

# Beurteilung der Asphaltmastixqualität in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltdecken **BEDA**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2019  
**(VIF 2019)**

März 2021



## Impressum:

**Herausgeber und Programmverantwortung:**  
Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 **Bundesministerium**  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

**ÖBB-Infrastruktur AG**  
Praterstern 3  
1020 Wien

 **ÖBB**  
INFRA

**Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft**  
Rotenturmstraße 5-9  
1010 Wien

 **ASFiNAG**

**Für den Inhalt verantwortlich:**  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13  
1040 Wien

 **TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**

**Programmmanagement:**  
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien

 **FFG**  
Forschung wirkt.

# Beurteilung der Asphaltmastixqualität in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltdecken BEDA

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2019)

**AutorInnen:**

**Dipl. Ing. Michael STEINER**

**Dipl. Ing. Dr. Lukas EBERHARTSTEINER**

**Dipl. Ing. Dr. Bernhard HOFKO**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Technische Universität Wien

Institut für Verkehrswissenschaften

Gußhausstraße 28/E230-3

1040 Wien

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Hintergrund und Ziel des Forschungsprojekts BEDA .....	6
2	Stand der Technik bzw. Stand des Wissens .....	7
3	Vorgehensweise .....	10
4	Verwendete Materialien .....	12
4.1	Gesteinskörnungen.....	12
4.2	Bitumen .....	13
4.3	Asphaltmischgutkonzeption .....	14
4.4	Füllermischung .....	15
4.5	Asphaltmastixmischung .....	16
5	Untersuchungsmethodik und Prüfergebnisse der Ausgangsmaterialien.....	16
5.1	Prüfungen an Bitumen .....	16
5.1.1	Nadelpenetration .....	16
5.1.2	Ring und Kugel.....	17
5.2	Prüfungen an Füller .....	18
5.2.1	Reindichte .....	18
5.2.2	Siebanalyse bis 0,002mm.....	19
5.2.3	BET-Oberfläche des Füllers.....	22
5.2.4	Dynamische Bilduntersuchungen des Füllers .....	23
5.2.5	Bestimmung des Hohlraumgehalts an trocken verdichtetem Füller (Hohlraumgehalt nach Rigden, RV) .....	28
6	GVO Prüfungen am Mischgut .....	29
6.1	Ermüdungsprüfungen an Asphaltmastix .....	29
6.1.1	Prüfergebnisse zu den Ermüdungsprüfungen an Asphaltmastix .....	32
6.2	Steifigkeitsprüfungen an Asphalt.....	36
6.2.1	Prüfergebnisse zu den Steifigkeitsprüfungen an Asphalt .....	39
6.3	Ermüdungsprüfungen an Asphalt.....	41
6.3.1	Prüfergebnisse zu den Ermüdungsprüfungen an Asphalt .....	43
7	Analyse der Prüfergebnisse .....	45
7.1	Auswirkung der Füllermorphologie auf die Asphaltmastix .....	45
7.1.1	Auswirkung der Reindichte .....	45
7.1.2	Auswirkung der sieblinienverwandten Kennwerte .....	46
7.1.3	Auswirkung der BET-Oberfläche.....	47
7.1.4	Auswirkung der Kornform .....	48
7.1.5	Auswirkung des Hohlraumgehalts des trocken verdichteten Füllers.....	49
7.1.6	Multiple Regressionsanalyse zur Abschätzung der Ermüdungsbeständigkeit der Asphaltmastix .....	50

7.2	Auswirkung von Feuchtigkeit auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmastix	
	53	
7.2.1	Mastix mit feuchtem Füller .....	53
7.2.2	Mastix in Wasser gelagert.....	55
7.2.3	Ergebnis .....	55
7.3	Auswirkung von Alterung auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmastix ..	57
7.3.1	RTFOT-Verfahren.....	57
7.3.2	PAV- Verfahren .....	58
7.3.3	Viennese Binder Aging (VBA).....	59
7.3.4	Ergebnisse der Alterungsverfahren.....	60
7.4	Korrelationsanalysen zur Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit auf Asphaltebene zufolge Prüfungen auf Mastix- und Füllerebene .....	62
7.5	Einfluss eines feuchten Füllers auf die Ermüdungsfestigkeit auf Asphaltebene ..	67
7.6	Anwendung des Prognoseverfahren auf Prüfergebnisse aus vorangegangenen Projekten.....	68
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	72
8.1	Füllereigenschaften und Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix .....	73
8.2	Zusammenhang Ermüdung auf Mastix- und Asphaltebene.....	74

