. Es besteht aus einem niedermolekularen Gel (Maltene), indem sich von Harzen umhüllte hochmolekulare Partikeln (Asphaltene) befinden. Die Hülle aus Harzen stellt einen Polaritätsgradienten zwischen den hochpolaren Asphaltenen und der niederpolearen Maltene her. Mit zunehmender Polarität steigt auch das Oxidationspotential. Bei der oxidativen Alterung wird zunächst die Hülle der Asphaltene durch die reaktive Sauerstoffspezies (ROS) angegriffen. Mit fortschreitender Alterung dringen die ROS in den Kern der Mizelle vor. Durch die Oxidation der Hülle wird der Polaritätsgradient zerstört. Das bedeutet die Kompatibilität zwischen Mizelle und Maltene ist nicht mehr gegeben und es bilden sich Sollbruchstellen zwischen den Partikelhüllen und dem Gel. Es kommt zu einer Versprödung des Bitumens [15].

2.2.4.2 Destillative Alterung

Bei der destillativen Alterung kommt es aufgrund hoher Temperaturen, die durchaus in der Asphaltherstellung oder -verarbeitung vorkommen, zur Verdampfung der Ölanteile im Bitumen. Die destillative Alterung ist abhängig von der Bitumensorte, der Temperatur und der spezifischen Oberfläche. Weichere Bitumensorten besitzen mehr Ölanteile, was das Potenzial der destillativen Alterung erhöht. Durch Erhöhung der Temperatur steigt der Dampfdruck und damit die Menge der verdampfenden Ölanteile. Je größer die spezifische Oberfläche, desto größer die destillative Alterung [16].

2.2.4.3 Laboralterung

Um die Auswirkungen des Alterungsprozesses an ungealterten Proben im Labor untersuchen zu können, erfordert es zeitraffende Methoden zur Simulation der Alterung. In den Normen

gibt es zwei standardisierte Simulationsmethoden für die Bitumenalterung, „Rolling Thin Film Oven Test“, kurz RTFOT und „Pressure Aging Vessel“, PAV [2].

2.2.4.3.1 RTFOT-Verfahren gem. ÖNORM EN 12607-1 [5]

Bei dieser Methode werden zunächst zylindrische Glasgefäße mit $35 \pm 0,5$ g des ungealterten Bitumens befüllt. Die Glasgefäße werden liegend in einem Drehgestell in einer Wärmekammer positioniert. Bei 163°C rotieren die Glaszylinder insgesamt 90 min (15 min Aufheizzeit + 75 min Alterungszeit). Während der Rotation des Drehgestells, wird in jedes Glasgefäß heiße Luft eingeblasen [5]. Durch Erwärmung und die konstante Rotation bildet sich an der Mantelfläche des Glaszylinders ein fließender Bitumenfilm. Dadurch entsteht eine Große Oxidationsoberfläche, die der eingeblasenen heißen Luft ausgesetzt ist. Die Anwendung des RTFOT Verfahrens, entspricht einer Kurzzeitalterung, wie sie nach dem Mischungs- und Einbauprozess von Asphalt stattfindet [2]. In Abb.3 ist das RTFOT-Verfahren grafisch abgebildet.

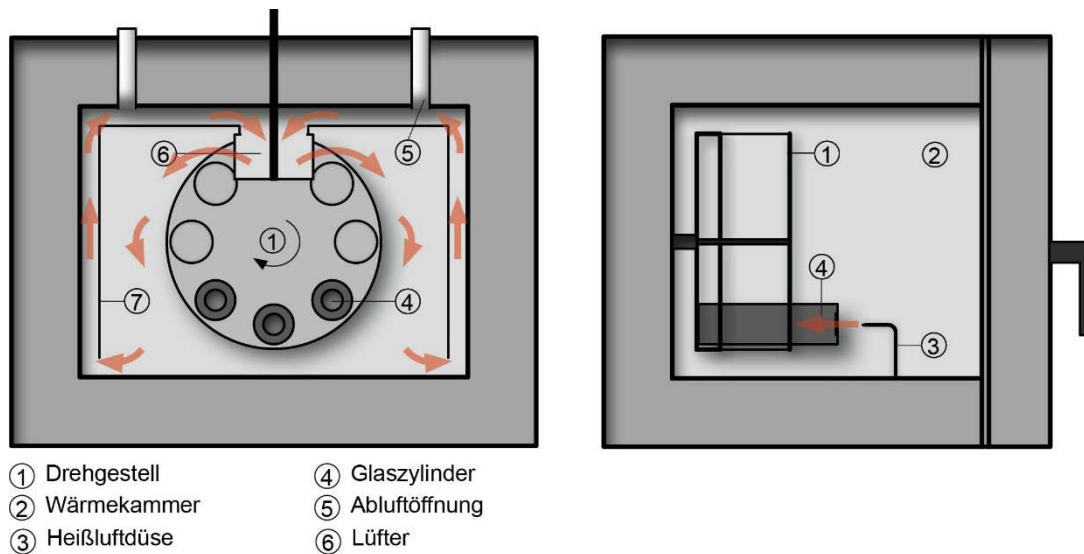


Abb.3 RTFOT-Verfahren für Kurzzeitalterung

2.2.4.3.2 PAV- Verfahren gem. ÖNORM EN 14769 [6]

Bei der Simulation der Langzeitalterung mit dem PAV- Verfahren, wird eine zuvor kurzzeitgealterte Bitumen Probe (z.B. mit dem RTFOT Verfahren) in eine genormte Schale gegossen und vorgewärmt. Dadurch bildet sich ein gleichmäßig dicker Bitumenfilm. Die befüllten Schalen werden in einem temperierten Druckkessel mit 2,1 MPa Überdruck bei 90, 100 oder 110°C für 20 h beschleunigt gealtert. Die Simulation entspricht einer Langzeitalterung von ca. 10 Jahren Liegedauer [2,6]. In Abb.4 ist das PAV-Verfahren grafisch abgebildet.

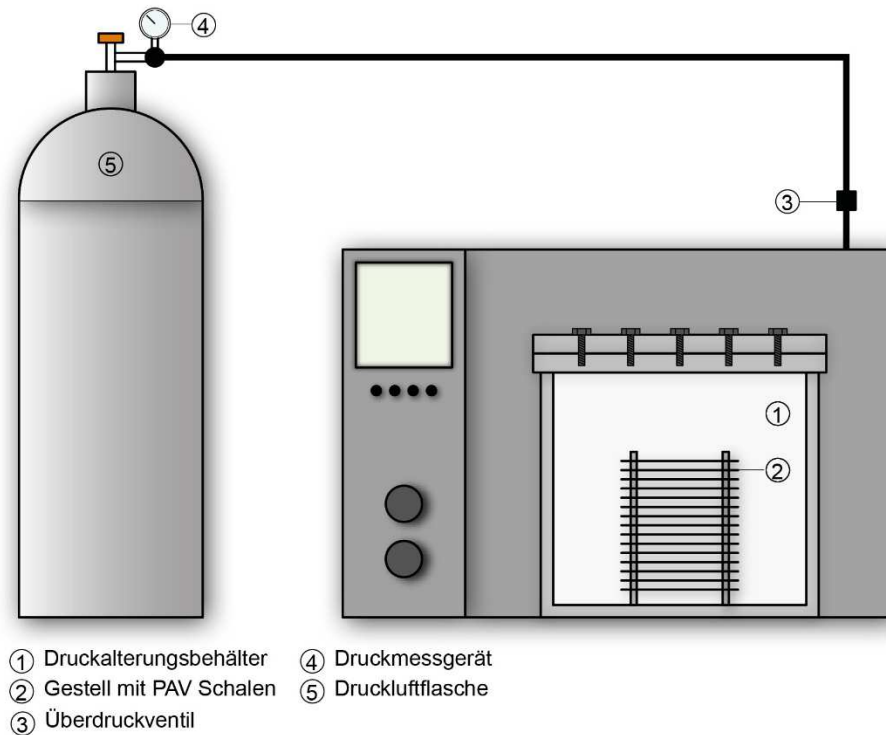


Abb.4 PAV-Verfahren für Langzeitalterung

2.2.4.3.3 Viennese Binder Aging (VBA)

Das „*Viennese Binder Aging*“ [7] ist eine Methode die an der TU Wien entwickelt wurde. Bei dieser Methode erfolgt die Alterung, anders als beim PAV-Verfahren, bei Umgebungsdruck und geringer Temperatur, um thermische Alterungsvorgänge zu vermeiden. Um die oxidative Alterung dennoch zu beschleunigen werden hohe Konzentrationen an reaktive Sauerstoffspezies (ROS) verwendet. O_3 und NO_x werden, kombiniert mit Luftsauerstoff, über die Oberfläche der Probe geblasen. Die ROS besitzen ein hohes Oxidationspotential. Mit dem Verfahren kann innerhalb von 3 Tagen ein Alterungsniveau erreicht werden, wie beim RTFOT + PAV. Durch Erhöhung der ROS Konzentration können höhere Alterungsgrade erzielt werden [7].

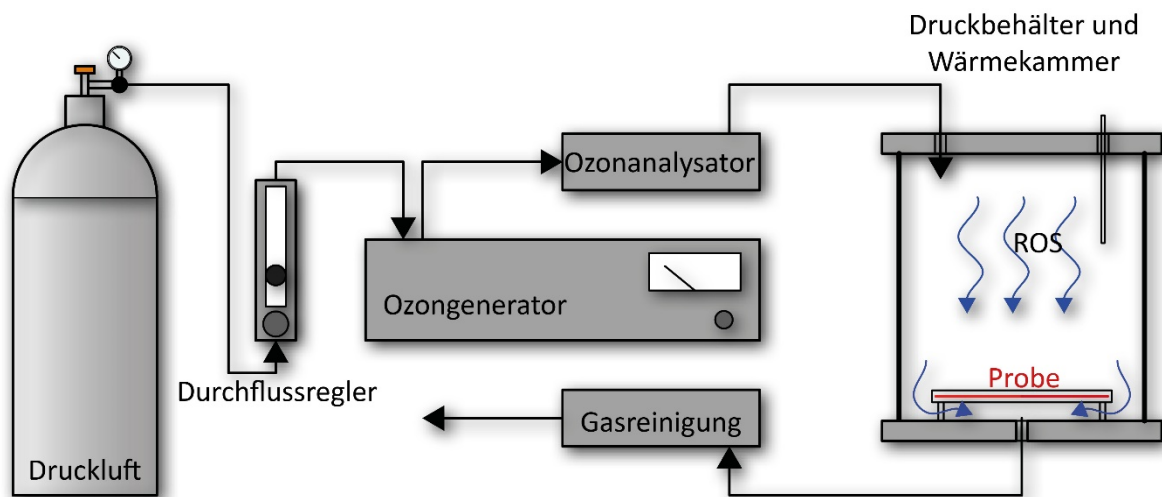


Abb.5 VBA-Verfahren für Langzeitalterung gemäß [7]

2.2.4.4 Polymerodifiziertes Bitumen

Das Alterungsverhalten von PmB unterscheidet sich - den herkömmlichen Prüfmethode nach (RTFOT und PAV) - kaum von Straßenbaubitumen. Jedoch zeigen Beobachtungen aus der Praxis eine erhöhte Lebensdauer von Asphaltkonstruktionen mit Polymermodifiziertem Bitumen als jene mit Straßenbaubitumen [9].

Lt. Blab [2] ist eine weitere Ursache der Asphaltalterung, die dynamische Verkehrsbelastung. Die zeitabhängige Belastung führt zu einem ständigen Wechsel zwischen Druck- und Zugspannungen an der Unterseite der Asphaltdecke. Dadurch entstehen mit der Zeit Mikrorisse und Ablösungen zwischen Gestein und Asphaltmörtel, welche zu einer Verringerung der Steifigkeit führen. Das Ende der Lebensdauer ist erreicht, wenn sich die Mikrorisse durchschlagen und die Asphaltdecke mit Netzkissen durchzogen ist.

Die verbesserten Gebrauchseigenschaften von Polymermodifizierten Bitumen setzen den vorher beschriebenen Ursachen der Alterung einen erhöhten Widerstand entgegen. Sie bekräftigen die im Asphalthandbuch [9] beschriebenen Unterschiede zwischen RTFOT Ergebnis und Praxisverhalten.

2.3 GESTEINSKÖRUNG

2.3.1 ALLGEMEINES

Asphaltemischung besteht zu ca. 95 M-% aus Gesteinskörnern. Diese übertragen die Druckkräfte über das Korngerüst, stellen die Griffbarkeit der Fahrbahnoberfläche her und wirken dem Verschleiß entgegen. Die Anforderungen an die Gesteinskörnungen für Asphalt sind in der Normenreihe ÖNORM B 313x geregelt. Der Anwendungsbereich umfasst natürliche Gesteinskörnungen, Stahlwerkschlacke und rezyklierte Gesteinskörnungen. Durch Variation der Gesteinskörnung kann die Druckfestigkeit des Asphalts maßgeblich beeinflusst werden.

Eine hohe Verformungsfestigkeit kann durch Erhöhung der Lagerungsdichte erzielt werden. Der Verzahnungseffekt, bei Verwendung von Kantkorn (gebrochen) begünstigt die Festigkeit. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Wahl des Größtkorns. Mit Zunahme des Größtkorns und dem Anteil an groben Gesteinskörnung steigt der Verformungswiderstand [16].

2.3.2 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

2.3.2.1 Reindichte

Als Dichte wird das Verhältnis der Masse bezogen auf das Volumen bezeichnet. In Abhängigkeit, ob Porenhohlräume oder Haufwerkshohlräume im Volumen inkludiert sind, wird zwischen Schüttdichte, Rohdichte und Reindichte unterschieden. Die Reindichte ist jene Dichte ohne Hohlräume. Die Bestimmung erfolgt im Allgemeinen in einem Pyknometer [16].

2.3.3 SIEBLINIENRELEVANTE EIGENSCHAFTEN

2.3.3.1 Korngruppen

Die Aufbereitung der Steinbruchrohstoffe umfasst das Brechen und Klassieren. Der Brechvorgang erfolgt meist mehrstufig. In der Vorbrechanlage werden Gesteinsblöcke gebrochen und dem Nachbrecher zugeführt. Nach dem zweiten Brechvorgang kommt das Aufbereitungsmaterial in die Edelsplittanlage, wo die Klassierung in Korngruppen durch Siebung erfolgt [16].

Die **Korngruppe** bezeichnet eine Gesteinskörnung anhand der untersten (d) und obersten (D) Siebgröße. Sie wird als das Verhältnis d/D angegeben. In der Korngruppe können Über- und Unterkorn enthalten sein. Als **Überkorn** wird jener Anteil bezeichnet, der auf dem größeren Sieb der Korngruppenbezeichnung (D) liegen bleibt. Als **Unterkorn** wird jener Anteil bezeichnet, der durch das kleinere Sieb der Korngruppenbezeichnung (d) hindurch fällt [18]. Die Korngruppe 4/8 bedeutet, dass Gesteinskörnung mit dem Durchmesser zwischen 4 und 8 mm vorliegt. Es dürfen jedoch Siebrückstände und Siebdurchgänge mit $M.-% > 0$ vorhanden sein. Wird das Über- und Unterkorn gezielt ausgesiebt, spricht man von einer **Kornklasse**. In der folgenden Abb.6 wird anhand der Körnung 4/8 der Unterschied zwischen Korngruppe und Kornklasse dargestellt. [16].

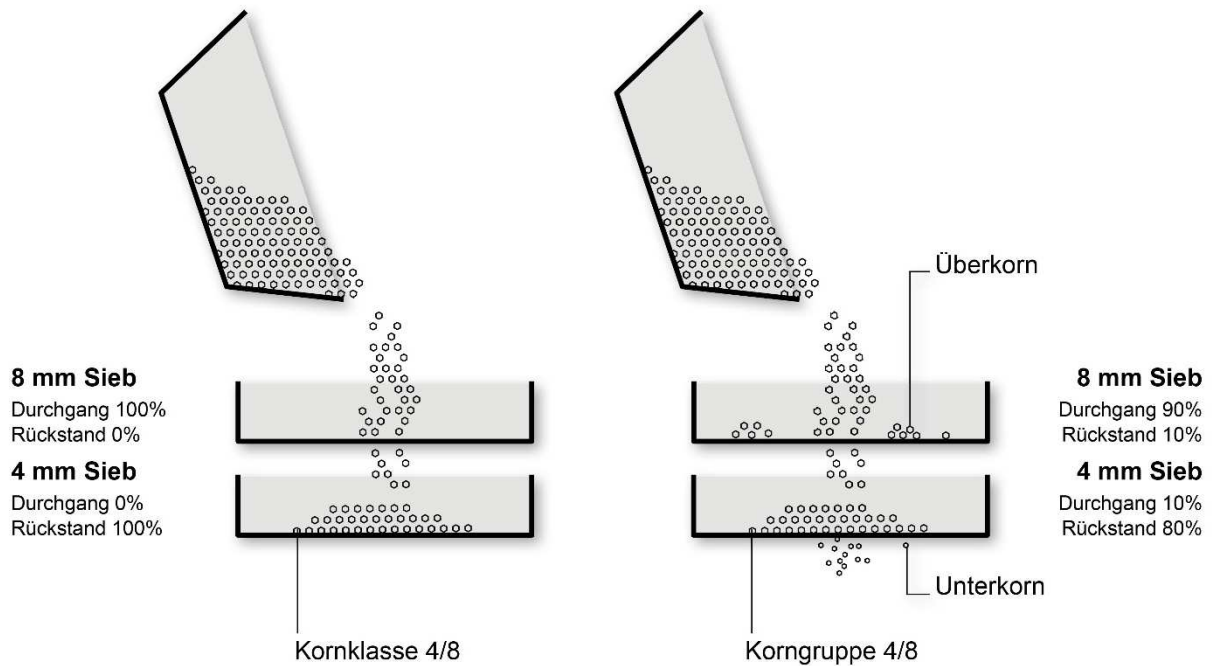


Abb.6 Unterschied zwischen Kornklasse und Korngruppe

In Abhängigkeit der verwendeten Siebweiten, werden Korngruppen folgendermaßen bezeichnet:

Grobe Gesteinskörnung umfasst die größeren Korngruppen bei denen das größte Sieb (D) ≥ 4 mm und das kleinste Sieb (d) ≥ 2 mm ist [16]. Gesteinskörnungen die weder als grob noch fein eingestuft werden können, werden der groben Gesteinskörnung zugeordnet [18].

Feine Gesteinskörnung umfasst die kleineren Korngruppen mit D höchstens 4 mm (z.B. 0/2) [16,18].

Korngemische sind Mischungen aus grober und feiner Gesteinskörnung (z.B. 0/8) [16].

Als **Füller** wird Gesteinskörnung bezeichnet, deren überwiegender Teil durch ein 0,063 mm Sieb hindurchgeht [3].

Als **Feinanteile** werden in der gegenständlichen Arbeit die Kornklasse 0,063/0,125 bezeichnet.

2.3.3.2 Korngrößenverteilung

Die **Korngrößenverteilung** ist eine Korngrößenzusammensetzung, die den Siebdurchgang einer festgelegten Anzahl von Sieben in M.-% ausdrückt [18].

Die Bestimmung erfolgt im Siebversuch. Hierfür werden, je nach Gesteinskörnung, die erforderlichen Maschensiebe (Siebweiten von 0,063 bis 2,0 mm) und Quadratlochsiebe

(Siebweite von 4,0 bis 63 mm) übereinandergestellt und die zu siebende Probe entweder im Nass- oder Trockensiebverfahren gesiebt. Nach erfolgter Siebung werden die Rückstände der einzelnen Siebe gewogen und in M.-% der Ausgangsmasse festgehalten. Aus den kumulierten Siebrückständen werden kumulierte Siebdurchgänge berechnet und grafisch dargestellt. Die grafische Darstellung erfolgt meist in Form von Sieblinien [16].