## 1 HINTERGRUND UND ZIEL DES FORSCHUNGSPROJEKTS BEDA

Auf Asphaltstraßen sind Spurrinnen, thermische Rissbildung und ermüdungsbedingte Netzrisse, die Hauptursachen für Schäden an Deckschichten, wobei Rissbildung durch die Asphaltalterung begünstigt wird [1]. Jedoch treten auf österreichischen Straßen in den vergangenen Jahren vermehrt vorzeitig Schäden wie Korn- und Schollenausbrüche bei bituminösen Deckschichten auf, welche systematisch weder einer klimatischen noch einer verkehrstechnischen Belastung zugeordnet werden können. Aktuell ist davon auszugehen, dass mangelnde Dauerhaftigkeit der Asphaltmastix (Bitumen + Feinanteile) beziehungsweise Haftung am Gestein Auslöser für diese Schäden sind. Da jedoch weder in Normen noch in Regelwerken Grenz- oder Anforderungswerte für den Nachweis der Dauerhaftigkeit beziehungsweise Ermüdungsbeständigkeit der Asphaltmastix vorhanden sind, ist es von besonderem Interesse, diese zu erforschen und in existierende Asphaltregelwerke zu implementieren, um die Lebensdauer von Straßeninfrastruktur sicherzustellen und damit zur Ressourcenschonung, sowie zum effizienten Einsatz von öffentlichen Geldern beizutragen.

Asphaltmastix setzt sich aus Bitumen und Feinanteilen zusammen. Bei den Feinanteilen handelt es sich um mineralische Gesteine mit einem Größtkorn kleiner als 125µm. In den aktuellen Regelwerken gibt es zwar grundlegende Anforderungen an Bitumen und Feinanteile, jedoch keine Prüfkriterien, mit denen eine gebrauchsvhaltensorientierte (GVO) Ansprache der Asphaltmastix oder Feinanteile möglich ist. [2]

Derzeit können gemäß der Normenserie EN 13108-xx die GVO Prüfmethode für Asphalt angewendet werden. Mit diesen Prüfungen kann man die wesentlichen Gebrauchseigenschaften wie das Kälteverhalten, die Steifigkeit, den Widerstand gegen bleibende Verformung sowie den Widerstand gegen Ermüdung beschreiben. Diese Prüfungen erfordern jedoch einen hohen Prüfaufwand und im Falle der Ermüdungsversuche am Vier-Punkt-Biegebalken (4PB) auch sehr viel Material im Gegensatz zu den konventionellen Prüfmethode. [3]

Aus diesen Gründen ist ein wesentliches Ziel, in Zukunft die Ermüdung auf Mastixebene mittels Dynamischem Scher-Rheometer (DSR) zu beurteilen, da dies als Bindemittelkomponente die relevante Komponente im Asphalt ist. Zu diesem Thema existieren mehrere internationale Studien, diese behandeln meist jedoch nur das Thema der Korrelation der Prüfergebnisse zwischen 4PB und DSR. Im Zuge dieses Projektes wird ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen jedoch auch der Ursprung der

unterschiedlichen Ermüdungsverhalten eruiert. Vor allem in Hinblick auf die Kornform und kornformverwandte Faktoren, aber auch auf Feucht-/Wasserbeständigkeit und Alterungsverhalten werden hierfür nähere Untersuchungen durchgeführt.