Die **Sieblinie** ist die grafische Darstellung der Ergebnisse der Korngrößenverteilung in Form des kumulierten Siebdurchgangs über die Siebweite. Der Siebdurchgang wird meist in einem linearen und die Siebweite in einem logarithmischen Maßstab dargestellt [16].

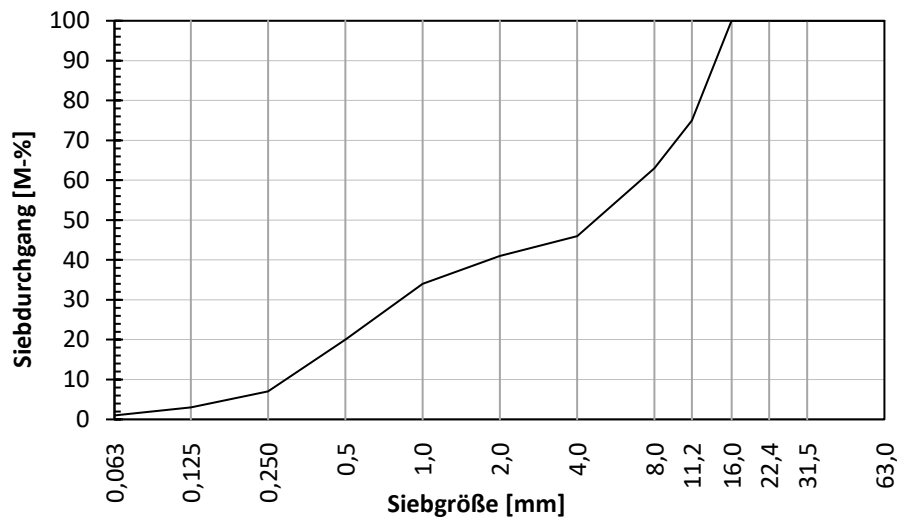


Abb. 7 Sieblinie eines Korngemisches mit 16 mm Größtkorn

2.3.4 KORNFORMRELEVANTE EIGENSCHAFTEN

2.3.4.1 Kornform

Die Verdichtbarkeit des Asphalts ist neben dem Bindemittelgehalt und der Korngrößenverteilung ebenso von der Kornform der verwendeten Gesteinskörnung abhängig. Für die Mischgutzusammensetzung ist eine möglichst gedrungene (kugelige, würfelige) Form erwünscht. Aus diesem Grund werden in den Richtlinien Anforderungen an die Kornformkennzahl gestellt [9].

Bei groben Gesteinskörnern kann anhand des Verhältnisses der Masse der ungünstig geformten Körner zur Gesamtmasse, die Kornformkennzahl bestimmt werden. Als ungünstig werden Körner bezeichnet, deren Verhältnis von Länge zu Dicke größer ist als 3:1 [16].

2.4 MEHRSKALENMODELL DES ASPHALTS

Mit dem Mehrskalenmodell wurde ein Betrachtungsansatz entwickelt, bei dem das Baustoffgemisch Asphalt in fünf Ebenen skaliert wird. Der Gedanke beruht darin, jede Ebene einzeln betrachten zu können und mit Hilfe eines Homogenisierungsverfahrens auf eine

andere Ebene zu übertragen (Upscaling). Beim Upscaling werden die mechanischen Eigenschaften einer bestimmten Ebene homogen auf die nächsthöhere übertragen. Unter diesen Voraussetzungen wäre es möglich, anhand von Bewertungsmethoden bestimmter Ebenen, Prognosen für höhergestufte Ebenen - bis hin zur Fahrbahn - zu erstellen [8].

Als Beispiel dafür wäre die Übertragung von Mastixeigenschaften, anhand eines geeigneten Mehrskalenmodells auf die des eingebauten Asphalts.

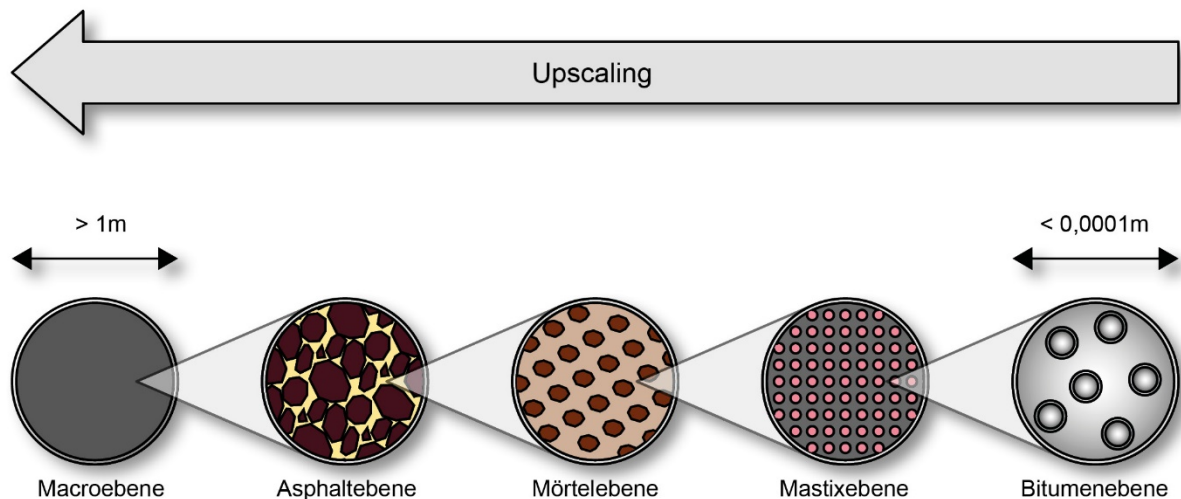


Abb.8 Mehrskalenmodell zur Beschreibung des Asphalts gem. [19]

Der Aufbau der fünf Ebenen des Mehrskalenmodells lassen sich wie folgt beschreiben:

- Bitumenebene: bestehend aus Asphaltene, Mizelle, Maltene; Aufbau gem. 2.2.2, Chemischer Aufbau und Strukturmodell
- Mastixebene: Bitumen und Füller
- Mörtelebene: Mastix und Sand (Gesteinskörnung ≤ 2 mm)
- Asphaltebene: Gesteinskörnung > 2 mm, Mörtel und Hohlräume
- Makroebene: Kontinuum, Fahrbahn, Verkehrsfläche

2.5 ASPHALTMASTIX

Asphaltmastix ist ein, im heißen Zustand gießbares Gemisch aus Bitumen und Füller. Asphaltmastix, genauer das Verhältnis zwischen Bindemittel und Füller hat einen bedeutenden Einfluss auf den Ermüdungswiderstand und die Verformungssteifigkeit des Asphalts. In unabhängigen Studien wurden unterschiedliche Asphaltmischungen mit verschiedenen Bindemitteln und mehrere vordefinierte Bindemittel-Füller-Verhältnisse vergleichend untersucht. Die besondere Wichtigkeit der Einhaltung der rezeptierten Füllermenge in der Asphaltherstellung konnte bestätigt werden. Rheologische Prüfungen ergaben, dass ein übermäßiger Fülleranteil die Ermüdungsresistenz des Asphalts wesentlich beeinträchtigen kann [8].

2.6 MATERIALERMÜDUNG

Aufgrund der hohen Verkehrslasten und den klimatischen Einwirkungen, denen Asphaltdecken ausgesetzt sind, kann es längerfristig zu Materialermüdung und somit zum Tragfähigkeitsverlust kommen. Die zeitabhängige (dynamische) Belastung führt zu einem ständigen Wechsel zwischen Druck- und Zugspannungen an der Unterseite der Asphaltschicht. Dadurch entstehen mit der Zeit Mikrorisse und Ablösungen zwischen Gestein und Asphaltmastix, welche zu einer Verringerung der Steifigkeit führen. Das Ende der Lebensdauer ist erreicht, wenn sich die Mikrorisse durchschlagen und die Asphaltschicht mit Netzschnissen durchzogen ist [2].

Eine weitere Art der Ermüdung in Asphaltdecken zeichnet sich in Form von Kornausbrüchen ab. Ungleich der thermischen Rissbildung, den Spurrinnen oder den ermüdungsbedingten Netzschnissen, kann die Ursache von Korn- und Schollenausbrüchen nicht eindeutig einer klimatischen oder verkehrsinduzierten Belastung zugeordnet werden. Auf Basis vorhergegangener Arbeiten ist das mangelnde Gebrauchsverhalten von Asphaltmastix als mögliche Schadensursache anzusehen [1].

2.6.1 ERMÜDUNGSVERSUCH AUF ASPHALTEBENE

Die Beurteilung des Ermüdungsverhaltens bzw. Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit auf Asphaltenebene erfolgt in den meisten Fällen anhand des Vierpunktbiegebalkenversuchs gem. ÖNORM EN 12697-24 [20].

Ein Prismatischer Probekörper, an vier Punkten gelagert, wird dehnungsgesteuert periodisch belastet. Dabei wird die aufgewendete Kraft gemessen und der dazugehörige Steifigkeitsmodul berechnet. Die erreichte Anzahl der Lastwechsel bei halber Anfangssteifigkeit wird zur Ermittlung der Wöhlerkurve herangezogen. Die Versuche werden bei verschiedenen Dehnungsstufen wiederholt. Die Ermüdungsfestigkeit entspricht der Dehnungsamplitude bei 10^6 Lastwechsel [1].

2.6.2 ERMÜDUNGSVERSUCH AUF BITUMEN- BZW. MASTIXEBENE

Die Beurteilung des Ermüdungsverhaltens bzw. Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit auf Bitumenebene kann mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) erfolgen. Bei diesem Versuch wird durch eine dynamische Rotation eine Torsionsbeanspruchung auf den Probekörper aufgebracht. Dabei wird das erforderliche Drehmoment und der Drehwinkel der Stempelachse aufgezeichnet. Aus diesen Kenngrößen können auf Basis der in 2.2.3.2 beschriebenen Grundmodelle die rheologischen Kennwerte ermittelt werden [8]. Die Messgeometrie des DSR sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

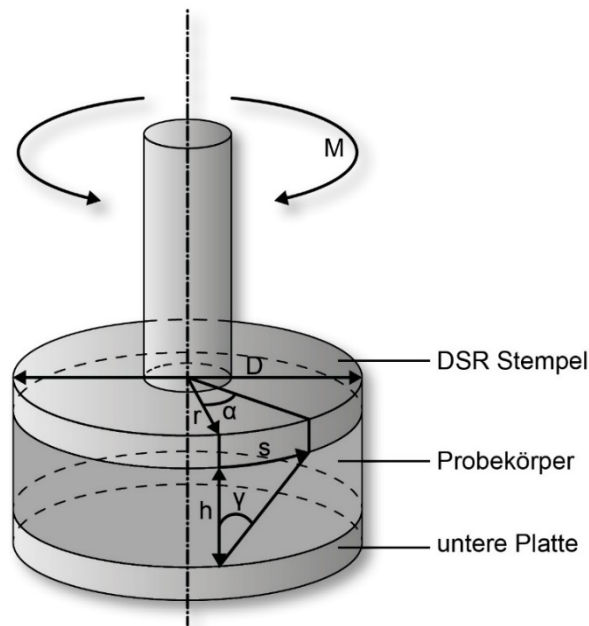


Abb.9 Die Messgeometrie eines Dynamischen Scherrheometers gem. [8]

Dabei sind

- r Plattenradius [mm]
- D Plattendurchmesser [mm]
- α Drehwinkel [°]
- h Plattenabstand [mm]
- s Auslenkung am äußersten Rand
- γ Verformung [-]

$$\gamma = \frac{s}{h} = \frac{r \cdot \alpha}{h} \quad (1)$$

Eine Auslenkung der oberen Platte am äußersten Rand um den Plattenabstand h, führt zu einer Verformung γ von 100 %. Zusätzlich zu dem gemessenen Drehmoment und dem Drehwinkel wird auch der Zeitunterschied zwischen dem Einbringen der Schubspannung und der daraus resultierenden Verformung berechnet. Unter Berücksichtigung der Belastungsfrequenz kann der Phasenverschiebungswinkel δ berechnet werden [8].

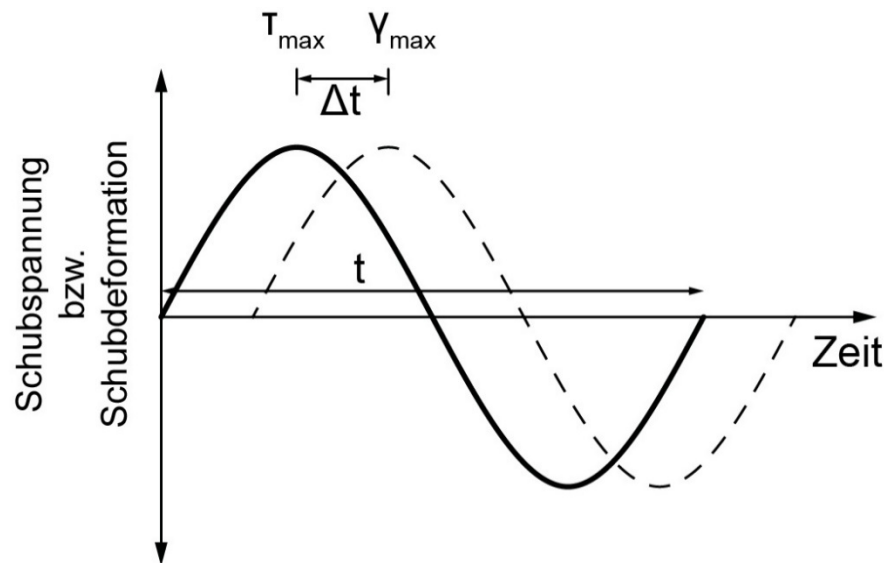


Abb.10 Grafische Ermittlung des Phasenverschiebungswinkels δ gem. [8]

Dabei sind

- M Maximales Drehmoment [Nm]
- τ Schubspannung [Pa]
- ω Winkelgeschwindigkeit [1/s]
- Δt Zeitverschiebung zwischen $\tau_{\max}$ und $\gamma_{\max}$ [s]
- δ Phasenverschiebungswinkel [°]
- G^* komplexer Schubmodul [Pa]

$$M = \frac{F \cdot r}{2} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\frac{2 \cdot M}{r}}{r^2 \cdot \pi} = \frac{2 \cdot M}{r^3 \cdot \pi} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360^\circ; \quad t = \frac{1}{f}; \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4)$$

$$|G^*| = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

Die Berechnung von δ und $|G^*|$ erfolgt während der Messung automatisch. Der komplexe Schubmodul G^* lässt sich wie jede komplexe Zahl in einen Real- und Imaginärteil zerlegen.

$$G' = G^* \cdot \cos \delta \quad (6)$$

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta \quad (7)$$

Der Realteil ist der Speichermodul G' , der dem elastischen Anteil des Schubmoduls entspricht. Der Imaginärteil G'' entspricht dem viskosen Teil des Schubmoduls und wird als Verlustmodul bezeichnet [8].

Aus Abb.11 wird ersichtlich, dass Materialien, die denselben komplexen Schubmodul besitzen, unterschiedliches Gebrauchsverhalten aufweisen können.

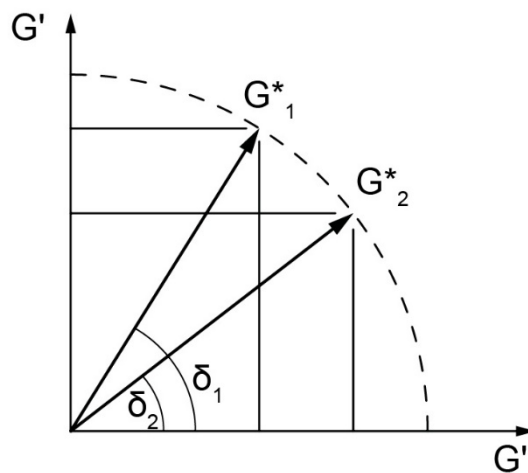


Abb.11 Diagramm von zwei unterschiedlichen Materialien mit demselben komplexen Schubmodul, aber unterschiedlichem Gebrauchsverhalten gem. [8]

3 MATERIALAUSWAHL UND AUSGANGSSTOFFE

3.1 BITUMEN

Zur Herstellung der Mastixproben wurden zwei Bitumensorten gewählt, das in Österreich häufig verwendete Straßenbaubitumen 70/100 und das Polymermodifizierte Bitumen PmB 45/80-65. Das Straßenbaubitumen 70/100 wird für die vergleichende Untersuchung der Gesteinsmehleigenschaften in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit verwendet. Um die Auswirkungen der Alterung auf die Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen wird das PmB 45/80-65 für die Mastixherstellung herangezogen.

3.2 FÜLLER UND FEINANTEILE

Um die Auswirkungen der Füller- & Feinanteileigenschaften in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen, wurden verschiedene Gesteinssorten verwendet. Im Zuge der Aufbereitung der Ausgangsstoffe wurden die gewählten Gesteinssorten trocken gesiebt und in die Kornklassen 0/0,063 und 0,063/0,125 getrennt. Die Bezeichnung „Füller“ entspricht in der gegenständlichen Arbeit der Kornklasse 0/0,063 mm. Bei der Bezeichnung „Feinanteil“ handelt es sich um die Kornklasse 0,063/0,125 mm. In Tab.1 sind die verwendeten Füller & Feinanteile tabellarisch aufgelistet.

Tab.1 Verwendete Füller & Feinanteile

Laborcode	Gesteinssorte	Kornklasse
F116	Porphyry/Kersantit	0/0,063
F117	Porphyry/Kersantit	0,063/0,125
F119	Granit	0/0,063
F120	Granit	0,063/0,125
F122	Basalt	0/0,063
F123	Basalt	0,063/0,125
F160	Kalkstein	0/0,063
F161	Kalkstein	0,063/0,125
F154	Kalkhydrat	0/0,063
F155	Kalkhydrat	0,063/0,125



Abb.12 Lichtbilder der verwendeten Füller & Feinanteile

Basalte gehören zu den Ergussgesteinen (Vulkanite). Sie bestehen hauptsächlich aus Feldspat und Augit und besitzen daher eine dunkelgraue bis schwarze Farbe. Sie weisen eine hohe Festigkeit auf und finden Verwendung als Straßen- und Gleisschotter. Generell gilt, dass saure Gesteinssorten, zu denen der Basalt nur in verwitterter Form gehört, ungünstige Hafteigenschaften gegenüber Bitumen aufweisen. Basaltvorkommen in Österreich gibt es in Mühldorf, Weitendorf, Klösch und Pauliberg. Die Farbe des Basalt-Füllers und des Feinanteils ist Braun bis Grau-Braun (vgl. Abb.12) [9,16]

Granite sind Tiefengesteine (Plutonite) die durch langsame Abkühlung von Magma in der Tiefe aushärten. Aufgrund der langsamen Abkühlung können die Minerale gut auskristallisieren und erreichen große Korngrößen mit wenig Hohlräumen. Der Granit setzt sich aus Feldspat, Glimmer und Quarz zusammen. Die grauen Granitsorten werden häufig als Pflaster-, Rand- und Grenzsteine, sowie als Schotter eingesetzt [9].

Viele Vulkanite enthalten größere Mineralkörner in der Grundmasse, die vor dem Erreichen der Erdoberfläche auskristallisieren. Diese Struktur wird als eine porphyrische Struktur bezeichnet. Porphyr/Kersantit ist hart, besitzt eine hohe Druckfestigkeit und wird vorrangig als Gleisschotter und Gesteinskörnung für die Asphaltherstellung verwendet [16]. Das Gesteismehl des Porphyrs ist in Abb.12, in der Mitte, abgelichtet.

Kalkhydrat (Abb.12 2.v.r.) entsteht durch das Löschen von gebranntem Kalkstein. Bei der exothermen Reaktion dehnt sich das Mineral auf das dreifache seines Volumens aus und zerfällt anschließend in ein extrem feines Pulver. Mit Kalkhydrat können gebrauchungsverhaltensorientierte Kenngrößen von Asphalt gesteigert werden. Die Feuchtigkeitsbeständigkeit, die Zugfestigkeit, die Alterungsbeständigkeit sowie die Verformungsstabilität werden durch die Zugabe von Kalkhydrat verbessert [23].

Kalkstein ist ein weit verbreitetes Sedimentgestein. Sedimentgesteine entstehen durch Verwitterungsprodukte von Gesteinsmaterialien die durch Wasser und Wind transportiert und abgelagert werden. Durch die zunehmende Verfestigung unter Druck und Temperatureinwirkung (Diagenese), werden die Sedimentgesteine gebildet. Der basische

Kalkstein besitzt ein gutes Haftvermögen zu Bitumen [9,16]. Rechts in Abb.12 ist das Gesteinsmehl des Kalksteins zu sehen.

3.2.1 REINDICHTE MITTELS HELIUM PYKNOMETER

An der Universität für Bodenkultur in Wien wurden die Reindichten der obengenannten Gesteinssorten mittels Helium-Pyknometer ermittelt. Bei diesem Verfahren wird das Volumen mithilfe von Gasverdrängung präzise ermittelt. Dabei wird Helium in eine Kammer, in der sich die zu messende Probe befindet, eingelassen. Das Volumen der Kammer ist bekannt. Nach dem Erreichen eines bestimmten Druckes, wird das Gas in eine andere Kammer, mit ebenfalls bekanntem Volumen abgelassen. Durch den Druckunterschied zwischen den Kammern, kann das Volumen des verdrängten Gases bestimmt werden. Da Heliummoleküle bis in die kleinsten Poren eindringen, wird mit dem Verhältnis der Probenmasse zum verdrängten Volumen des Gases die Reindichte ermittelt. Als Reindichte wird die Masse einer Substanz ohne Poren, dividiert durch das Volumen bezeichnet. Für jede Probe wurden zehn Messzyklen durchgeführt und anschließend die mittlere Reindichte ermittelt [21].

Tab.2 Reindichte der verwendeten Füller- & Feinanteilgemische

Laborcode BOKU	Gesteinssorte	Reindichte [g/cm ³]
19095	Porphyry/Kersantit	2,87
19096	Granit	2,78
19097	Basalt	3,00
19093	Kalkstein	2,72
19098	Kalkhydrat	2,57

In Tab.2 sind die, mittels Helium Pyknometer ermittelten, Reindichten der verwendeten Gesteinssorten aufgelistet. Das Kalkhydrat ist mit 2,57 g/cm³ das leichteste Gesteinsmehl und der Basalt mit 3 g/cm³ das Schwerste. Alle anderen besitzen eine Reindichte zwischen 2,7 und 2,9 g/cm³.

3.3 REFERENZMISCHGUT

Das Verhältnis zwischen Bindemittel und Gesteinsmehl (Füller & Feinanteile) für die Herstellung der Mastixproben wurde auf Basis eines Referenzmischgutes hergeleitet. Als Referenz wurde ein AC11 deck A1 herangezogen. Ein Asphaltbeton für bituminöse Deckschichten mit einem Größtkorn von 11 mm, der keiner außergewöhnlichen Belastungen ausgesetzt wird.

3.3.1 SIEBLINIE

Gesteins-Ausgangsstoffe zur Herstellung der Asphaltrezeptur waren Porphyre folgender Korngruppen: 0/2, 2/4, 4/8 und 8/11. Um den Anteil an Eigenfüller so gering wie möglich zu

halten, wurden die Korngruppen 2/4, 4/8 und 8/11 auf einem Sieb mit einer Maschenweite von 1 mm gewaschen. Dadurch sollte das eigene Gesteinsmehl herausgewaschen werden, um in der Mischgutherstellung durch ausgewählte Füller & Feinanteile ersetzt werden zu können.

So können in weiterer Folge gebrauchungsverhaltenorientierte (GVO) Untersuchungen am Asphaltbeton mit demselben Bitumen-Füller & Feinanteil-Verhältnis sowie Füller & Feinanteile derselben Gesteinssorte, entsprechend der dazugehörigen Mastixprobe, durchgeführt werden. Dadurch können Korrelationen zwischen Mastix- und Asphaltverhalten abgeleitet werden. Auf Basis des in 2.4 beschriebenen Mehrskalenmodells, ist es denkbar, durch sogenanntes „upscaling“, das Verhalten auf Asphaltebene anhand von Mastixuntersuchungen abzuschätzen. Diese getroffene Annahme dient nur als Vorkehrung für weitere Untersuchungen, die nicht Teil der gegenständlichen Arbeit sind.

Die Korngruppe 0/2 wurde zuerst auf einem 0,125 mm gewaschen und anschließend maschinell (im Siebturm) auf einem Sieb mit der Maschenweite von 0,125 mm trocken gesiebt. Die verwendete Gesteinskörnung ist in Tab.3 aufgelistet.

Tab.3 Verwendete Gesteinskörnung zur Herstellung des Referenzmischguts

Laborcode	Gesteinssorte	Korngruppe
G919	Porphyry/Kersantit	0/2 ohne < 0,125 mm
G920	Porphyry/Kersantit	2/4 ohne < 1,0 mm
G921	Porphyry/Kersantit	4/8 ohne < 1,0 mm
G922	Porphyry/Kersantit	8/11 ohne < 1,0 mm

Eingangs wurden alle Korngruppen auf einem 0,125 mm Sieb solange gewaschen bis das abfließende Wasser sauber war. Die anschließende Ermittlung der Korngrößenverteilung durch Nasssiebung hat jedoch im Vergleich zu den ungewaschenen Proben einen sehr hohen Anteil an Feinanteilen und Füller ergeben (Vgl. Tab.4). Aus diesem Grund wurden dann verschiedene Waschmethoden ausprobiert und wiederholt die Korngrößenverteilung bestimmt. Beim Waschen auf dem 0,125 mm Sieb konnte schnell festgestellt werden, dass das feine Sieb währenddessen verschlammte und der Füller nicht ausreichend ausgewaschen wird. Das Waschen auf dem 1 mm Sieb brachte zunächst nicht den erhofften Erfolg, weil der Anteil an Füller höher war, als beim Waschen auf dem 0,125 mm Sieb. Eine mögliche Ursache der Erhöhung des Fülleranteils könnte darin liegen, dass das Korn während des Siebens aufgrund der hohen Vibrationsamplitude vermahlen wird. Nach mehreren Nasssiebungen, zur Ermittlung der Korngrößenverteilung, wurde die Amplitude der Vibrationssiebmaschine AS200 der Firma Retsch von 100% auf 40% herabgesetzt. Tab.4 zeigt eine Gegenüberstellung der Sieblinien der Probe G921 Porphyry/Kersantit 4/8. Beim Vergleich der Versuche 2 und 4 wird ersichtlich, dass der Anteil des Siebdurchgangs beim 0,063 mm Sieb durch Herabsetzen der Siebampplitude geringer ist.

Tab.4 Gegenüberstellung der Mittelwerte der Korngrößenverteilung verschiedener Wascharten und Amplitudeneinstellung mit der Probe G921 Porphyry/Kersantit 4/8

Probe: G921 Porphyry/Kersantit 4/8				
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Siebweite Waschvorgang	0,125 mm	1,0 mm	ungewaschen	1,0 mm
Amplitude Siebmaschine	100%	100%	100%	40%
Siebdauer	12 min	12 min	12 min	12 min
Korngröße [mm]	Siebdurchgang [%]			
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	87,9	86,5	86,7	91,4
4,0	8,3	5,6	7,2	8,3
2,0	1,0	1,2	1,3	0,5
1,0	0,9	1,1	1,3	0,4
0,5	0,8	1,1	1,3	0,4
0,250	0,818	1,075	1,292	0,338
0,125	0,779	1,051	1,270	0,326
0,063	0,724	0,989	1,195	0,300

In der ÖNORM B 3580-1 [22] sind Grenzwerte der Korngrößenverteilung für Asphaltbeton angegeben. Die Sollzusammensetzung der Korngrößenverteilung muss innerhalb der Gesamtgrenzwerte liegen. Für den gewählten Asphaltmischgutttyp A1 hat das Größtkorn 4, 8, 11, 16 oder 22 mm zu betragen. Das gewählte Größtkorn ist 11 mm. Die Grenzwerte der Sieblinie sind in Tab.5 dargestellt.

Nach der Ermittlung der Sieblinien als Mittelwert aus zwei Siebdurchgängen wurden diese in einem Iterationsprozess zusammengeführt, um eine Sieblinie für das Referenzmischgut zu erstellen. Der Sollwert der zusammengesetzten Sieblinie ergibt sich aus dem Summenprodukt der gewählten Massenanteile der Korngruppen mit den Siebdurchgängen der jeweiligen Siebweite. Durch Anpassung der Massenanteile wurde eine gleichmäßig gestufte Sieblinie innerhalb der Grenzwerte der ÖNORM B 3581-1 [22] angestrebt. In Tab.6 ist die Zusammensetzung der Sieblinie für das Referenzmischgut angeführt. Die Massenanteile der Korngruppen wurden so gewählt, dass die Massenanteile der einzelnen Korngrößen dem Mittelwert der Grenzwerte bestmöglich entsprechen. In Abb.13 sind die Soll-Sieblinie und die Grenzsieblinien gem. ÖNORM B 3581-1 [22] graphisch dargestellt. Bei der Ermittlung der Massenanteile der Gesteinskörnung für die Mischguttrezeptur ist zu beachten, dass die Korngrößenverteilung als prozentueller Massenanteil der Gesamtgesteinskörnung angegeben wird. Der Bindemittelgehalt und die Menge der Zusätze sind als Massenanteile des Gesamtmischguts anzugeben [22]. Das bedeutet die Massenanteile der Gesteinskörnung, inklusive Massenanteil des Bindemittels, ergibt 100%.

Tab.5 Siebliengengrenzwert für das Asphaltmischgut AC deck 11 A1
gem. ÖNORM B 3580-1 [22]

AC 11 deck A1		
Siebgröße [mm]	Siebdurchgang [%]	
	Min.	Max
63,0	100	
31,5	100	
22,4	100	
16,0	100	
11,2	90	100
8,0	65	88
4,0	43	67
2,0	30	50
1,0	19	38
0,5	13	29
0,250	10	22
0,125		
0,063	5	10

Tab.6 Zusammensetzung der Soll- Sieblinie des Referenzmischguts

gewählter Massenanteil [M.-%]		6,44	4,01	35,87	8,44	21,10	24,16	Soll	
Lieferkörnung		0/0,063	0,063/0,125	0/2	2/4	4/8	8/11	[M.-%]	[S.-%]
Korngrößen	[22,4 - 31,5]							0,0	100,0
	[16,0 - 22,4]							0,0	100,0
	[11,2 - 16,0]						16,3	3,9	100,0
	[8,0 - 11,2]					8,6	79,1	20,9	96,1
	[4,0 - 8,0]				16,2	83,2	4,4	20,0	75,2
	[2,0 - 4,0]			15,9	75,7	7,7	0,1	13,7	55,2
	[1,0 - 2,0]			35,4	6,1	0,2	0,0	13,3	41,5
	[0,5 - 1,0]			22,8	0,1	0,0	0,0	8,2	28,2
	[0,25 - 0,5]			15,3	0,1	0,0	0,0	5,5	20,0
	[0,125 - 0,25]			9,5	0,1	0,0	0,0	3,4	14,5
	[0,063 - 0,125]	0,0	100,0	0,1	0,2	0,0	0,0	4,1	11,1
< 0,063		100,0	0,0	0,9	1,5	0,3	0,2	7,0	7,0
Summe		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

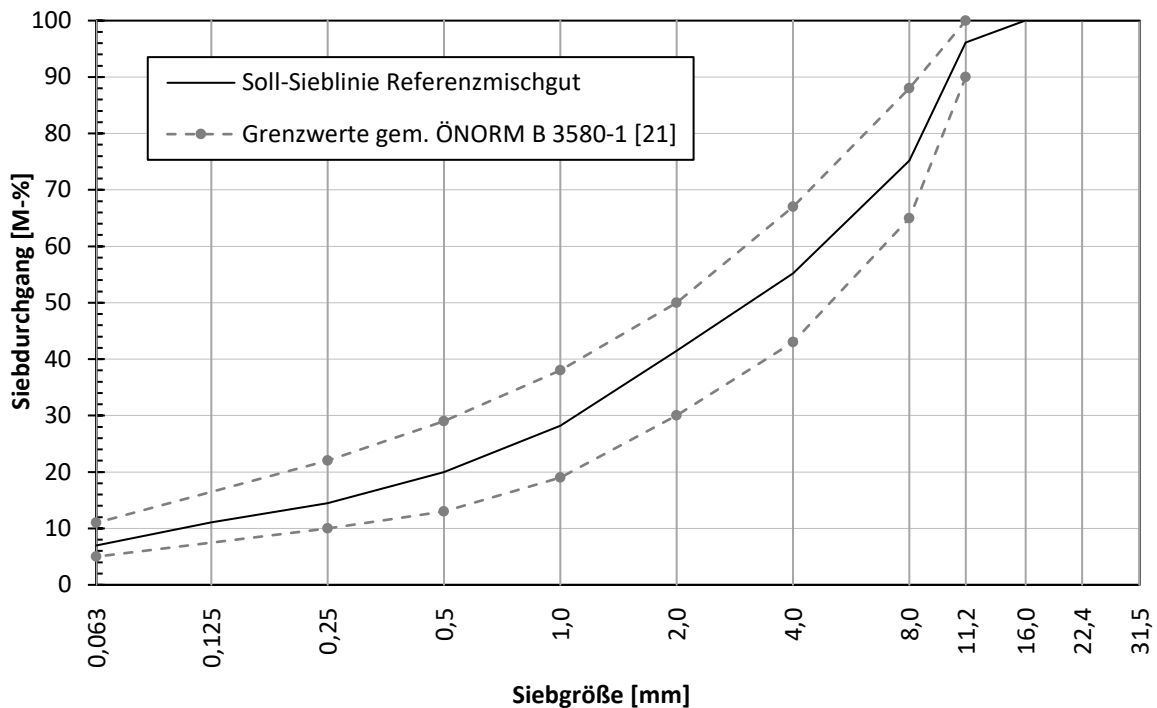


Abb.13 Soll-Sieblinie des Referenzmischguts AC deck 11 A1 und die dazugehörigen Grenzsieblinien gemäß ÖNORM B3580-1 [22]

3.3.2 BINDEMITTELGEHALT

Gemäß ÖNORM B 3580-1 muss der Mindest-Bindemittelgehalt zwischen 3,0 und 8,0 % liegen. Dieser Wertebereich bezieht sich auf ein Asphaltmischgut mit einer Gesteinskörnungsdichte von 2650 kg/m³. Bei Abweichungen der Gesteinskörnungsdichte zur Referenzdichte, muss der Mindest-Bindemittelgehalt durch Multiplikation mit einem Korrekturfaktor α angepasst werden. Der Mittelwert der Dichte der verwendeten Gesteinskörnung beträgt 2749 kg/m³. Der Korrekturfaktor ergibt sich zu:

$$\alpha = \frac{2,650}{2,749} = 0,964 \quad (8)$$

Der Mindest-Bitumengehalt des Referenzmischguts muss zwischen 2,9 und 7,7 % liegen. Es wurde ein, in Österreich geläufiger, Bindemittelgehalt von 5,2 % gewählt.

3.3.3 ASPHALTZUSAMMENSETZUNG

Mit der gewählten Sieblinie und dem gewählten Bindemittelgehalt, lassen sich die Anteile der Asphaltzusammensetzung errechnen. In Tab.7 sind die ermittelten Werte in Masse-Prozent angeführt. Die Füller- & Feinanteilkomponenten wurden in Eigen- und Fremdanteil unterteilt. Da sich das Gesteinsmehl beim Waschen der Gesteinskörnung nicht vollständig entfernen ließ, wurden die vorhandenen Feinanteile und Füller in der Mastixherstellung berücksichtigt. Das bedeutet, in jeder Mastixprobe wird ein dementsprechender Anteil von Porphyrgesteinsmehl hinzugefügt.

Tab.7 Asphaltzusammensetzung des Referenzmischguts

gewählter Massenanteil [M.-%]	Fremdfüller + Fremdfeinanteile		Eigenfüller + Eigenfeinanteile				Asphaltzusammensetzung	
	6,44	4,01	35,87	8,44	21,10	24,16	Lieferkörnung	[M.-%]
Lieferkörnung	0/0,063	0,063/0,125	0/2	2/4	4/8	8/11		
Korngrößen	[22,4 - 31,5]						[22,4 - 31,5]	0,0
	[16,0 - 22,4]						[16,0 - 22,4]	0,0
	[11,2 - 16,0]					16,3	[11,2 - 16,0]	3,7
	[8,0 - 11,2]				8,6	79,1	[8,0 - 11,2]	19,8
	[4,0 - 8,0]			16,2	83,2	4,4	[4,0 - 8,0]	18,9
	[2,0 - 4,0]		15,9	75,7	7,7	0,1	[2,0 - 4,0]	13,0
	[1,0 - 2,0]		35,4	6,1	0,2	0,0	[1,0 - 2,0]	12,6
	[0,5 - 1,0]		22,8	0,1	0,0	0,0	[0,5 - 1,0]	7,8
	[0,25 - 0,5]		15,3	0,1	0,0	0,0	[0,25 - 0,5]	5,2
	[0,125 - 0,25]		9,5	0,1	0,0	0,0	[0,125 - 0,25]	3,3
	[0,063 - 0,125]	0,0	100,0	0,1	0,2	0,0	[0,063 - 0,125]	0,1
	< 0,063	100,0	0,0	0,9	1,5	0,3	< 0,063	0,5
	Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	< 0,063 (Fremd)	6,1
							[0,063-0,125]	
							0,125 (Fremd)	3,8
								94,8

Bindemittelgehalt	5,2
Summe	100,0

3.4 MASTIX

Für die Ermüdungsversuche wurden Mastixproben mit jeweils 120 g Gesamtmasse hergestellt. Ausgehend von der benötigten Gesamtmasse des Asphaltmastix und der ermittelten Anteile des Referenzmischguts wurden die benötigten Massen der Mastixkomponenten ermittelt. Der Asphaltmastix setzt sich aus folgenden Massenanteilen des Referenzmischguts zusammen:

- 0,1 M-% Eigenfananteil, Porphyry/Kersantit
- 0,5 M-% Eigenfüller, Porphyry/Kersantit
- 3,8 M-% Fremdfinanteil
- 6,1 M-% Fremdfüller
- 5,2 M-% Bindemittel

In Bezug auf 120 g (100%) Asphaltmastix ergeben sich die Komponenten wie folgt:

- 0,58 g (0,48 %) Eigenfananteil, Porphyry/Kersantit
- 3,97 g (3,31 %) Eigenfüller, Porphyry/Kersantit
- 2,05 g (24,21 %) Fremdfinanteil
- 46,64 g (38,87 %) Fremdfüller
- 39,76 g (33,13 %) Bindemittel

Mit den in 3.2 angeführten Gesteinssorten wurden fünf verschiedene Mastixproben entsprechend folgender Arbeitsanweisung hergestellt:

- Einwaage der Gesteinsmehlkomponenten mit einer Genauigkeit von 0,01 g
- Homogenisieren der Gesteinsmehlkomponenten durch Rühren; ca. 5 Minuten
- Temperierung des homogenisierten Gemischs für 1 h bei $180\text{ °C} \pm 5\text{ K}$
- 10 min vor Ablauf der Temperierungszeit des Gesteinsmehlgemisches, das Bitumen mit Heißluftfön auf 180 °C erhitzen und im Mischgefäß einwiegen
- Bitumeneinwaage in den Ofen bei $180\text{ °C} \pm 5\text{ K}$ (bis zum Ablauf der Temperierungszeit des Gesteinsmehls) stellen
- Nach Ablauf der Temperierungszeit, das Gesteinsmehlgemisch unter ständigem Rühren, dem Bitumen beimengen.
- Mastixgemisch bis zur Verfestigung rühren (Kaltrühren)

In der nachfolgenden Tabelle sind die erstellten Mastixproben aufgelistet.