## 2 STAND DER TECHNIK BZW. STAND DES WISSENS

Asphaltmastix setzt sich aus Bitumen und Feinanteilen zusammen. Bei den Feinanteilen handelt es sich um mineralische Gesteine mit einem Größtkorn kleiner als 125µm. Die Prüfkriterien an dieser Komponente für Asphaltmischgut sind in der RVS 08.97.05 zusammengefasst (siehe Tabelle 1). Demnach sind etliche Prüfmethode in den Normen verankert, jedoch ist anhand dieser Methoden kaum eine gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) Ansprache der Feinanteile möglich. [2]

**Tabelle 1: RVS 08.97.05 - Anforderungen an Asphaltmischgut [4]**

<b>Anforderungen an Lieferkörnung D &lt; 0,125mm (Füller)</b>	
<b>Merkmal</b>	<b>Norm</b>
Korngrößenverteilung	ÖNORM EN 933-10
Schädliche Feinanteile	ÖNORM EN 933-9
Rohdichte	ÖNORM EN 1097-7
Trockenhohlraum-Gehalt	ÖNORM EN 1097-4
Delta Ring und Kugel	ÖNORM EN 13179-1
Wasserlöslichkeit	ÖNORM EN 1744-4
Wasserempfindlichkeit	ÖNORM EN 1744-1
Carbonatgehalt von Carbonatfüllern	ÖNORM EN 196-2
Calciumhydroxidgehalt von Mischfüllern	ÖNORM EN 459-2
Bitumenzahl	ÖNORM EN 13179-2

Seit der Einführung der Normenserie EN 13108-xx im Jahr 2008 ist es jedoch möglich für die Konformitätsbewertung im Rahmen der Typprüfung die GVO Prüfmethode für Asphalt anzuwenden. Mit diesen Prüfungen können die wesentlichen Gebrauchseigenschaften wie das Kälteverhalten, die Steifigkeit, der Widerstand gegen bleibende Verformung sowie der Widerstand gegen Ermüdung untersucht werden. Mit ihrer Hilfe wird das erwartete Gebrauchsverhalten des Asphaltes im Feld abgeschätzt. Für die Prüfung der jeweiligen Gebrauchseigenschaft existieren mehrere Prüfverfahren, die in der Normenserie 12697-xx festgehalten sind. Diese erfordern jedoch einen hohen Prüfaufwand und im Falle der Ermüdungsversuche am 4PB auch sehr viel Material im Gegensatz zu den konventionellen Prüfmethode und sind deshalb in Form von Routineprüfungen schwer umzusetzen [5].

Auch in der RVS 08.97.06 [6], wo der GVO Ansatz für die Anforderungen an Asphaltmischgut definiert ist, sind keine expliziten Anforderungen bezogen auf die Gebrauchstauglichkeit an den Füller gestellt. Um dieser Problematik Abhilfe zu schaffen, ist es ein erklärtes Ziel in Zukunft die Ermüdung vermehrt auf Mastixebene zu betrachten, da dies als Bindemittelkomponente die relevante Komponente im Asphalt ist. Werden signifikante Korrelationen zwischen Asphalt- (4PB) und Mastixebene (DSR) gefunden, können zeit- und materialaufwändige Asphaltprüfungen teilweise durch Prüfungen auf der Mastixebene ersetzt werden. So können Zeit und Kosten in der Typ-- und Abnahmeprüfung gespart werden. Deshalb wurde in den letzten Jahren vermehrt daran geforscht, wie sich die Feinanteile auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix auswirken, beziehungsweise wie man das Ermüdungsverhalten von Bitumen mit Feinanteilen mit hoher Zuverlässigkeit prüfen kann. Dem zugrundeliegend ist an der Technischen Universität Wien eine Prüfmethode am DSR entwickelt worden, mit dessen Hilfe Asphaltmastix auf Ermüdung mit geringen Materialbedarf schnell und einfach auf den meisten DSR-Geräten geprüft werden kann. Im Zuge der Entwicklung wurde auch eine optimale Prüfgeometrie gefunden (siehe Abbildung 1), um ein Ermüdungsversagen bei Vollquerschnitt an der Verbundstelle zwischen Gerät und Asphaltmastix auszuschließen. [2]