Tab.8 : Erstellte Mastixproben mit den entsprechenden Komponentenanteilen

Mastix	Gesteinsmehl (Eigen)			Gesteinsmehl (Fremd)			Bitumen		
	Labor-code	Gesteinssorte	Anteil	Labor-code	Gesteinssorte	Anteil	Labor-code	Bitumensorte	Anteil
MX0025	F116	Porphyр/ Kersantit 0/0,063	3,31%	F116	Porphyр/ Kersantit 0/0,063	38,87%	B655A	70/100	33,13%
	F117	Porphyр/ Kersantit 0,063/0,125	0,48%	F117	Porphyр/ Kersantit 0,063/0,125	24,21%			
MX0026	F116	Porphyр/ Kersantit 0/0,063	3,31%	F119	Granit 0/0,063	38,87%	B655A	70/100	33,13%
	F117	Porphyр/ Kersantit 0,063/0,125	0,48%	F120	Granit 0,063/0,125	24,21%			
MX0027	F116	Porphyр/ Kersantit 0/0,063	3,31%	F122	Basalt 0/0,063	38,87%	B655A	70/100	33,13%
	F117	Porphyр/ Kersantit 0,063/0,125	0,48%	F123	Basalt 0,063/0,125	24,21%			
MX0028	F116	Porphyр/ Kersantit 0/0,063	3,31%	F160	Kalkstein 0/0,063	38,87%	B655A	70/100	33,13%
	F117	Porphyр/ Kersantit 0,063/0,125	0,48%	F161	Kalkstein 0,063/0,125	24,21%			
MX0034	F116	Porphyр/ Kersantit 0/0,063	3,31%	F160	Kalkstein 0/0,063	38,87%	B642A	PmB 45/80-65	33,13%
	F117	Porphyр/ Kersantit 0,063/0,125	0,48%	F161	Kalkstein 0,063/0,125	24,21%			
MX0035	F116	Porphyр/ Kersantit 0/0,063	3,31%	F160	Kalkstein 0/0,063 (70%)	27,21%	B642A	PmB 45/80-65	33,13%
				F154	Kalkhydrat 0/0,063 (30%)	11,66%			
	F117	Porphyр/ Kersantit 0,063/0,125	0,48%	F155	Kalkhydrat 0,063/0,125 (30%)	7,26%			
				F161	Kalkstein 0,063/0,125 (70%)	16,95%			

Aus Tab.8 wird ersichtlich, dass in den Mastixproben MX0028 und MX0034 zwei verschiedene Fremdfüller verwendet wurden. Der Anteil des fremden Gesteinsmehls wurde im Verhältnis 70 zu 30 % zwischen Kalkstein und Kalkhydrat aufgeteilt. Damit soll die, in der Baupraxis übliche, Zugabe von Kalkhydrat zur Performancesteigerung des Asphalts berücksichtigt werden.

4 PRÜFMETHODIK

Für die Ermüdungsprüfung des Asphaltmastix bedarf es einer Prüfmethode, bei der eine hohe Anzahl an Lastwechsel in einer wirtschaftlich zumutbaren Zeit aufgebracht werden kann. Weiters soll der Materialeinsatz gering gehalten werden. Hierfür eignet sich das Dynamische Scherrheometer (DSR). Die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit erfolgt in der gegenständlichen Arbeit ausschließlich mit dem DSR. Die Funktionsweise des Dynamischen Scherrheometers ist in 2.6.2 beschrieben.

Die Versuchsdurchführung sowie die Festlegung der Randbedingungen erfolgt nach der Arbeitsanweisung von Hospodka [1] für eine interne Probekörpervorbereitung.

4.1 DAS PRÜFGERÄT

Aufgrund der höheren Steifigkeit von Asphaltmastix im Vergleich zu Bitumen, sind hohe Ansprüche an das DSR gestellt. Das Gerät muss in der Lage sein ein ausreichend hohes Drehmoment über mehrere Stunden bereitzustellen, ohne dass es zur Überhitzung des Motors kommt. Die Prüfgeometrie sollte nicht aus mehreren geklebten oder verschraubten Teilen bestehen, da es im Laufe der Zeit zu Lockerung oder Abriss der Bestandteile kommen könnte. Weiters sollte das Gerät über eine aktiv temperierte Abdeckhaube mit Luftspülung verfügen [1]. Das Dynamische Scherrheometer MCR 302 des Herstellers Anton Paar erfüllt alle diese Anforderungen. Sämtliche DSR Versuche wurden mit dem MCR 302 durchgeführt (vgl. Abb.14).



Abb.14 Dynamisches Scherrheometer MCR 302 von Anton Paar

4.2 PRÜFPARAMETER

In vorangegangenen Untersuchungen hat Hospodka [1] Randbedingungen für die prüftechnische Ansprache von Asphaltmastix festgelegt und ein Prüfverfahren entwickelt. Auf Basis dieser Festlegungen wurde eine Reihenuntersuchung zur Wiederholpräzision durchgeführt. Lt. Hospodka [1] konnte die Wiederholpräzision und somit die maßhaltige Herstellung der Probekörper sowie die homogene Verteilung des Füllers bzw. Feinanteils bestätigt werden. Dieses Prüfverfahren kommt bei den Ermüdungsuntersuchungen der gegenständlichen Arbeit zur Anwendung.

4.2.1 PRÜFTEMPERATUR UND BELASTUNGSFREQENZ

Die Prüftemperatur wurde konstant mit 10 °C festgelegt. Bei dieser Temperatur tritt kein Kriechen der Mastixprobe auf. Die Belastungsfrequenz beträgt 30 Hz. Das bedeutet 30 Lastzyklen (Belastung und Entlastung) pro Sekunde. Höhere Frequenzen führen zu höheren Energieeinträgen und somit zu Beeinflussungen aufgrund der hohen Temperatursensitivität [1].

4.2.2 PROBEKÖRPERGEOMETRIE

Die übliche Probekörpergeometrie des Platte-Platte Systems mit 8 mm Durchmesser und 2 mm Höhe (PP08) hat sich für die Mastixuntersuchung als ungeeignet erwiesen, da es zum Abriss am oberen oder unteren Interface (Kontaktfläche zwischen Mastixprobe und Prüfgeometrie oder Platte) gekommen ist. Da ausschließlich das Material geprüft werden soll und nicht die Haftzugfestigkeit zwischen Bitumen und Stahl, hat Hospodka [1] eine optimierte Prüfgeometrie entwickelt. Um den Bruch am Interface zu verhindern, wurde eine Einschnürung in der Mitte des Probekörpers vorgesehen, um eine Schubspannungsspitze in der Mitte der Prüfgeometrie zu erzielen. Die Höhe wurde auf 3 mm erhöht. Eine weitere Erhöhung stellte sich aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Bitumens und der Tatsache, dass nur die Statorplatte aktiv temperiert werden kann als ungünstig dar. Eine zu große Höhe des Probekörpers könnte zu Temperaturschwankungen am oberen Interface führen. Damit soll eine mögliche Sollbruchstelle verhindert werden. Durch die Einschnürung in der Mitte der Prüfgeometrie entstand ein Hyperboloid. Am oberen und am unteren Rand wurde ein Plateau von 0,3 mm ausgebildet, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden. Um die optimale Einschnürung zu ermitteln, wurden Probekörper mit Einschnürungen auf 7,5; 7,0; 6,5 und 6,0 mm modelliert und mittels FE-Simulation untersucht. Die Einschnürung mit 6 mm hat sich als optimale Prüfgeometrie erwiesen. Die entwickelte Prüfgeometrie ist in Abb.15 abgebildet. Mit präzisen Edelstahl-Positivformen und 2-Komponenten-Silikon wurden Negativformen für den Einbau des Prüfkörpers hergestellt. Sie Silikonwahl ist auf hohe Temperatur abgestimmt, sodass die Mastixproben mit Temperaturen von 180 °C eingebaut werden können. Nach dem Abkühlen kann der Überschüssige Asphaltmastix entfernt werden, oder nicht. Aufgrund der Einschnürung in der Mitte des Probekörpers, hat dieser Überschuss jedoch keinen Einfluss auf den Prüfquerschnitt [1].

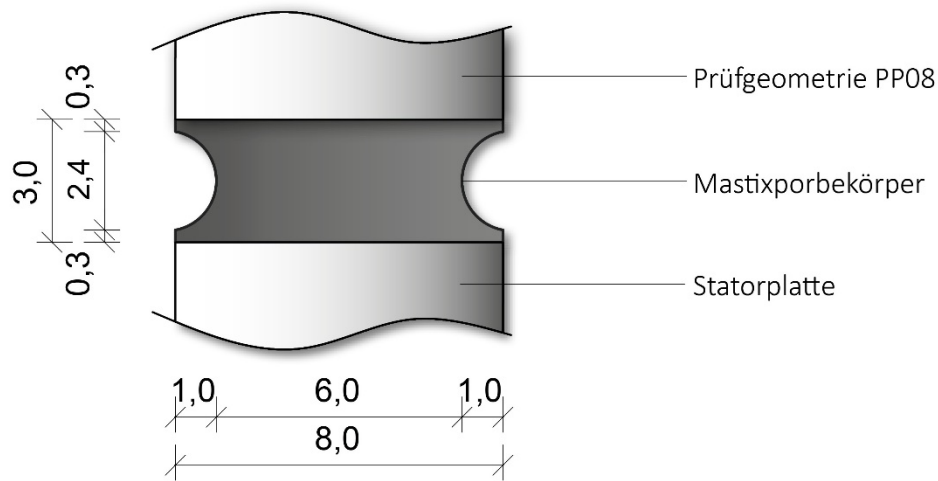


Abb.15 Prüfgeometrie gemäß Hospodka [1]

4.2.3 SCHUBSPANNUNG

Der Vergleich der unterschiedlichen Mastixproben erfolgt mittels Wöhlerkurven. Dafür werden die erreichten Lastwechsel bei unterschiedlichen Schubspannungen benötigt. Die Wahl der Schubspannung sollte gemäß Hospodka [1] nicht zu hoch angesetzt werden, da die Prüfung ansonsten nicht mehr im linear-viskosen Bereich durchgeführt wird und somit nicht mehr dem gebrauchungsverhaltensorientierten Ansatz entspricht. Im Gegensatz dazu sollte die Schubspannung nicht zu niedrig angesetzt werden, da die Prüfungen ansonsten eine unwirtschaftliche Prüfungsdauer erreichen. Die höchsten Schubspannungen wurden so gewählt, dass die Mindestprüfdauer 10 Minuten betrug und ein linearer Verlauf des komplexen Schubmoduls sich ausbildete. Da die Schubspannung kein direkt messbares Maß ist wird durch Umformung der Formel (3) das benötigte Drehmoment auf Basis der automatisch erkannten Prüfgeometrie berechnet und angefahren. Das bedeutet, bei der Prüfgeometrie PP08 - ein Platte-Platte System mit einem Durchmesser von 8 mm - und einer vorgegebenen Schubspannung von 300 kPa, wird ein elektrisches Drehmoment von:

$$M = \frac{\tau \cdot \pi \cdot r^3}{2} = \frac{0,3 \frac{N}{mm^2} * \pi \cdot (4 \text{ mm})^3}{2} \approx 30 \text{ Nmm} \quad (9)$$

angefahren. Da das Prüfgerät den Radius der Prüfgeometrie verwendet, wird aus Formel (3), (4) und (5) ersichtlich, dass die berechneten Werte der Schubspannung, des Phasenverschiebungswinkels und des komplexen Schubmoduls nur denen eines zylindrischen Probekörpers entsprechen können. Hospodka [1] hat versucht, über Korrekturfaktoren für die Schubspannung, die Deformation und das komplexe Schubmodul, die tatsächlichen Werte für den hyperbolischen Prüfkörper anzupassen. Zur Verifikation der Korrekturfaktoren, wurden dreifach Bestimmungsversuche an hyperbolischen und an zylindrischen Probekörpern durchgeführt. Die Schubspannungen in der Einschnürung der hyperbolischen Geometrie mit 6 mm sind um das 2,37-fache höher als die eines zylindrischen

Probekörpers mit 8 mm Durchmesser. Bei zwei Versuchen ist die Probe am Interface abgerissen. Bei dem einzigen positiv durchgeführten Versuch war der komplexe Schubmodul des zylindrischen Probekörpers um den Faktor 2,67 höher als der des hyperbolischen Prüfkörpers. Der berechnete Korrekturfaktor ergab jedoch 3,16. Laut Hospodka [1] ist es nicht möglich über eine lineare Rückrechnung auf die Schubspannungen in der Einschnürung zu schließen [1].

Bei allen Prüfungen wurden die automatisch berechneten Werte auf Basis der Prüfgeometrie PP08 nicht korrigiert. Da sämtliche Auswertungen und Interpretationen der gegenständlichen Arbeit ausschließlich auf vergleichende Untersuchungen basieren, ist die quantitative Beurteilung der Schubspannung nicht von großer Relevanz.

4.2.4 PROBEKÖRPERVORBEREITUNG

Die Vorbereitung sämtlicher Probekörper wurde gemäß der Arbeitsanweisung für die interne Probekörpervorbereitung von Hospodka [1] durchgeführt.

5 PRÜFPROGRAMM

5.1 MASTIX ERMÜDUNGSPRÜFUNGEN

Die Prüfparameter der Ermüdungsprüfungen sind in Kapitel 4.2 beschrieben. Es wurden fünf verschiedene Mastixproben mit Füller & Feinanteilen unterschiedlicher Gesteinssorten hergestellt. Zwei dieser Proben wurden zusätzlich mit unterschiedlichen Alterungsverfahren labortechnisch gealtert. Die insgesamt neun Mastixproben wurden mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers einer Ermüdungsprüfung unterzogen. Nachstehend sind die Versuchsrandbedingungen tabellarisch abgebildet.

Tab.9 Versuchsrandbedingungen

Prüffrequenz	Prüftemperatur	Prüfgeometrie	Probekörpergeometrie	DSR Modus
30 Hz	10 °C	"PP08" Platte-Platte-System Ø = 8 mm	Hyperboloid Höhe = 3 mm Ø Einschnürung = 6 mm Plateau = 0,3 mm Ø Rand = 8 mm	Spannungsgesteuert, visko elastisches Verhalten

Zum Vergleich der Ermüdungsfestigkeiten wurden Wöhlerkurven herangezogen. Dazu wurde dieselbe Mastixprobe mehreren Ermüdungsprüfungen auf verschiedenen Spannungsstufen unterzogen. Die Spannungsstufen bezeichnen die vorgegebene Schubspannung. Dieser Wert entspricht nicht der tatsächlichen Schubspannung in der Mitte des hyperboloidischen Probekörpers, vielmehr dem eines zylindrischen Probekörpers mit 8 mm Durchmesser. Der Grund dafür liegt in der Funktionsweise des Dynamischen Scherrheometers, die in Kap 4.2.3 beschrieben wird. Eine vergleichende Untersuchung ist deshalb nur zwischen Prüfkörpern derselben Geometrie möglich.

Das geplante Prüfprogramm der Mastix-Ermüdungsprüfungen ist in Tab.10 aufgelistet.

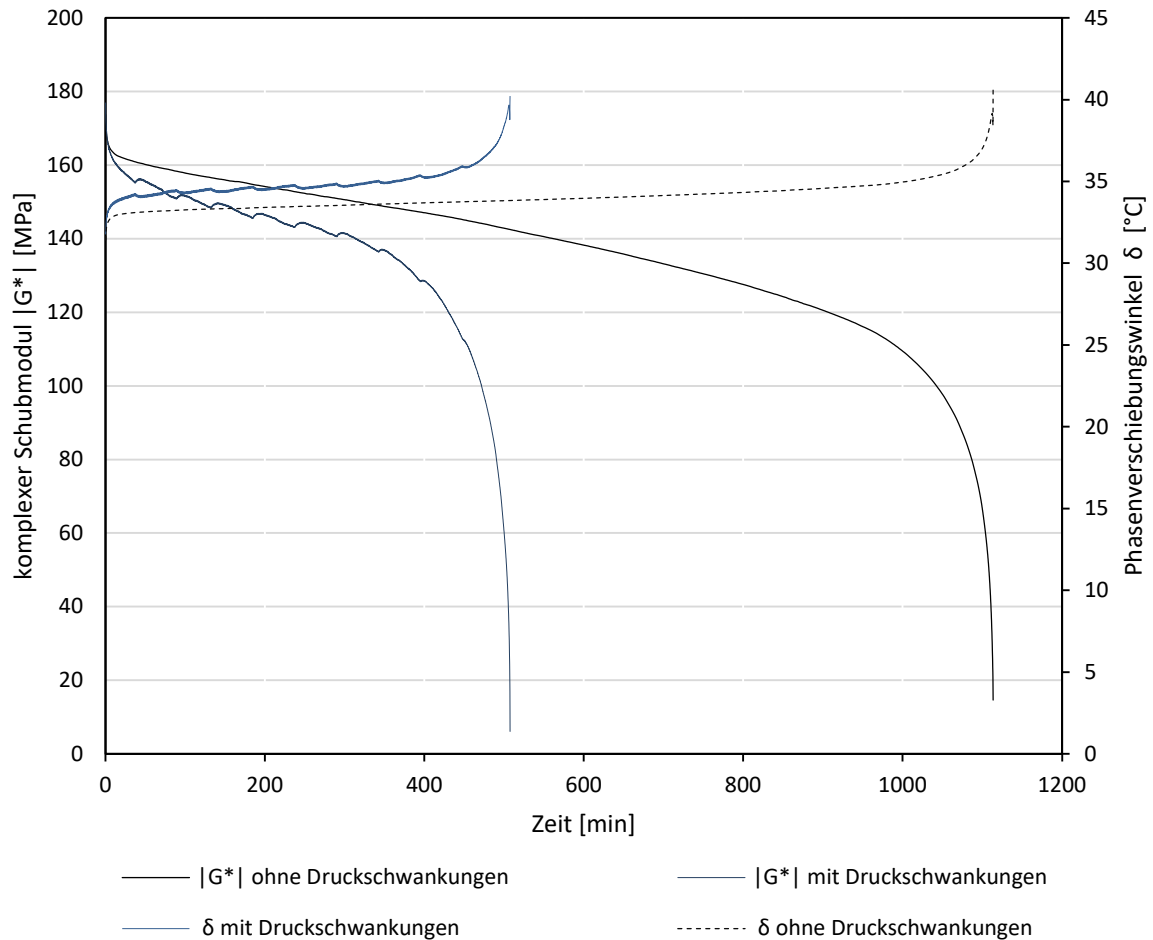
Während des Versuchs wurden der Betrag des komplexen Schubmoduls und der Phasenverschiebungswinkel automatisch berechnet und aufgezeichnet. Der ermittelte Ermüdungslastwechsel entspricht der Anzahl der Belastungen bis zum Erreichen des maximalen Phasenverschiebungswinkels. Nach Beginn der Versuchsdurchführung konnte beobachtet werden, dass bei den länger andauernden Versuchen (> 30 Minuten), es in nahezu regelmäßigen Abständen zu Sprüngen in der Aufzeichnung des Phasenverschiebungswinkels und des komplexen Schubmoduls kam. Während der Langzeitversuche haben Mitarbeiter des Instituts verschiedene Parameter des Prüfgeräts beobachtet und konnten die Ursache schlussendlich feststellen. Der Grund der Sprünge lag in einem periodischen spontanen Anstieg des Druckes in der Druckluftzufuhr, gefolgt von einem langsamen Abfall des Druckes, was zu einer Änderung des Volumenstroms in der Temperierhaube führte. Aufgrund der hohen Temperatursensitivität des Versuchsaufbaus, hatte das Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeiten. Dieser Druckabfall in der Zentralen Druckluftversorgung wiederholte sich regelmäßig in den Abständen von ca. 20 bis 90 Minuten. Durch Zwischenkoppeln eines Druckminderers konnten die Druckschwankungen ausgeglichen werden.