**Abbildung 1: Prüfgeometrie [7]**

Somit ist eine neue Beurteilungsebene für die Asphaltmastixqualität entstanden. Im Zuge dieser Arbeiten wurde vor allem die mineralogische Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix untersucht. Zur Schaffung eines Bewertungshintergrundes sind insgesamt 14 verschiedene Füller und Feinanteile unterschiedlicher Herkunft und Mineralogie untersucht worden. Zur Herstellung der Mastix ist jeweils dasselbe Bitumen der Sorte 70/100 (PG 64-22) zur Anwendung gekommen, um einen Einfluss des Bindemittels zu vermeiden. Die bisher gebräuchliche Annahme, die einen direkten Einfluss der Mineralogie auf die Dauerhaftigkeit der Mastix vermutet,



scheinen durch die umfangreichen Untersuchungen bisher nicht bestätigt. Vielmehr haben sieblienverwandte Faktoren einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Mastix. Wahrscheinlich ist, dass auch kornformverwandte Faktoren einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Mastix ausüben. Diese These konnte im Rahmen der bisherigen Forschungsprojekte jedoch noch nicht weiter untersucht werden. [2]

Die Anfälligkeit für Rissbildung an Asphaltdeckschichten liegt der fortschreitenden Alterung des Bitumens als Bindemittelkomponente durch klimatische Bedingungen zugrunde. Bitumen setzt sich aus komplexen organischen Verbindungen zusammen, die während des Mischens, des Einbaus und während der Liegedauer unter Einfluss von Temperatur und UV-Strahlung oxidieren. Dadurch kommt es zu einer Veränderung der chemischen Struktur des Bindemittels, und damit einhergehend auch zu einer Veränderung seiner Eigenschaften [1]. Bisher wurden jedoch nur Ermüdungsprüfungen am DSR an ungealterter Mastix sowie ohne Vorhandensein von Wasser untersucht.

Es ist unumstritten, dass das Bitumen bzw. die Mastix (Bitumen-Füller-Gemisch) eine entscheidende Rolle im Gebrauchsverhalten von Asphalt spielt. Diverse Autoren konnten in ihren Untersuchungen bereits physikalische Zusammenhänge feststellen. So existieren insbesondere für das Ermüdungsverhalten diverse internationale Studien, die die Bitumen- und Asphaltperformance in Korrelation setzen ([8]; [9]; [10]; [11]; [12]). Auch im deutschsprachigen Raum erfolgten bereits einige Publikationen zu diesem Thema ([13]; [14]; [15]; [16]). Um eine Korrelation zwischen der Ermüdung auf Mastixebene und Asphaltenebene herstellen zu können, wurde im Rahmen des D-A-CH Forschungsprojekts VEGAS (FFG-Projekt Nummer 863063) die GVO Prüfsystematik (Normenserie EN 13108-xx) von Asphalt vereinfacht. Dafür ist die Prüfsystematik auf die Bestimmung von volumetrischen Eigenschaften der Asphaltstruktur und auf Prüfungen am Bindemittel und an der Mastix (Bitumen-Füller-Gemisch) bzw. am Mörtel (Mastix-Sand-Gemisch) reduziert worden. Für die Bestimmung der Bindemittelleigenschaften war die Verwendung eines DSR als einziges Prüfgerät angestrebt. Die jeweiligen Gebrauchseigenschaften (Kälteverhalten, Steifigkeit, Widerstand gegen Ermüdung und Widerstand gegen bleibende Verformung) von Bitumen und Bitumenmastix wurden durch verschiedene teilweise neu zu entwickelnden Prüfungen gezielt angesprochen. Anhand der durchgeführten Prüfungen konnten eindeutige Zusammenhänge zwischen dem Materialverhalten von Bitumen, Mastix und Asphaltmischgut beobachtet werden, welche mathematisch beschreibbar sind. Die Modellierung der Ergebnisse und die durchgeführten Reihenuntersuchungen bestätigten

die Erkenntnisse. Somit ist es möglich, das Gebrauchsverhalten der getesteten Asphalte mittels der durchgeführten Prüfungen abzuschätzen.

### **3 VORGEHENSWEISE**

Hauptfokus dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Prüfkonzeptes der Asphaltmastixqualität um eine Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphaltdecken zu ermöglichen. Aufbauend auf der bisher entwickelten Prüfmethode zur Ermüdung von Asphaltmastix gemäß Hospodka et. al [2] und dem aktuellen Forschungsstand, wird eine vertiefende Untersuchung der Asphaltmastix vorgenommen.

Die von Hospodka et. al [2] durchgeführten Korrelationsanalyse haben gezeigt, dass die Sieblinie einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsprüfungen haben könnte. Da es sich bei „Füller“ jedoch um eine Korngruppe mit erlaubtem Überkorn handelt („Der Füller ist jener Teil der Gesteinskörnung, dessen überwiegender Teil durch ein 0,063 mm Sieb hindurchgeht.“ [17]), werden bei zukünftigen Versuchen die für die Prüfung geometrisch ungünstigen Bestandteile größer 125 µm entfernt. Bei den durchgeführten Analysen wurde der direkte Einfluss der Mineralogie auf die Dauerhaftigkeit der Mastix durch umfangreiche Untersuchungen nicht bestätigt.

Deshalb werden im gegenständlichen Forschungsprojekt die Kornform, sowie kornformverwandte Faktoren der Feinanteile systematisch untersucht und in weiterer Folge anhand der bisherigen Ergebnisse ausgewertet und analysiert. Dadurch sollen die wesentlichen Füllerparameter mit einem signifikanten Einfluss auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltmastix identifiziert werden. Die Ergebnisse dienen auch dazu, ein vollständiges Erklärungsmodell aufzustellen, um signifikante Parameter von Füller mit der Dauerhaftigkeit von Mastix zu verknüpfen.

Um auch Umwelteinflüsse wie Wasser und Alterung zu berücksichtigen, werden ausgewählte Feinanteile in Wasser gelagert, um im Anschluss an daraus hergestellten Mastixproben eine DSR-Ermüdungsprüfung durchführen zu können, da die Feinanteile unterschiedliche Wasserempfindlichkeiten aufweisen können und diese eine Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit haben könnten.

Da jedoch neben der Feuchtigkeit auch die Alterung eine wesentliche Rolle für die Dauerhaftigkeit einer Asphaltdeckschicht spielt, werden wie auch bei der Wasserlagerung mit ausgewählten Feinanteilen und gealtertem Bitumen Mastixproben hergestellt und einer

DSR-Ermüdungsprüfung unterzogen. Daraus sollen sich auch zeitliche Entwicklungen der Mastixqualität ableiten lassen.

Für die Herstellung der Mastix wurde Straßenbaubitumen und polymermodifiziertes Bitumen verwendet, da Beide ein unterschiedliches Gebrauchsverhalten aufweisen, und die Alterung nicht gleich abläuft. Neben den in Österreich häufig verwendetem Straßenbaubitumen 70/100 wurde deshalb auch das in Österreich häufig im Straßenbau vertretene polymermodifizierte Bitumen PmB 45/80-65 für die kommenden Mastixermüdungsversuche verwendet. Zusätzlich ist für ausgewählte Füller auch das neu am Markt verfügbare Bitumen PmB 45/80-75 verwendet worden. Neben den Eigenfüller, der Herstellungsbedingt jedem Bruchkorn beiwohnt, werden auch Fremdfüller in diesem Forschungsprojekt verwendet. Neben dem klassischen Kalksteinmehl als Fremdfüller wird im Zuge von Mischfüller Kalkhydrat hinzudosiert. Kalkhydrat wird als aktiver Füller [18] bezeichnet und zeigt ein anderes Verhalten als Kalksteinmehl [19]. Die Effekte von Kalkhydrat auf die Eigenschaften von Asphaltmischgut ist bereits Teil von unterschiedlichen Untersuchungen [20-22] und wird ebenso im Zuge des entwickelten Prüfprogrammes in diesem Projekt betrachtet. Somit lässt sich ein breites Spektrum von verwendeten Materialien und Kombinationen abdecken und die wesentlichen Füllerparameter, welche einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Mastix haben, identifizieren lassen.