Tab.10 Geplantes Prüfprogramm der Mastix-Ermüdungsprüfungen

Laborcode	Füller & Fremdanteil, Fremd	Bitumen	Zustand	Schubspannungsstufen	Versuche/ Spannungsstufe	Versuche gesamt
MX0025	Porphyry/Kersantit	70/100	nicht gealtert	3	3	9
MX0026	Granit	70/100	nicht gealtert	3	3	9
MX0027	Basalt	70/100	nicht gealtert	3	3	9
MX0028	Kalkstein	70/100	nicht gealtert	3	3	9
MX0029	Kalkhydrat	70/100	nicht gealtert	3	3	9
MX0031	Porphyry/Kersantit	PmB 45/80-65	nicht gealtert	3	3	9
MX0032	Granit	PmB 45/80-65	nicht gealtert	3	3	9
MX0033	Basalt	PmB 45/80-65	nicht gealtert	3	3	9
MX0034	Kalkstein	PmB 45/80-65	nicht gealtert	3	3	9
MX0035	Kalkhydrat	PmB 45/80-65	nicht gealtert	3	3	9
MX0041	Kalkstein	70/100	RTFOT	3	3	9
MX0053	Kalkstein	70/100	RTFOT + PAV	3	3	9
MX0042	Kalkstein	70/100	VBA	3	3	9
MX0043	Kalkstein	PmB 45/80-65	RTFOT	3	3	9
MX0054	Kalkstein	PmB 45/80-65	RTFOT + PAV	3	3	9
MX0044	Kalkstein	PmB 45/80-65	VBA	3	3	9
SUMME						144

Nach einigen durchgeführten Versuchen erfolgte eine erste Datenanalyse. Der Vergleich mit Hospodka [1] hat ergeben, dass eine Beeinflussung der Ermüdungsfestigkeit durch die Druckschwankungen (vor allem bei den Langzeitversuchen) nicht ausgeschlossen werden konnte. Die Vergleichbarkeit zu Hospodka [1] besteht darin, dass dort auch mit demselben Prüfverfahren Ermüdungsuntersuchungen mehrerer Mastixproben mit konstantem Bindemittel-Füller-Verhältnis und derselben Bitumensorte durchgeführt wurden. Aus diesem Grund wurden zunächst drei Versuche mit niedriger Spannungsstufe wiederholt und mit den vorhandenen Ergebnissen verglichen. In Abb.16 wird die extreme Auswirkung der Druckluftschwankung im Prüfgerät ersichtlich. Die Sprünge aufgrund der Druckschwankungen sind deutlich erkennbar. Bei einem Ermüdungsversuch an der Probe MX0025 wurde das Materialversagen nach 508 Minuten bzw. nach 913.500 Lastwechseln erreicht. Nach Behebung des Druckluftproblems wurde mit derselben Probe das 2,2- fache an Lastwechseln erzielt; der Ermüdungslastwechsel betrug ca. 2 Millionen. Das entspricht einer Laufzeit von 1114 Minuten. Auf Basis dieser Erkenntnis wurden alle Langzeitversuche verworfen bzw. wurden für die Auswertung und Interpretation nicht herangezogen. Bei den kurzen Ermüdungsversuchen stellte die Druckschwankung keine relevante Beeinflussung der Ergebnisse dar.

Vergleich der DSR Prüfung mit und ohne Druckschwankung, MX 0025

**Abb.16** Vergleich der DSR Prüfung mit und ohne Druckschwankung anhand der Mastixprobe MX 0025

Aufgrund der begrenzten Bearbeitungszeit der gegenständlichen Arbeit konnten jedoch nicht alle Prüfungen erneut durchgeführt werden. Es wurden mindestens so viele Versuche wiederholt, dass eine plausible Wöhlerkurve erstellt werden konnte. Werte die den Anschein eines Ausreißers erweckten, wurden durch eine dreifach Bestimmung validiert. Die untersuchten Proben wurden auf ein Ausmaß reduziert, dass eine Auswirkung der Alterung untersucht werden konnte und mindestens vier verschiedene Gesteinssorten in den Untersuchungen berücksichtigt werden konnten. Die zur Auswertung und Interpretation gelangten Prüfungen sind in der nachstehenden Tabelle, Tab.11, angeführt.

Tab.11 Ausgeführtes Prüfprogramm der Mastix-Ermüdungsprüfungen

Laborcode	Füller & Fremdanteil, Fremd	Bitumen	Zustand	Schubspannungsstufe	Versuche/ Spannungsstufe	Versuche gesamt
MX0025	Porphyr/Kersantit	70/100	nicht gealtert	300 kPa	1	7
				400 kPa	3	
				500 kPa	3	
MX0026	Granit	70/100	nicht gealtert	300 kPa	3	8
				400 kPa	2	
				500 kPa	3	
MX0027	Basalt	70/100	nicht gealtert	300 kPa	2	5
				400 kPa	1	
				500 kPa	2	
MX0028	Kalkstein	70/100	nicht gealtert	300 kPa	1	7
				400 kPa	3	
				500 kPa	3	
MX0034	Kalkstein	PmB 45/80-65	nicht gealtert	400 kPa	1	4
				500 kPa	1	
				600 kPa	2	
MX0035	Kalkhydrat	PmB 45/80-65	nicht gealtert	500 kPa	1	7
				600 kPa	3	
				700 kPa	3	
MX0042	Kalkstein	70/100	RTFOT + VBA	600 kPa	2	6
				700 kPa	1	
				800 kPa	3	
MX0044	Kalkstein	PmB 45/80-65	RTFFOT + VBA	600 kPa	1	4
				700 kPa	1	
				800 kPa	2	
MX0053	Kalkstein	70/100	RTFOT + PAV	500 kPa	4	12
				600 kPa	4	
				700 kPa	4	
MX0054	Kalkstein	PmB 45/80-65	RTFOT + PAV	600 kPa	1	7
				700 kPa	3	
				800 kPa	3	
SUMME						67

6 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

6.1 ERMÜDUNGSKURVE

Die Ermüdungsprüfungen am Dynamischen Scherrheometer erfolgten alle als CSS-Versuche. CSS bedeutet Controlled Shear Stress. Bei diesem Prüfmodus wird die Schubspannung vorgegeben und die daraus resultierenden Beträge des komplexen Schubmoduls und des Phasenverschiebungswinkels automatisch berechnet. Als grafische Auswertung erhält man eine Ermüdungskurve, wie in Abb.17 beispielhaft dargestellt.

Die Ermüdungskurve lässt sich in vier Phasen gliedern. Die Einschwingphase, der annähernd lineare Bereich in dem Mikrorisse entstehen, die Phase indem der Schubmodul abfällt bzw. der Phasenverschiebungswinkel zunimmt und Makrorisse entstehen und schlussendlich der Bereich des Materialversagens.

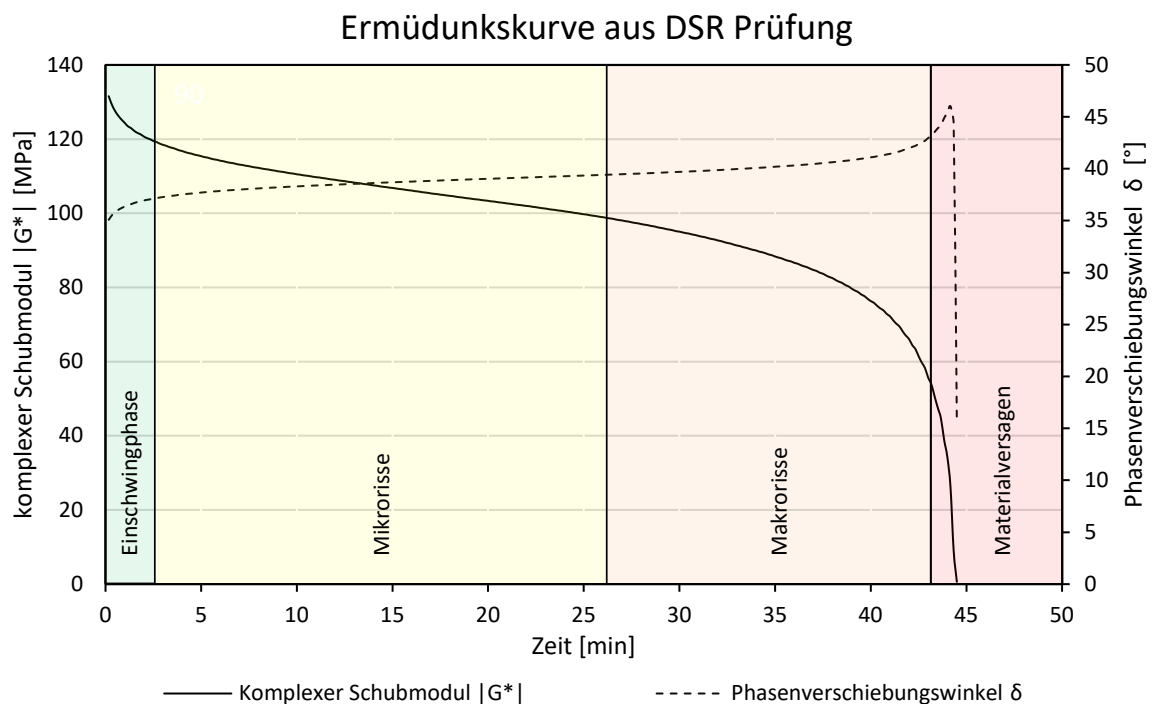


Abb.17 Beispielhafte Ermüdungskurve als Ergebnis einer DSR Prüfung

Die Einschwingphase ist durch den starken Abfall des komplexen Schubmoduls gekennzeichnet. Die Ermüdung ist nicht die einzige Ursache des Verlusts des Verformungswiderstandes. Die Thixotropie des Bitumens ist für dieses Phänomen mitverantwortlich. Durch die andauernde Belastung kommt es zur Abnahme der Viskosität und nimmt erst nach Entlastung wieder zu, somit ist dieser Vorgang zumindest teilweise reversibel. Das bedeutet, in den Belastungspausen kann die Viskosität wieder zunehmen. In der Phase, in der die ersten Mikrorisse entstehen, nimmt der komplexe Schubmodul annähernd linear ab. Die entstandenen Mikrorisse nehmen bei anhaltender Belastung zu und entwickeln sich weiter zu Makrorissen, bis am Schluss das Versagen eintritt. Der Bruch der Probe ist am besten am Maximum des Phasenverschiebungswinkels zu erkennen [24].

6.2 WÖHLERKURVE

Mit den erzielten Ermüdungslastwechsel bei einer vorgegebenen Spannungsstufe können Wöhlerkurven erstellt werden. Dazu werden die Lastwechsel und die Spannungsstufen, wie in Abb.18, in einem Streudiagramm gegenübergestellt. Die Lastwechsel auf der Abszisse (x-Achse) und die Schubspannung auf der Ordinate (y-Achse). Durch eine Regressionsanalyse lässt sich eine Funktion ermitteln, die die Korrelation der Punkte beschreibt. Diese Kurve wird als Regressionskurve bezeichnet. In Abb.18 links, ist die Regression zwischen der Schubspannung und dem Lastwechsel anhand einer logarithmischen Regressionskurve abgebildet. Ändert man die Darstellung der Abszisse von einer Linearen in eine Logarithmische, wird die Regressionskurve (Wöhlerkurve) als Gerade abgebildet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 stellt eine quantitative Beurteilung der Anpassungsgüte der Modellfunktion dar. Das bedeutet, je höher das Bestimmtheitsmaß, desto genauer werden die Punkte durch die Regressionsfunktion beschrieben. Die Ermittlung der Wöhlerkurve dient dem direkten Vergleich der einzelnen Proben, weil z. B. die Schubspannung bei 10^6 Lastwechseln damit berechnet werden kann (τ_6). Es können auch umgekehrt die Schubspannungen bei einem vorgegeben Lastwechsel berechnet und verglichen werden.

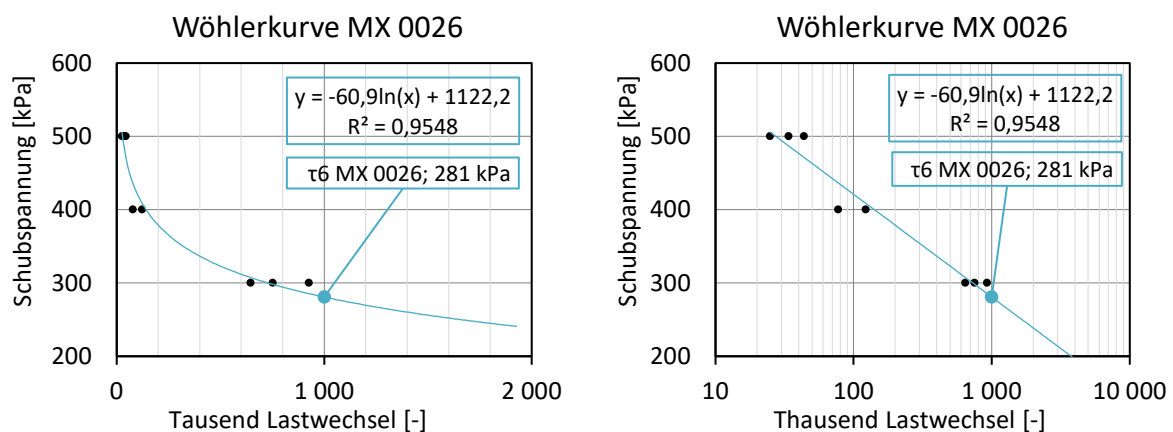


Abb.18 Wöhlerkurven der Probe MX0026 dargestellt auf einer linearen Achse (links) und auf einer logarithmischen Achse (rechts)

6.3 ERMÜDUNGSPRÜFUNGEN DER UNGEALTERTEN MASTIXPROBEN

In Abb.19 sind die ermittelten Wöhlerkurven der ungealterten Mastixproben mit dem Straßenbitumen 70/100 dargestellt. Die Proben MX 0025, MX 0026, MX 0027 und MX 0028 unterscheiden sich lediglich in der Gesteinssorte der fremden Füller & Feinanteile. Das Bitumen-Füller & Feinanteil-Verhältnis und die Bitumensorte sind bei allen Proben ident. Bis auf die Probe MX 0028 verlaufen die Wöhlerkurven parallel. Wenn wir die Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel (τ_6) vergleichen, erreichte die Probe MX 0025 mit 337 kPa die höchste Ermüdungsfestigkeit. Den geringsten τ_6 Wert erreichte die Probe MX 0026 mit 281 kPa. Die Proben MX 0027 und MX 0028 liegen im unteren Drittel mit 294 und 290 kPa. Die Bestimmtheitsmaße der Wöhlerkurven liegen zwischen 0,84 und 0,98 und stellen akzeptable Maße der Anpassungsgüte dar. Die abweichende Steigung der Wöhlerkurve MX 0028 kann

aufgrund der mangelnden Anzahl an Datenpunkten nicht statistisch belegt werden. Das bedeutet, da nur ein Datenpunkt für die Schubspannung von 300 kPa vorhanden ist, hat dieser einen hohen Einfluss auf die Steigung der Wöhlerkurve.

In Abb.20 sind die Wöhlerkurven der untersuchten Proben mit dem Polymermodifizierten Bitumen PmB 45/80-65 dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Proben MX 0034 und MX 0035. Diese Proben unterscheiden sich wiederum nur in der Gesteinssorte der fremden Füller & Feinanteile. Die Probe MX 0034 wurde zu 100 % mit dem Kalksteinmehl hergestellt. Die Probe MX 0035 besteht zu 70 % aus dem zuvor erwähnten Kalksteinmehl und zu 30 % aus dem Kalkhydrat. Das Bestimmtheitsmaß der beiden Kurven ist mit 97 % und 99 % sehr hoch. Die erzielten τ_6 Werte liegen bei 509 und 333 kPa. Die höhere Ermüdungsfestigkeit der Probe MX 0035 mit dem Kalkhydrat bestätigt die in 3.2 erwähnte Performancesteigerung durch die Zugabe von Kalkhydrat.

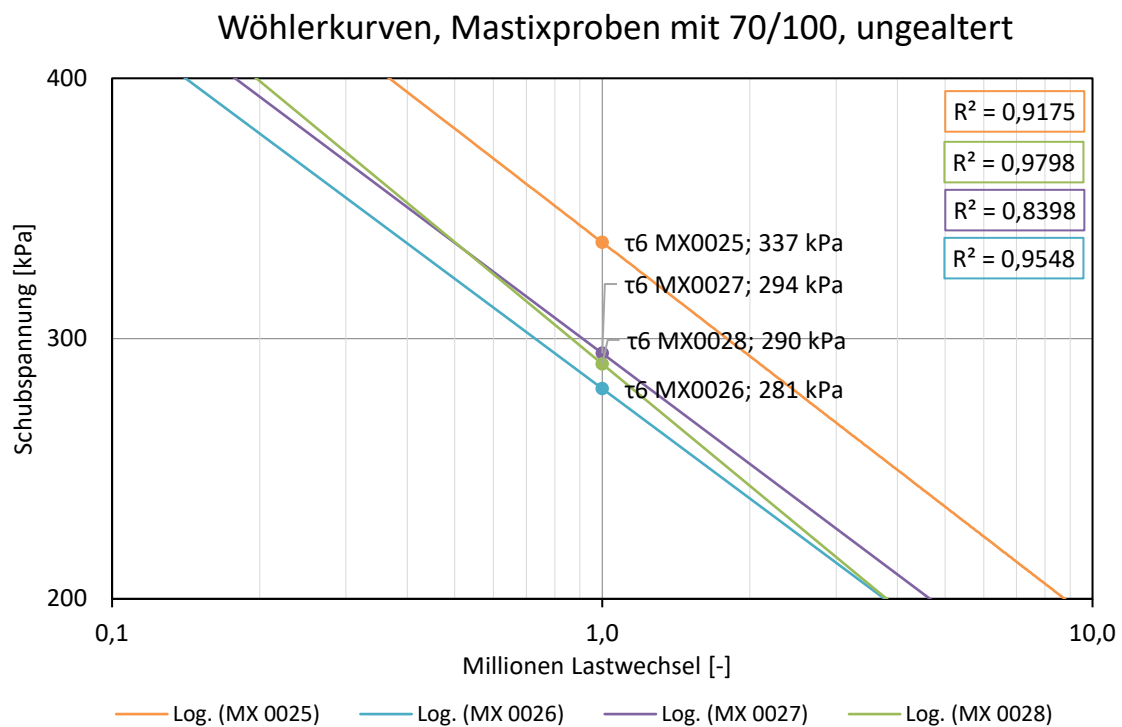


Abb.19 Wöhlerkurven der ungealterten Mastixproben mit dem Straßenbaubitumen 70/100

Wöhlerkurven, Mastixproben mit PmB 45/80-65, ungealtert

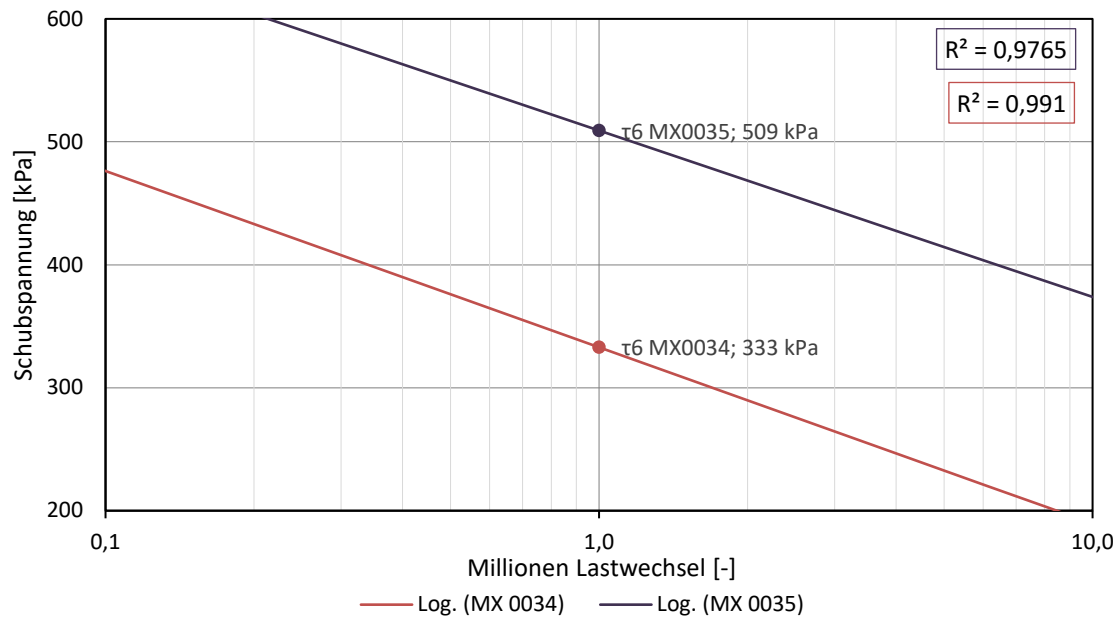


Abb.20 Wöhlerkurven der ungealterten Mastixproben mit dem Polymermodifiziertem Bitumen PmB 45/80-65

6.3.1 EINFLUSS DER GESTEINSSORTE

Im Allgemeinen ist das Haftverhalten von Bitumen zu basischen Gesteinssorten sehr gut. Saure, silikatische Gesteine weisen ungünstige Hafteigenschaften gegenüber dem Bitumen auf. Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wurden die Mineralogie der Gesteinssorten und der pH-Wert nicht untersucht. Im Asphalthandbuch [9] wird das gute Haftvermögen von Basalt und Kalkstein aufgrund der Basizität, sowie die geringeren Hafteigenschaften von Granit mit Bitumen beschrieben [9]. Das positive Haftverhalten von Basalt und Kalkstein sowie die Performancesteigerung von Kalkhydrat wird durch den erzielten τ_6 Wert bestätigt. Der Granit erreicht die geringste Schubspannung mit 281 kPa. Das saure Gestein und das damit verbundene, schlechte Haftverhalten spiegeln sich in der geringen Ermüdungsfestigkeit wieder. Die allgemeine Bezeichnung Porphyry bezieht sich eher auf die Struktur des Gesteins, als auf die mineralogische Zusammensetzung. Kann man den Trend der Abb.21 und Abb.22 glauben, sollte die mineralogische Zusammensetzung des Porphyrs überwiegend basischer Herkunft sein. Aufgrund der fehlenden Informationen der Mineralogie und des pH-Wertes, kann das nicht bestätigt werden. Mit der Reindichte der Gesteinssorten lässt sich auch kein Zusammenhang mit der Ermüdungsfestigkeit ableiten. Die ermittelten Reindichten sind in Tab.12 angeführt.

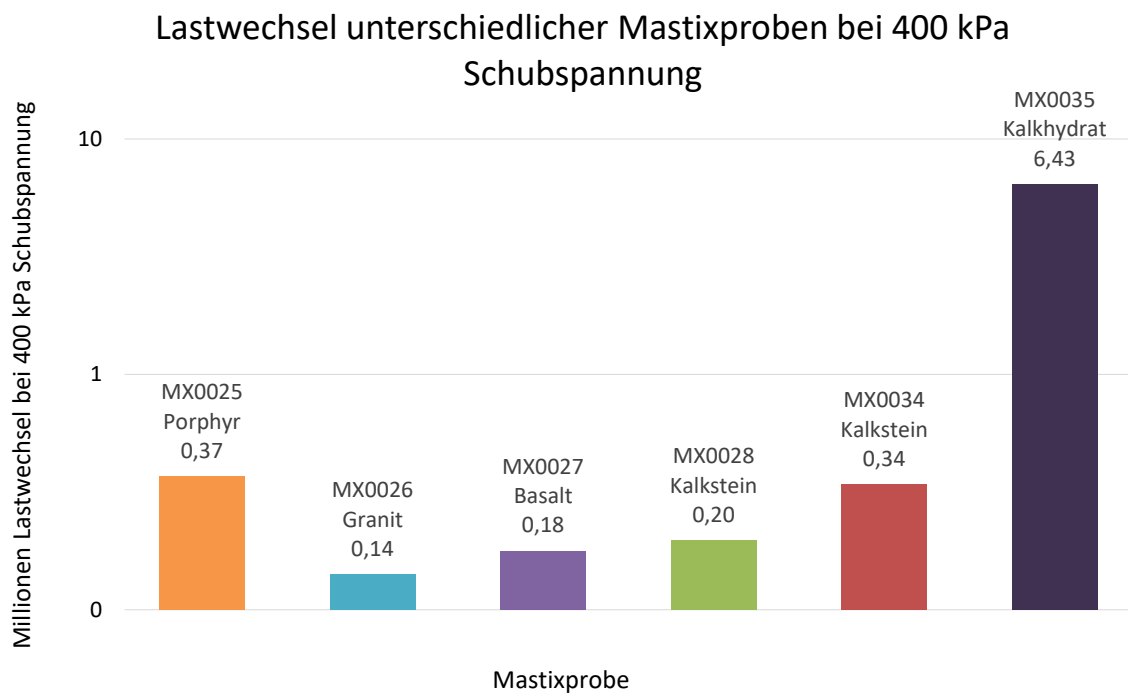


Abb.21 Lastwechsel der ungealterten Mastixproben bei 400 kPa Schubspannung

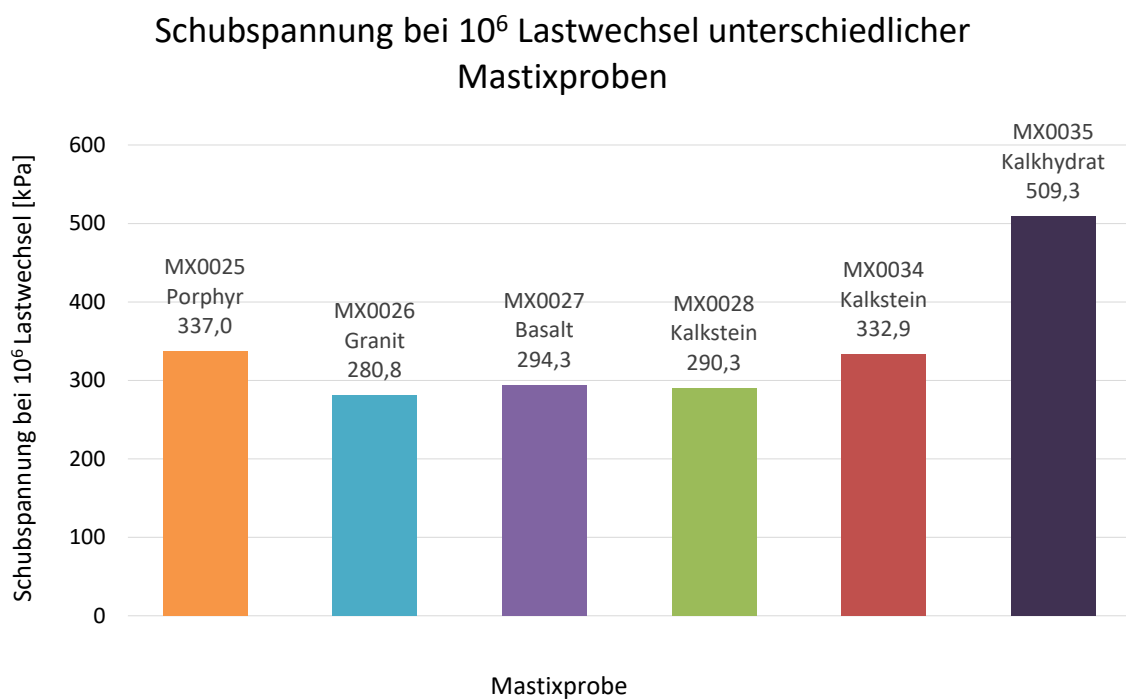


Abb.22 Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel (τ_6) der ungealterten Mastixproben

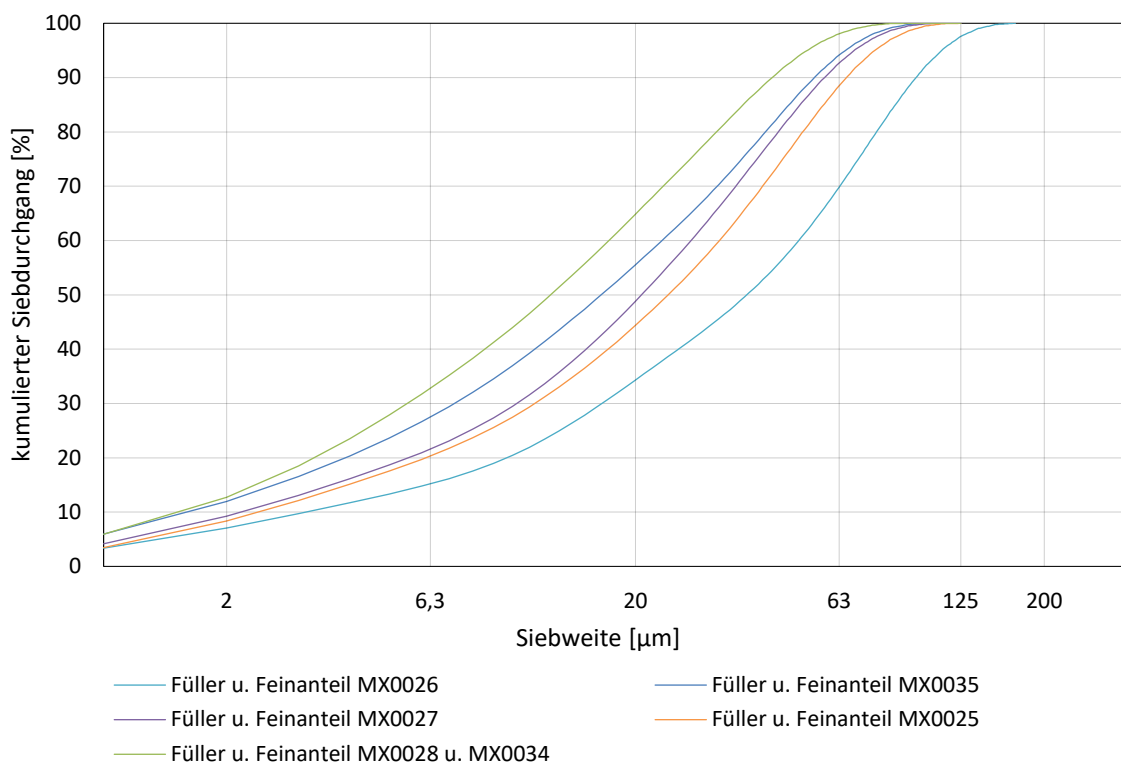
Tab.12 Reindichten der Füller & Feinanteile der ungealterten Mastixproben

Probe	Bezeichnung	Bitumen	Zustand	Reindichte [g/cm ³]
MX 0025	Porphyry/Kersantit	70/100	n. gealtert	2,87
MX 0026	Granit	70/100	n. gealtert	2,78
MX 0027	Basalt	70/100	n. gealtert	3,00
MX 0028	Kalkstein	70/100	n. gealtert	2,72
MX 0034	Kalkstein	PmB 45/80-65	n. gealtert	2,72
MX 0035	Kalkstein & Kalkhydrat	PmB 45/80-65	n. gealtert	2,57

6.3.2 EINFLUSS DER SIEBLINIENRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN

Die Korngrößenverteilung des Füller & Feinanteil-Gemisches der verschiedenen Mastixproben wurde mit Hilfe eines Laser-Partikelmessgeräts ermittelt. Die untersuchten Korngrößen reichen von 1 µm bis 125 µm; mit Ausnahme der Probe MX 0026, dort waren noch Partikel bis 170 µm vorhanden. In der Abb.23 sind die ermittelten Sieblinien grafisch dargestellt. Die Sieblinien sind bis auf MX 0026 ähnlich. Sie sind alle weit gestuft und weisen ähnliche Ungleichförmigkeitszahlen C_u und Krümmungszahlen C_c auf (mit Ausnahme von MX 0026).

Sieblinien der Füller & Feinanteile der Mastixrezeptur

**Abb.23** Sieblinien der Füller & Feinanteil Gemische der Mastixproben

Zur Untersuchung der sieblinienrelevanten Eigenschaften in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit werden folgende Parameter der Sieblinien ermittelt:

d_{60} Korngröße bei 60 % Massedurchgang der Sieblinie

d_{10} Korngröße bei 10 % Massedurchgang der Sieblinie

d_{30} Korngröße bei 30 % Massedurchgang der Sieblinie

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Ungleichförmigkeitszahl} \quad (10)$$

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad \text{Krümmungszahl} \quad (11)$$

Siebdurchgänge: <6,3 μm ; <20 μm ; <63 μm ; <125 μm

Die ermittelten Parameter sind in der nachfolgenden Tabelle, Tab.13 aufgelistet.

Tab.13 Sieblinienrelevante Eigenschaften der Füller- & Feinanteilgemische der Mastixproben

Probe	Zustand	Cu [-]	Cc [-]	<6,3 μm [%]	<20 μm [%]	<63 μm [%]	<125 μm [%]	d10 [μm]	d30 [μm]	d60 [μm]
MX 0025	n. gealtert	13,18	1,65	19,69	42,88	87,92	99,99	2,43	11,35	32,09
MX 0026	n. gealtert	16,02	1,75	14,78	33,12	69,11	97,42	3,13	16,58	50,20
MX 0027	n. gealtert	12,45	1,75	20,94	47,11	92,22	100,00	2,20	10,25	27,36
MX 0028	n. gealtert	10,78	1,12	31,68	63,18	97,89	100,00	1,60	5,56	17,23
MX 0034	n. gealtert	10,78	1,12	31,68	63,18	97,89	100,00	1,60	5,56	17,23
MX 0035	n. gealtert	13,88	1,34	26,62	54,05	93,76	100,00	1,67	7,22	23,23

Auf Basis von Hospodka [1] wurde mit Hilfe der Korrelationsanalyse versucht, ein Zusammenhang zwischen den Parametern der sieblinienrelevanten Eigenschaften (Einflussvariablen) und der Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel (Zielvariablen τ_6) zu ermitteln. Dazu wurden das Bestimmtheitsmaß R^2 und die Signifikanz berechnet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 stellt eine quantitative Beurteilung der Anpassungsgüte der Modellgeraden dar. Das bedeutet, je höher das Bestimmtheitsmaß, desto genauer werden die Punkte durch die Modellgerade beschrieben. Das Signifikanzniveau schätzt ab, wie zufällig die Korrelation der betrachteten Variablen ist. Ein Signifikanzniveau von <1 % bedeutet sehr signifikant und <0,1 % hoch signifikant. Ab 5 % kann von keiner Signifikanz ausgegangen werden. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in der nachstehenden Tabelle aufgelistet.

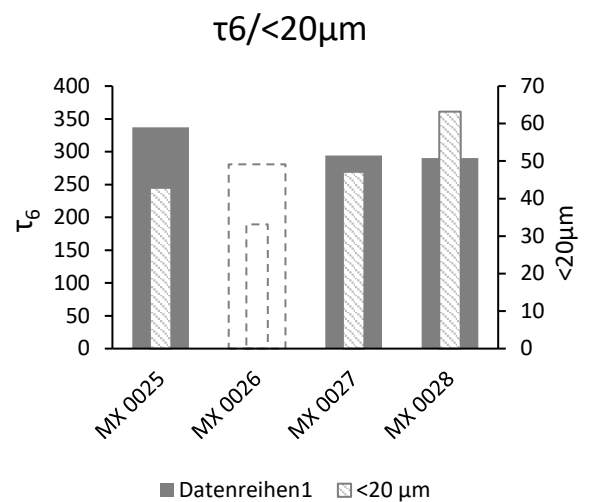
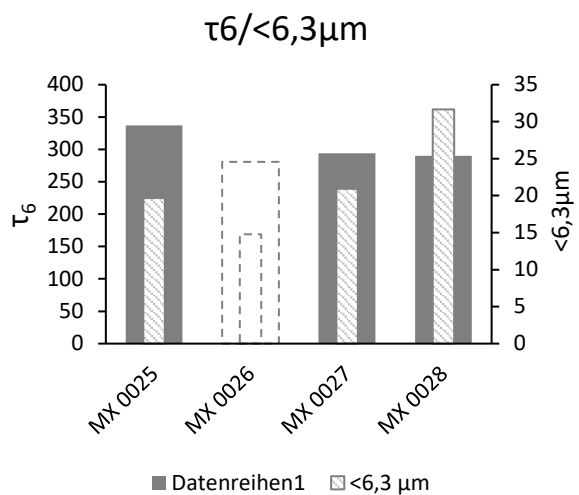
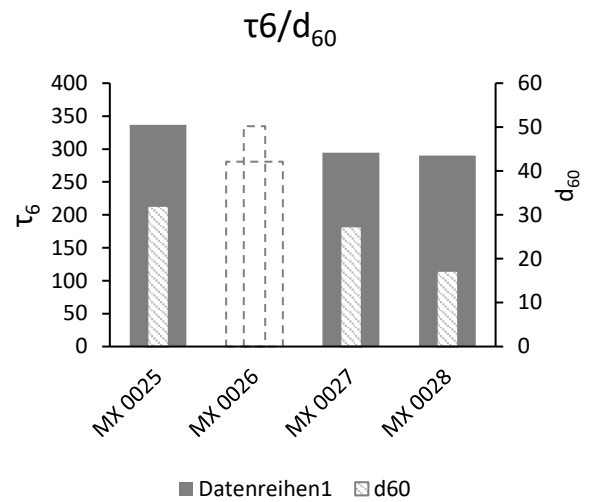
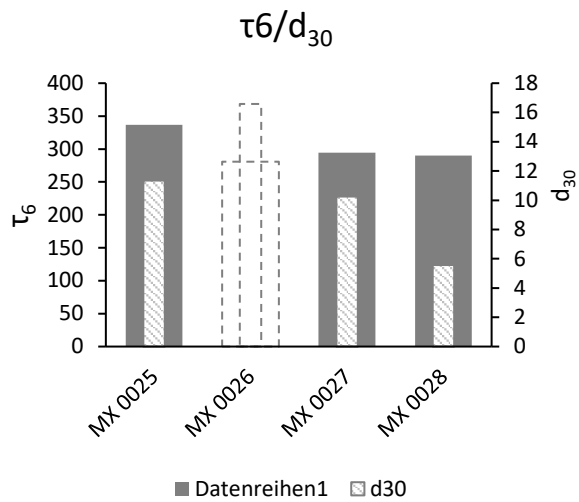
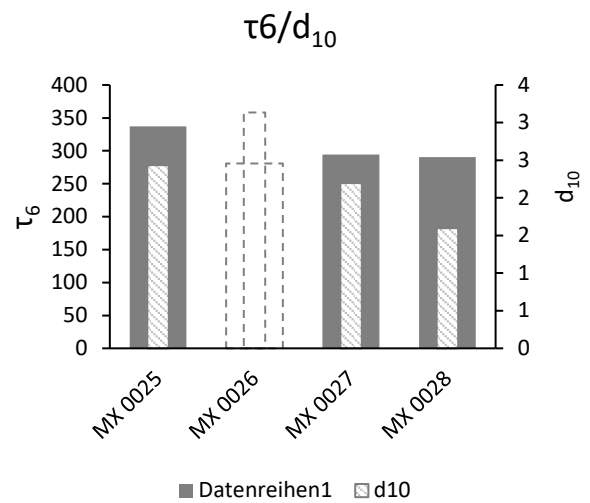
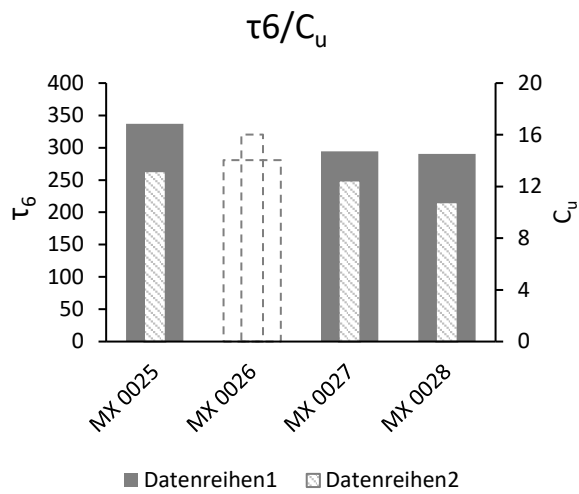
Tab.14 Ergebnisse der Korrelationsanalyse

Parameter	Korrelation [-]	Bestimmtheitsmaß [-]	Signifikanz [%]
τ_6	1,00	1,00	-
Cu	-0,13	0,02	87,27%
Cc	0,15	0,02	85,20%
<6,3 μm	-0,10	0,01	90,46%
<20 μm	-0,08	0,01	92,10%
<63 μm	0,22	0,05	77,62%
<125 μm	0,49	0,24	50,52%
d10	0,27	0,07	73,14%
d30	-0,04	0,00	95,69%
d60	-0,07	0,01	92,56%
Reindichte	-0,13	0,02	86,62%

Anzahl Stichproben = 4

Bei keinem der Parameter lässt sich die Korrelation mit Hilfe einer Modellgeraden mit ausreichender Qualität beschreiben. Eine Signifikanz der Korrelation ist auch nicht gegeben. Der Grund dafür liegt in der geringen Anzahl der Stichproben. Deshalb kann die Korrelationsanalyse nicht zuverlässig für die Untersuchung der sieblinienrelevanten Eigenschaften in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit herangezogen werden. Jedoch lässt sich ein qualitativer Zusammenhang der Parameter aus der Anschauung beschreiben.