Um eine Korrelation zwischen Mastixebene und Asphaltebene herstellen zu können, werden auch Ermüdungsprüfungen gemäß EN 12697-24 [23] an Asphaltprobekörpern durchgeführt. Steifigkeitsprüfungen werden im Rahmen der Ermüdungsprüfungen am 4PB gemäß EN 12697-26 [24] ebenfalls routinemäßig durchgeführt. Das ist die Grundlage für einen zukünftigen teilweisen Ersatz von 4PB-Prüfungen am Asphalt durch DSR-Ermüdungsprüfungen an der Mastix.

Im Zuge der Ermüdungsversuche an der Mastix wird eine detaillierte Arbeitsanweisung für die Durchführung der Prüfungen erstellt, welche als Vorbereitung für zukünftige Ringversuche dient. Ringversuche sind notwendig, um die statistische Wiederhol- und Vergleichbarkeit bestimmen zu können. Diese Parameter sind wiederum Grundlage für den Eingang einer Prüfmethode in die Europäische Prüfnormen. Die so gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Durchführung von Ermüdungsversuchen an Mastix können als Basis für die Entwicklung einer Richtlinie (RVS) zur Beurteilung der Asphaltmastixqualität in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltdecken herangezogen werden. Des Weiteren können neue Qualitätskriterien für den Füller definiert werden, welche folglich in der Baupraxis zur Umsetzung kommen.

## 4 VERWENDETE MATERIALIEN

Im Rahmen des Forschungsprojekts BEDA wurden Materialien verwendet, die häufig im österreichischen Straßenbau zur Anwendung kommen. Neben den üblichen Bitumensorten der OMV wurden Gesteine beziehungsweise Füller aus österreichischen Steinbrüchen verwendet. In den folgenden Kapiteln werden die verwendeten Materialien näher erläutert.

### 4.1 Gesteinskörnungen

Für die Versuchsanordnung wurde die Gesteinskörnung entsprechend aufbereitet. Um die notwendige Kornklasse für das Mischen der Mastix zu erhalten, wurden Sande aus unterschiedlichen Steinbrüchen auf einem 125µm- beziehungsweise 63µm-Sieb in die Kornklassen 0/0,063mm und 0,063/0,125mm getrennt. Diese Feianteile wurden in weiterer Folge für die Herstellung der Mastixproben als auch für die Asphaltmischung verwendet. In Tabelle 2 sind die verwendeten Füller und die entsprechenden Laborbezeichnungen zusammengefasst. Da Kalkhydrat nicht alleine als Fremdfüller verwendet wird, kommt in dieser Studie ein Mischfüller aus Kalk und Kalkhydrat zum Einsatz. Dafür wurden die Füller wie oben beschrieben ausgesiebt und für die weiteren Labormischungen im Verhältnis 30:70 in den entsprechenden Schritten gemischt. 30% Kalkhydrat entspricht dabei dem üblichen Gebrauch im Straßenbau. In den folgenden Abschnitten wird der Mischfüller als Kalkhydrat bezeichnet.

**Tabelle 2: Als zugesetzter Füller verwendete Materialien**

Material	Herkunft	Laborcode
Granitporphyr	Aus 0/2mm ausgesiebt	F115
Granit	Aus 0/2mm ausgesiebt	F118
Basalt	Aus 0/2mm ausgesiebt	F121
Kalk	Als Füller erhalten	F128
Kalkhydrat	Als Füller erhalten	F153
Quarz	Als Füller erhalten	F041

Um die Einflüsse der unterschiedlichen Füller auch im Asphaltbeton überprüfen zu können, ist es notwendig ein Referenzmaterial zu verwenden, bei dem nur die Anteile kleiner 125µm variieren. Da für dieses Projekt große Mengen an Gesteinskörnungen nötig waren, wurde dieses von einem regionalen Steinbruch bezogen. Es handelt sich hierbei um einen Granitporphyr mit den Laborbezeichnungen G01 bis G04 (0/2; 2/4; 4/8; 8/11). Um den Eigenfüller der einzelnen Korngruppen zu reduzieren, wurden zwei unterschiedliche Methoden angewandt. Die Korngruppen 2/4; 4/8 und 8/11 wurden auf einem 1mm Sieb

solange gewaschen, bis das abgeflossene Wasser klar und ohne Rückstände war. Bei der Korngruppe 0/2 war dieses Verfahren nicht möglich. Hier wurde der Sand auf einem 125µm-Sieb ausgewaschen bis das Wasser klar und ohne Rückstände war. Da jedoch festgestellt wurde, dass dadurch nicht ausreichend Feinanteile ausgewaschen werden können, wurde das ausgewaschene Material auf Massekonstanz getrocknet und anschließend nochmals trocken auf dem 125µm-Sieb gesiebt. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Siebanalysen nach dem Waschen beziehungsweise Sieben zusammengefasst.

**Tabelle 3: Siebanalysen der aufbereiteten Gesteinskörnungen für die Asphaltmischung**

Korngrößen [mm]	Lieferkörnung			
	G01 0/2 [M%]	G02 2/4 [M%]	G03 4/8 [M%]	G04 8/11 [M%]
<b>22,4 -31,5</b>				
<b>16,0-22,4</b>				
<b>11,2 -16,0</b>				16,28
<b>8,0-11,2</b>			8,61	79,06
<b>4,0 - 8,0</b>		16,24	83,16	4,37
<b>2,0 - 4,0</b>	15,92	75,66	7,71	0,07
<b>1,0 - 2,0</b>	35,45	6,11	0,17	0,01
<b>0,5 - 1,0</b>	22,80	0,10	0,01	0,01
<b>0,25 - 0,5</b>	15,27	0,08	0,03	0,01
<b>0,125 - 0,25</b>	9,54	0,10	0,01	0,01
<b>0,063 - 0,125</b>	0,14	0,24	0,03	0,02
<b>&lt; 0,063</b>	0,89	1,47	0,30	0,17
<b>Summe:</b>	100,00	100,00	100,03	100,03

## 4.2 Bitumen

Die im gegenständlichen Projekt verwendeten Bitumensorten sind in Tabelle 4 zu finden. Bei den verwendeten Bitumen handelt es sich um typische Sorten im österreichischen Straßenbau, wobei das polymermodifizierte Bitumen 45/80-75 zusätzlich zu den im Vertrag vereinbarten zwei Bitumensorten zur Anwendung kam.

**Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Bitumensorten**

Bitumensorte	Herkunft	Laborcode
70/100	Österreich	B01
PmB 45/80-65	Österreich	B02
PmB 45/80-75	Österreich	B03

### 4.3 Asphaltmischgutkonzeption

Um die Ermüdungsbeständigkeit von bituminösen Deckschichten, die Schäden wie Korn- und Schollenausbrüche zur Folge haben, auch auf Asphaltenebene untersuchen können, und somit Korrelationen mit der Ermüdungsbeständigkeit auf Mastixenebene erlauben, wurde ein Asphaltbeton AC deck 11 A1 mit einem Bindemittelgehalt von 5,2% gewählt. Zum einen, weil dieses Mischgut häufig als Deckschicht in Österreich eingesetzt wird, andererseits, weil die TU Wien bereits eine breite Datenbasis für dieses Mischgut sowohl auf Asphalt- als auch auf Mastixenebene hat. Um einen einfachen Vergleich der Auswirkungen der unterschiedlichen Füller im Asphaltmischgut zu ermöglichen, wurde für alle hergestellten Probekörper dieselbe Rezeptur verwendet. Einzig das Material der Feinanteile variiert bei den unterschiedlichen Mischgutkonzeptionen, die Menge bleibt jedoch unberührt. In Tabelle 5 sehen sie die Mischgutrezeptur des AC deck 11 A1. In Abbildung 2 sehen sie die dazugehörige Sieblinie und die dazugehörigen Grenzsieblinien gemäß ÖNORM B3580-1.