Vergleicht man die Parameter der Sieblinien der ungealterten Mastixproben, die mit dem Straßenbaubitumen 70/100 hergestellt wurden, mit den dazugehörigen Schubspannungen bei 10^6 Lastwechseln (Abb.24), lässt sich mit einer Ausnahme ein Zusammenhang erkennen. Betrachtet man die Sieblinienparameter der Probe MX 0026 (Granit) als Ausreißer, können alle Parameter außer C_c , Reindichte und <125 μm qualitativ in Zusammenhang zur Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel gebracht werden. Das heißt es kann eine positive oder negative Korrelation qualitativ beschrieben werden. Bei der Ungleichförmigkeitszahl C_u und den Korngrößen bei 10, 30 und 60 % Siebdurchgang besteht eine positive Korrelation. Mit der Abnahme der Sieblinienkennwerte nimmt auch die Schubspannung ab. Bei den anderen Werten, die Massenanteile <6,3 μm , <20 μm und <63 μm ist es umgekehrt. Während die Sieblinienkennwerte ansteigen, fallen die Schubspannungen. Bei der Reindichte, der Krümmungszahl C_c und dem Massenanteil <125 μm ist kein Zusammenhang mit der Ermüdungsfestigkeit erkennbar.



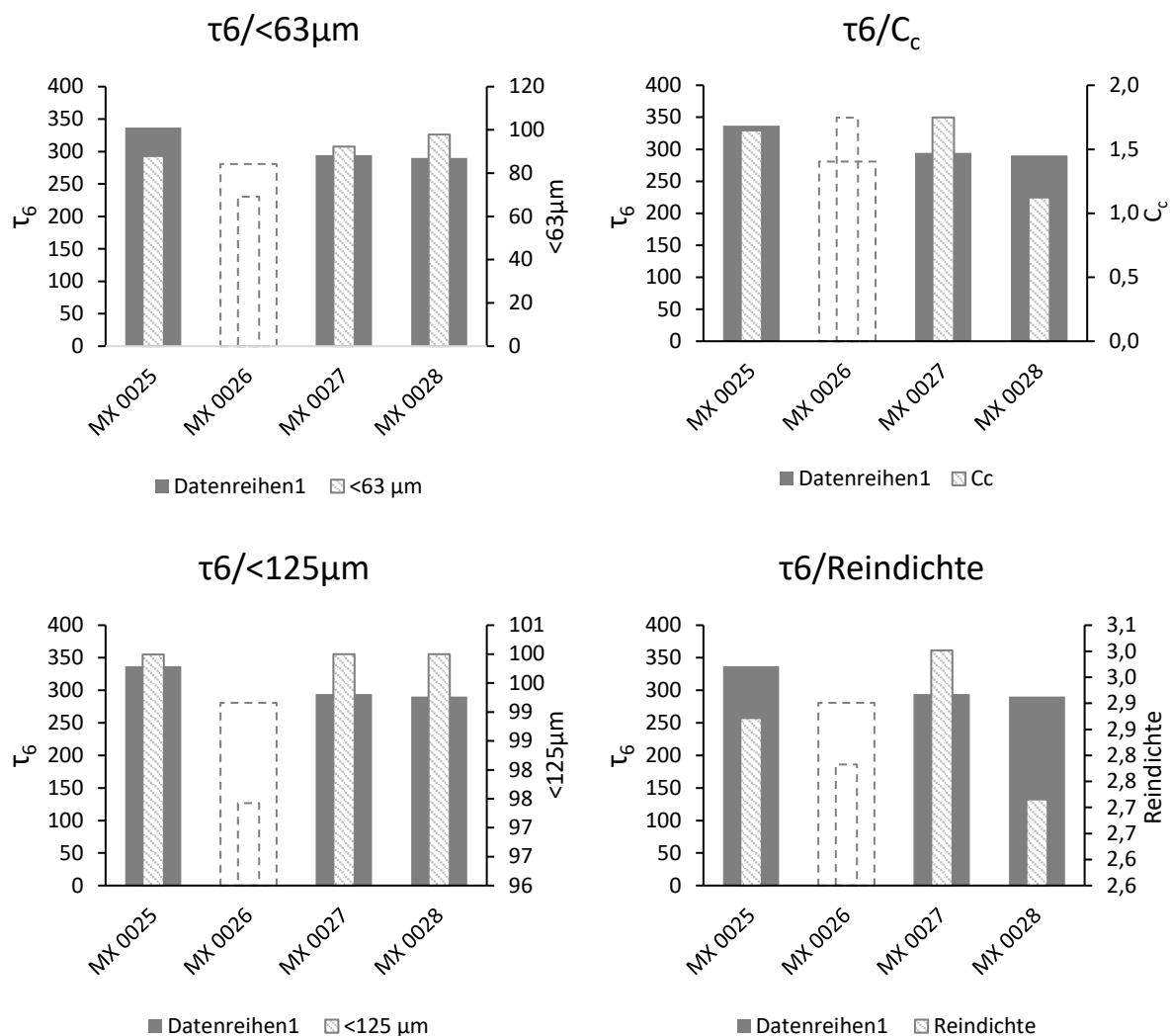


Abb.24 Vergleich der sieblinienrelevanten Eigenschaften mit der Schubspannung bei 10^6 Lastwechseln (τ_6)

6.4 ERMÜDUNGSPRÜFUNGEN DER GEALTERTEN MASTIXPROBEN

Um die Auswirkungen der Alterung auf die Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen, wurden die Mastixproben mit dem Kalkstein als Fremd-Füller & Feinanteil verwendet. Das sind die Mastixproben MX 0028 und MX 0035. Die beiden Proben unterscheiden sich in der verwendeten Bitumensorte. Beim MX 0028 wurde ein Straßenbaubitumen 70/100 verwendet und beim MX 0034 ein Polymermodifiziertes Bitumen 45/80-65. Die Proben wurden mit zwei verschiedenen Alterungsmethoden labortechnisch gealtert. Anschließend wurde die Ermüdungsfestigkeit am DSR untersucht. Die angewendeten Alterungsmethoden sind die kombinierte RTFOT+PAV Alterung und die RTFOT+VBA Alterung. Die Methoden sind in 2.2.4.3 beschrieben. Die Probe MX 0028 wurde nach Durchführung der labortechnischen Alterung mit folgenden Laborcodes bezeichnet: MX 0053 (RTFOT+PAV) und MX 0042 (RTFOT+VBA). Bei der Probe MX 0034 war die Bezeichnung folgende: MX 0054 (RTFOT+PAV) und MX 0044 (RTFOT+VBA).

In Abb.25 sind die ermittelten Wöhlerkurven der gealterten Mastixproben mit dem Straßenbaubitumen 70/100 und die dazugehörige Ausgangsprobe in ungealtertem Zustand dargestellt. Die drei Proben unterscheiden sich lediglich im Alterungszustand. Die Gesteinssorte, das Bitumen-Füller & Feinanteil-Verhältnis und die Bitumensorte ist bei allen Proben ident. Der Verlauf der Wöhlerkurve MX 0053 ist im Vergleich zur ungealterten Probe MX 0028 relativ parallel; die der Probe MX 0042 fällt steiler ab. MX 0028 erreicht einen τ_6 Wert bei 10^6 Lastwechseln von 290 kPa. Bei den gealterten Proben sind es 526 kPa (MX 0053) und 631 kPa (MX 0042). Die Ermüdungsfestigkeiten der gealterten Proben sind höher, als die der ungealterten Probe. Das Gleiche konnte bei den Proben mit dem Polymermodifizierten Bitumen beobachtet werden (vgl. Abb.26). Die Steigung der drei Wöhlerkurven sind annähernd gleich. Eine Übereinstimmung mit den Proben mit 70/100 besteht in der Korrelation zwischen Alterungsmethode und erzielten Lastwechseln. Die Proben die mit der VBA-Methode gealtert wurden, weisen die höchste Ermüdungsfestigkeit auf.

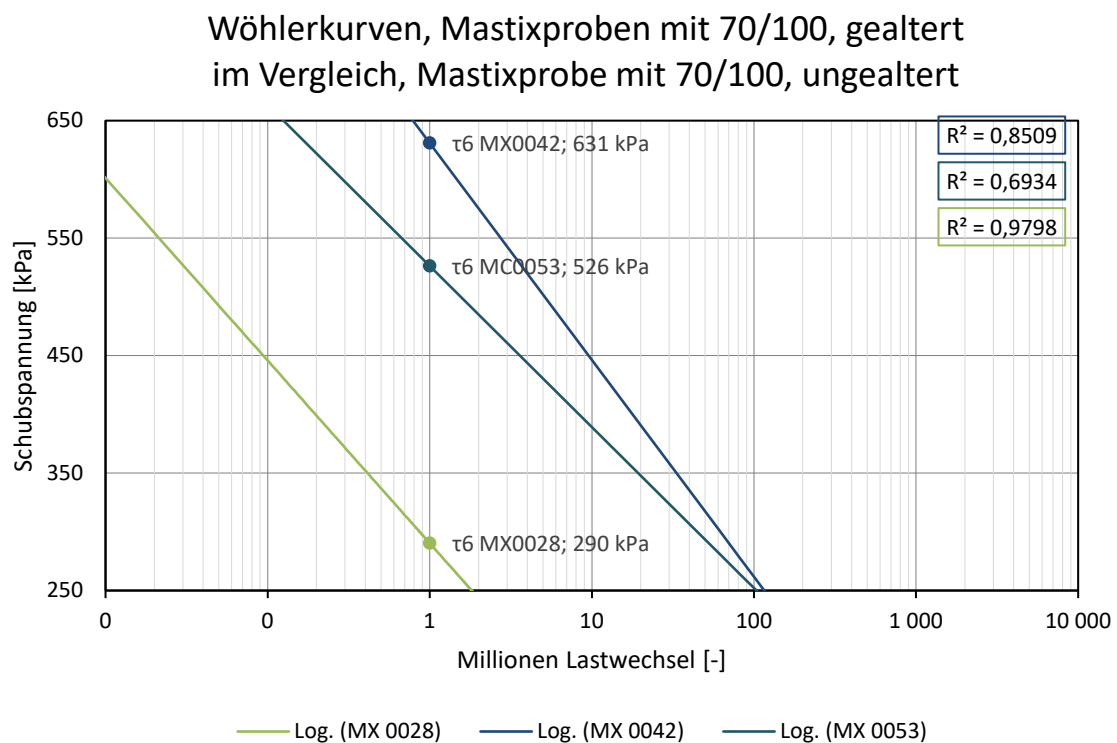


Abb.25 Wöhlerkurven der gealterten Mastixproben mit dem Straßenbaubitumen 70/100 im Vergleich zur ungealterten Mastixprobe

Wöhlerkurven, Mastixproben mit PmB 45/80-65, gealtert im Vergleich, Mastixprobe mit PmB 45/80-65, ungealtert

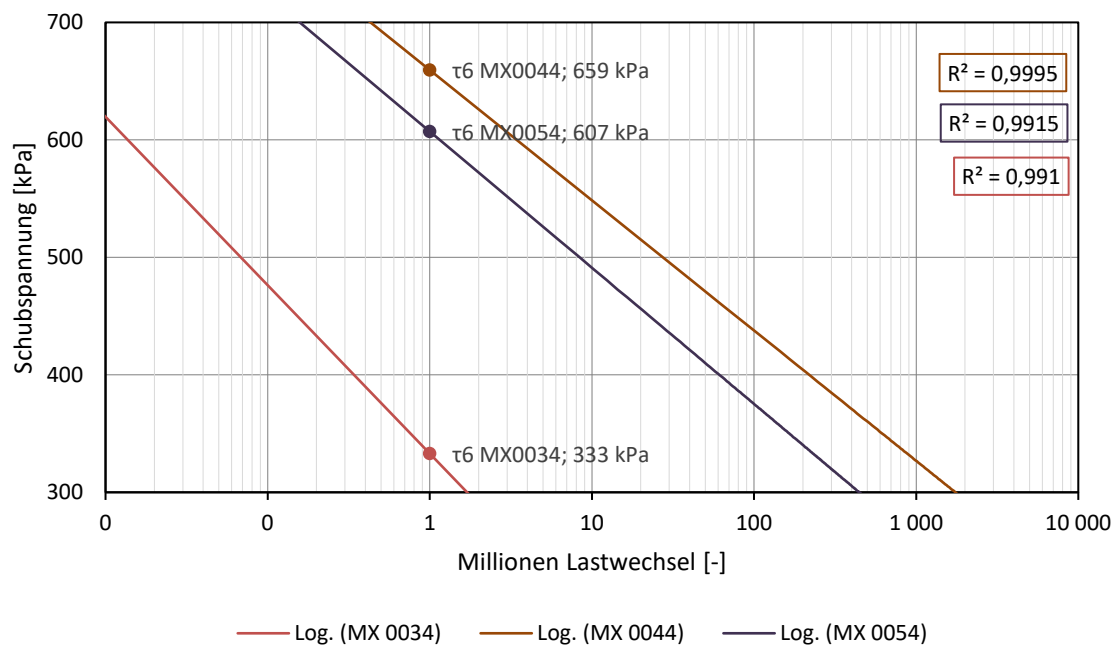


Abb.26 Wöhlerkurven der gealterten Mastixproben mit dem Polymermodifiziertem Bitumen PmB 45/80-65 im Vergleich zur ungealterten Mastixprobe

Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel unterschiedlicher Mastixproben

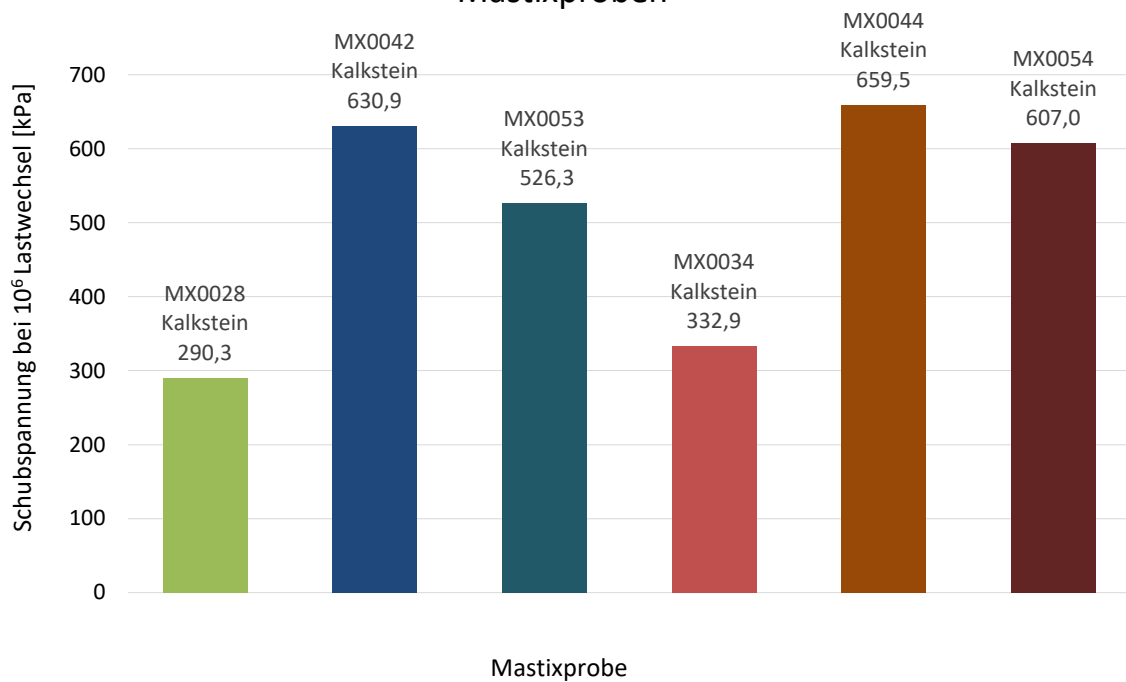


Abb.27 Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel (τ_6) der gealterten Mastixproben

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Einflüsse der Alterung eine negative Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit von Bitumen bzw. Asphalt haben. Den Daten der Ermüdungsprüfung zufolge, erfolgte im gegenständlichen Fall eine Ertüchtigung durch die labortechnische Alterung.

6.4.1 EINFLUSS DER PRÜFTECHNISCHEN PARAMETER

Die spannungsgesteuerte Ermüdungsprüfung (CSS) erfolgt durch Anfahren eines berechneten elektrischen Drehmoments auf Basis der Prüfgeometrie. Aus Formel (9) kann das elektrische Drehmoment für die Prüfgeometrie PP08 ($\varnothing$ ca. 8 mm) und einer Schubspannung von 300 kPa mit ca. 30 Nmm berechnet werden. In 5.1 werden die Auswirkungen der hyperbolischen Probengeometrie beschrieben. Weiters wird erklärt, dass aufgrund der vergleichenden Untersuchung, die Abweichung zur tatsächlichen Schubspannung in der Mitte der Probe keine Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Dies bedingt aber einer konstanten Probengeometrie für alle untersuchten Proben. Das Prüfgerät misst nicht den tatsächlichen Durchmesser des Probekörpers, sondern verwendet den kalibrierten Radius der Prüfgeometrie (PP08). Das bedeutet, sollte sich der Durchmesser der Probengeometrie um 1 mm ändern, fährt das Prüfgerät trotzdem das berechnete Drehmoment von ca. 30 Nmm an. Betrachtet man Formel (9) wird ersichtlich, dass dies eine Verringerung der tatsächlichen Schubspannung um fast 100 kPa zur Folge hat. Auf Basis der ermittelten Wöhlerkurven der ungealterten Mastixproben kann das Auswirkungen von bis zu 7 Millionen Lastwechsel haben.

Nach Durchführung der labortechnischen Alterung konnte bei allen Proben eine Veränderung der Konsistenz und der Farbe beobachtet werden. Die Mastixproben wurden steifer und die Farbe bräunlich. Beim Einbau der flüssigen Mastixprobe in die Silikonform machte sich die Steifigkeit bemerkbar. Die Silikonform wurde, trotz Fixierung mittels Gummiringes, beim Anpressen der Mastixprobe durch die Prüfgeometrie auseinandergedrückt und es entstand eine klaffende Fuge in der Silikonform, die mit zusätzlichem Mastix ausgefüllt wurde, vgl. Abb.28. Um dies weiterhin zu verhindern, wurde bei den gealterten Proben die Silikonform zusätzlich händisch zusammengehalten. Eine Messung der Prüfgeometrie wurde im Zuge der Untersuchungen nicht durchgeführt.

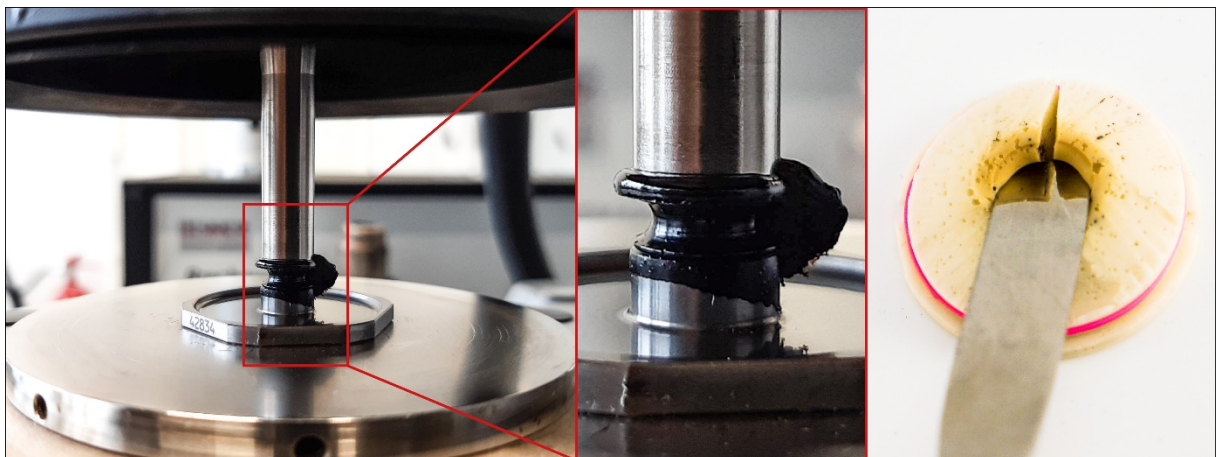


Abb.28 Klaffende Fuge der Silikonform (rechts) und Mastixüberschuss in der Prüfgeometrie

6.4.2 EINFLUSS DES BINDEMITTEL-FÜLLER & FEINANTEIL-VERHÄLTNIS

Durch Erhöhung des Fülleranteils kann die Steifigkeit und Dichte des Asphalts erhöht werden [16]. Die Wiedergewinnung der Probe nach der Laboralterung mit dem RTFOT Verfahren, erfolgt durch Ausleeren der Probe aus dem zylindrischen Glasgefäß. Das Verfahren ist in 2.2.4.3 beschrieben. Da die Öffnung des zylindrischen Glasgefäßes kleiner ist als das Gefäß selber, bleibt ein Bitumenfilm im Gefäß zurück. Bei diesem Vorgang ist es denkbar, dass sich aufgrund des zurückgebliebenen Bitumenfilms das Verhältnis zwischen Bitumen und Füller & Feinanteil ändert. Wenn sich das Verhältnis Bitumen zu Füller & Feinanteil erhöht, erhöht sich auch die Ermüdungsfestigkeit. Bei den anderen Alterungsmethoden ist das ausgeschlossen, weil die Proben in eine Schale gefüllt werden. Nach Ablauf der Alterung können die Schalen vollständig und nahezu rückstandslos entleert werden. Die Alterung mittels RTFOT Verfahren wird für die erste Alterungsstufe vor der Durchführung der PAV oder VAB Alterung herangezogen.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel der gegenständlichen Diplomarbeit war es, zum einen den Einfluss der sieblinienrelevanten Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit von Asphaltmastix zu untersuchen, zum anderen sollte die Auswirkung der Alterung von Asphaltmastix ebenfalls in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht werden. Dafür wurden fünf verschiedene Gesteinssorten für die Füller & Feinanteil Aufbereitung herangezogen. Diese Gesteinssorten wurden in die Kornklassen 0/0,063 mm und 0,063/0,125 mm gesiebt. Mit den zwei verschiedenen Bitumensorten, Straßenbaubitumen 70/100 und PmB 45/80-65, wurden jeweils fünf Mastixproben mit demselben Verhältnis zwischen Bitumen und Füller & Feinanteil hergestellt. Das Verhältnis wurde aus dem ermittelten Asphalt-Referenzmischgut abgeleitet. Für die verschiedenen Füller & Feinanteile wurden extern die Reindichte und die Sieblinie bestimmt. Die Mastixproben mit Kalkstein als Fremdfüller wurden für die Alterung herangezogen. Es wurden jeweils zwei Proben derselben Bitumensorte labortechnisch gealtert. Eine mit dem RTFOT+PAV Verfahren und eine mit dem RTFOT+VBA Verfahren. Die Prüfung der Ermüdungsfestigkeit erfolgte mit dem DSR in Form einer spannungsgesteuerten Ermüdungsprüfung, bei der die Mastixprobe mit einer Belastungsfrequenz von 30 Hz und einer vorgegebenen Schubspannung bis zum Versagen sinusförmig belastet wurde. Nach der ersten Datenanalyse musste festgestellt werden, dass das Problem mit der Druckluftversorgung des Prüfgeräts, erheblichen Einfluss auf die zuvor durchgeführten Versuche hatte. Die bis dahin durchgeführten Langzeitversuche mussten wiederholt werden. Aufgrund der begrenzten Bearbeitungsdauer konnten nicht alle Mastixproben im geplanten Ausmaß untersucht werden.

7.1.1 EINFLUSS DER GESTEINSSORTE

Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wurde die Mineralogie der Gesteinssorten und der pH-Wert nicht untersucht. Die basischen Gesteinssorten wie Basalt und Kalk, die bekanntlich gute Hafteigenschaften gegenüber Bitumen aufweisen, erzielten hohe Ermüdungsfestigkeiten. Der saure Granit, dessen Hafteigenschaften als schlecht eingestuft werden, erreichte die geringste Ermüdungsfestigkeit. Da keine mineralogischen Untersuchungen durchgeführt wurden, konnte beim Porphyr keine Aussage getroffen werden.

7.1.2 EINFLUSS DER SIEBLINIENRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN

Aus den extern ermittelten Sieblinien wurden die Ungleichförmigkeitszahl C_u , die Krümmungszahl C_c , die Korngrößen bei 10, 30 und 60 % Siebdurchgang, sowie die Anteile $<6,3 \mu\text{m}$, $<20 \mu\text{m}$, $<63 \mu\text{m}$, $<125 \mu\text{m}$ ermittelt. Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse wurde versucht, einen mathematischen Zusammenhang dieser Werte mit den Schubspannungen bei 10^6 Lastwechsel zu ermitteln. Dies war jedoch aufgrund der geringen Stichprobenanzahl von vier nicht möglich.

Aus der Anschauung wurde ein Zusammenhang erkennbar. Durch Einstufung der Probe mit dem Granit als Ausreißer, konnte ein Zusammenhang qualitativ beschrieben werden. Bei der Ungleichförmigkeitszahl C_u und den Korngrößen bei 10, 30 und 60 % Siebdurchgang, besteht eine positive Korrelation. Mit der Abnahme der Sieblinienkennwerte nimmt auch die Schubspannung ab. Bei den anderen Werten, die Massenanteile $<6,3 \mu\text{m}$, $<20 \mu\text{m}$ und $<63 \mu\text{m}$ ist es umgekehrt. Bei der Reindichte, der Krümmungszahl C_c und dem Massenanteil $<125 \mu\text{m}$ ist kein Zusammenhang mit der Ermüdungsfestigkeit erkennbar.

7.1.3 EINFLUSS DER PRÜFTECHNISCHEN PARAMETER

Die gealterten Mastixproben wurden mit der dazugehörigen ungealterten Probe verglichen. Trotz der bekannten negativen Auswirkungen der Alterung, wurden die Mastixproben gemäß den Ergebnissen der Ermüdungsprüfung positiv beeinflusst. Die Ergebnisse geben Grund zum Anlass, die prüftechnischen Parameter zu Untersuchung. Die geringste Änderung des Querschnitts der Probekörper hat einen erheblichen Einfluss auf sie tatsächlich aufgebrachte Schubspannung und somit auf die Ermüdungsfestigkeit.

7.1.4 EINFLUSS DES BINDEMittel-FÜLLER & FEINANTEIL-VERHÄLTNIS

Der scheinbaren positiven Veränderung der gealterten Mastixproben könnte eine Veränderung des Bitumen-Füller & Feinanteil-Verhältnisses zu Grunde liegen. Bei der Rückgewinnung der Mastixprobe nach dem RTFOT-Verfahren bleibt immer ein Bitumenfilm im Glasgefäß zurück. Das könnte eine Veränderung des Verhältnisses von Bitumen zu Füller & Feinanteil zufolge haben. Eine Verringerung des Bitumen-Füller & Feinanteil-Verhältnisses führt zu einer Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit.

7.2 AUSBLICK

Aus der Anschauung lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Parametern der Sieblinie und der Ermüdungsfestigkeit erkennen. Um eine wissenschaftlich fundierte, quantitative Aussage treffen zu können empfiehlt es sich, eine Korrelationsanalyse mit Ermittlung der Signifikanz durchzuführen. Dafür ist eine ausreichende Anzahl an Stichproben erforderlich. Das ursprünglich geplante Prüfprogramm stellt eine ausreichende Anzahl dar, um eine statistische Aussage treffen zu können. Weiters wird eine Messung des pH-Wertes empfohlen, um die Hafteigenschaften der Füller & Feinanteile mit dem Bitumen in Zusammenhang zur Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen.

Um die Einflüsse der Probekörpergeometrie auf die tatsächliche Schubspannung ausschließen zu können, wäre es denkbar, eine messtechnische Erfassung des Probekörpers durchzuführen. Im Sinne einer Kalibrierung vor jeder Messung, kann durch Anpassung der Berechnungsparameter des Prüfgerätes die Schubspannung angeglichen werden. Es wäre auch denkbar, die Silikonform durch eine zweiteilige massive Form zu ersetzen, die ein auseinanderdrücken durch die steifer gewordene, gealterte Mastixprobe verhindert.

Weiters empfiehlt es sich, die Alterung des Bitumens mittels RTFOT getrennt vorzunehmen und anschließend die Herstellung der Mastixprobe durchzuführen. Damit kann ausgeschlossen werden, dass es aufgrund der verfahrensbedingten Rückgewinnung der Probe zu keiner Änderung des Bindemittel-Füller & Feinanteil- Verhältnisses kommt.

Literaturverzeichnis

- [1] HOSPODKA M., HOFKO B., BLAB R.; *Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix - Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriteriums*; Wien, IVWS; 2017
- [2] BLAB R., HOFKO B.; Anti-Aging Anforderungen an Asphalt; *Gestrata Journal*; Wien, GESTRATA; Juli 2012; Folge 135; S.26-29
- [3] ÖNORM EN 933-10; Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen- Korngrößenverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung); Wien, Austrian Standards Institute; 2009-08-15
- [4] STEINER D., HOFKO B., BLAB R.; *Viennese Aging Procedure (VAPro) - Effiziente und realitätsnahe Laboralterung von Asphaltprobekörpern zur Simulation der Langzeitalterung*; *Straße und Autobahn*, 68 (2017), 1; S. 26 - 32.
- [5] ÖNORM EN 12607-1; *Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft, Teil 1: RTFOT-verfahren*; Wien, Austrian Standards Institute; 2014-12-15
- [6] ÖNORM EN 14769; *Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel I- Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV)*; Wien, Austrian Standards Institute; 2012-07-15
- [7] MIRWALD, J., MASCHAUER, D., HOFKO, B., GROTHE, H.; *Impact of Reactive Oxygen Species on Asphalt Binder Aging*; TRB Annual Meeting 2020, 13 – 16 Jan. 2020, Washington (Poster)
- [8] EICHER J.; *Beurteilung der Gebrauchseigenschaften von Asphaltmörtel mit dem Dynamischen Scherrheometer*; Dissertation; München, Technische Universität München; 2018
- [9] GESTRATA (Bearb.: HINTERSTEINER E.); *Asphalt-Handbuch; 2.Auflage*; Wien, GESTRATA, 1996
- [10] PARTL M.; *Vorlesung Werkstoffe 1, ETHZ, Frühling 2011*; Skriptum; Zürich, Frühling 2011
- [11] ÖNORM EN 12597; *Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie*; Wien, Austrian Standards Institute; 2014-09-15
- [12] ÖNORM EN 1426; *Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration*; Wien, Austrian Standards Institute; 2015-09-15
- [13] ÖNORM EN 1427; *Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren*; Wien, Austrian Standards Institute; 2015-09-15

- [14] ÖNORM EN 12593; *Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß*; Wien, Austrian Standards Institute; 2015-10-01
- [15] HOFKO B. et al.; *Alles altert – Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt*; Vortrag: Gestrata – Herbstveranstaltung; Wien (eingeladen); 12.11.2013
- [16] NEROTH G., VOLLENSCHAAR D.; *Wendehorst Baustoffkunde, Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz*; Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; 2011; Auflage 27
- [17] ÖNORM EN 13398; *Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifizierten Bitumen*; Wien, Austrian Standards Institute; 2018-01-15
- [18] ÖNORM EN 13043; *Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlung für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen*; Wien, Austrian Standards Institute; 2015-07-15
- [19] JÄGER A.; *Characterization of Viscoelastic Properties of Bitumen by Means of Nanoindentation as Basis for Multiscale Modeling of Asphalt*; Dissertation; Wien, Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen; 2008
- [20] ÖNORM EN 12697-24; *Asphalt – Prüfverfahren, Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung*; Wien, Austrian Standards Institute; 2019-04-01
- [21] MICROMERITICS GmbH, *AccuPyc II 1340*, Zugriff am 19.01.2020, 22:16, Verfügbar unter: <http://micromeritics.de/accupyc-ii-1340/>
- [22] ÖNORM B 3580-1; *Asphaltemischgut – Mischgutanforderungen - Asphaltbeton, Teil 1: Empirische Anforderungen – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1*; Wien, Austrian Standards Institute; 2018-02-01
- [23] KUNESCH C., NEUMANN S.; *Kalkhydrat im Asphalt – Stand der Technik*; Gestrata Journal; Wien, GESTRATA; Mai 2011; Folge 132; S.25-30
- [24] HOSPODKA M., HOFKO B., BLAB R.; *Entwicklung einer Prüfmethode zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix*; Vortrag: Dresdner Asphalttage; Dresden; in: 4. Dresdner Asphalttage, 2015; S.125-130

Abbildungsverzeichnis

Abb.1	Auszug der Einteilung bitumenhaltiger Bindemittel gem. ÖNORM EN 12597 [11]	5
Abb.2	Strukturmodell von Bitumen als kolloidales System	6
Abb.3	RTFOT-Verfahren für Kurzzeitalterung	10
Abb.4	PAV-Verfahren für Langzeitalterung	11
Abb.5	VBA-Verfahren für Langzeitalterung gemäß [7]	12
Abb.6	Unterschied zwischen Kornklasse und Korngruppe	14
Abb.7	Sieblinie eines Korngemisches mit 16 mm Größtkorn	15
Abb.8	Mehrskalenmodell zur Beschreibung des Asphalts gem. [19]	16
Abb.9	Die Messgeometrie eines Dynamischen Scherrheometers gem. [8]	18
Abb.10	Grafische Ermittlung des Phasenverschiebungswinkels δ gem. [8]	19
Abb.11	Diagramm von zwei unterschiedlichen Materialien mit demselben komplexen Schubmodul, aber unterschiedlichem Gebrauchsverhalten gem. [8]	20
Abb.12	Lichtbilder der verwendeten Füller & Feinanteile	22
Abb.13	Soll-Sieblinie des Referenzmischguts AC deck 11 A1 und die dazugehörigen Grenzsieblinien gemäß ÖNORM B3580-1 [22]	27
Abb.14	Dynamisches Scherrheometer MCR 302 von Anton Paar	31
Abb.15	Prüfgeometrie gemäß Hospodka [1]	33
Abb.16	Vergleich der DSR Prüfung mit und ohne Druckschwankung anhand der Mastixprobe MX 0025	37
Abb.17	Beispielhafte Ermüdungskurve als Ergebnis einer DSR Prüfung	39
Abb.18	Wöhlerkurven der Probe MX0026 dargestellt auf einer linearen Achse (links) und auf einer logarithmischen Achse (rechts)	40
Abb.19	Wöhlerkurven der ungealterten Mastixproben mit dem Straßenbaubitumen 70/100 ..	41
Abb.20	Wöhlerkurven der ungealterten Mastixproben mit dem Polymermodifiziertem Bitumen PmB 45/80-65	42
Abb.21	Lastwechsel der ungealterten Mastixproben bei 400 kPa Schubspannung	43
Abb.22	Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel (τ_6) der ungealterten Mastixproben	43
Abb.23	Sieblinien der Füller & Feinanteil Gemische der Mastixproben	44
Abb.24	Vergleich der sieblinienrelevanten Eigenschaften mit der Schubspannung bei 10^6 Lastwechseln (τ_6)	48
Abb.25	Wöhlerkurven der gealterten Mastixproben mit dem Straßenbaubitumen 70/100 im Vergleich zur ungealterten Mastixprobe	49
Abb.26	Wöhlerkurven der gealterten Mastixproben mit dem Polymermodifiziertem Bitumen PmB 45/80-65 im Vergleich zur ungealterten Mastixprobe	50
Abb.27	Schubspannung bei 10^6 Lastwechsel (τ_6) der gealterten Mastixproben	50
Abb.28	Klaffende Fuge der Silikonform (rechts) und Mastixüberschuss in der Prüfgeometrie	51

Tabellenverzeichnis

Tab.1	Verwendete Füller & Feinanteile	21
Tab.2	Reindichte der verwendeten Füller- & Feinanteilgemische	23
Tab.3	Verwendete Gesteinskörnung zur Herstellung des Referenzmischguts	24
Tab.4	Gegenüberstellung der Mittelwerte der Korngrößenverteilung verschiedener Wascharten und Amplitudeneinstellung mit der Probe G921 Porphyr/Kersantit 4/8 ..	25
Tab.5	Siebliniengrenzwert für das Asphaltmischgut AC deck 11 A1 gem. ÖNORM B 3580-1 [22]	26
Tab.6	Zusammensetzung der Soll- Sieblinie des Referenzmischguts	26
Tab.7	Asphaltzusammensetzung des Referenzmischguts.....	28
Tab.8	: Erstellte Mastixproben mit den entsprechenden Komponentenanteilen	30
Tab.9	Versuchsrandbedingungen.....	35
Tab.10	Geplantes Prüfprogramm der Mastix-Ermüdungsprüfungen.....	36
Tab.11	Ausgeführtes Prüfprogramm der Mastix-Ermüdungsprüfungen.....	38
Tab.12	Reindichten der Füller & Feinanteile der ungealterten Mastixproben	44
Tab.13	Sieblinienrelevante Eigenschaften der Füller- & Feinanteilgemische der Mastixproben	45
Tab.14	Ergebnisse der Korrelationsanalyse	46