**Tabelle 5: Asphaltmischgutkonzeption**

Korngröße:		0/0,063	0,063/0,125	0/2	2/4	4/8	8/11
gewählter Massenanteil [M%]:		6,1	3,8	34,0	8,0	20,0	22,9
Korngrößen [mm]	22,4 -31,5						
	16,0-22,4						
	11,2 -16,0						16,28
	8,0-11,2					8,61	79,06
	4,0 - 8,0				16,24	83,16	4,37
	2,0 - 4,0			15,92	75,66	7,71	0,07
	1,0 - 2,0			35,45	6,11	0,17	0,01
	0,5 - 1,0			22,80	0,10	0,01	0,01
	0,25 - 0,5			15,27	0,08	0,03	0,01
	0,125 - 0,25			9,54	0,10	0,01	0,01
	0,063 - 0,125	0,00	100,00	0,14	0,24	0,03	0,02
< 0,063	100,00	0,00	0,89	1,47	0,30	0,17	

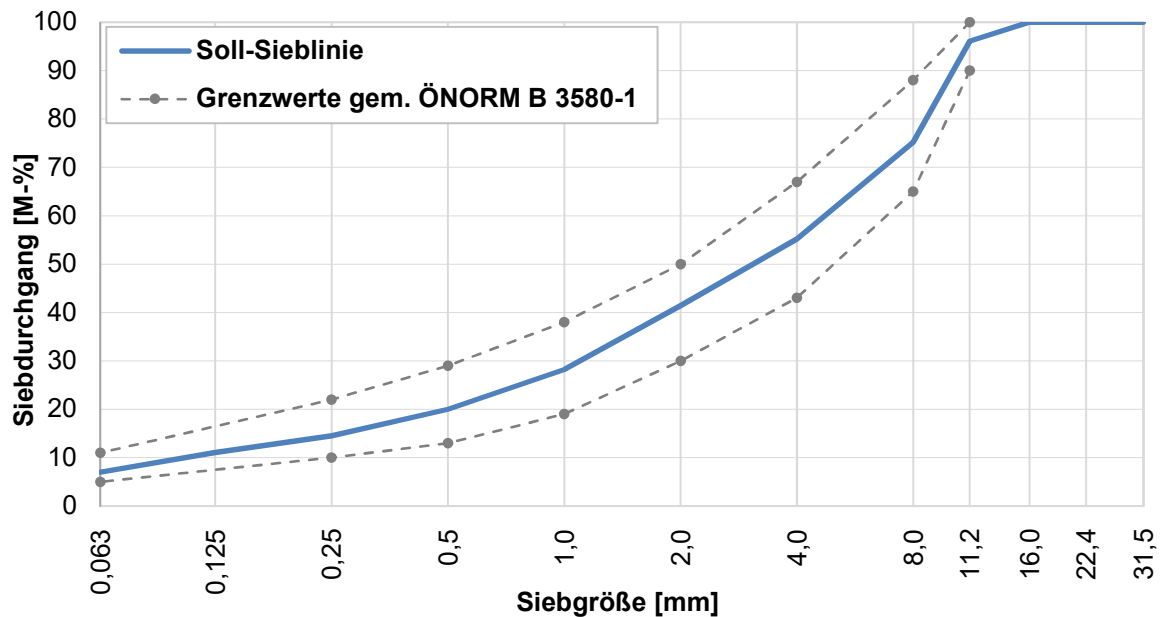


Abbildung 2: Soll-Sieblinie des Referenzmischguts AC deck 11 A1 und die dazugehörigen Grenzsieblinien gemäß ÖNORM B3580-1

#### 4.4 Füllermischung

Anhand der Soll-Sieblinie und dem gewählten Bindemittelgehalt aus dem vorherigen Abschnitt wurden die Masseanteile der einzelnen Füllerbestandteile berechnet. Die Füllermischung setzt sich aus 4 Anteilen zusammen:

- Zum einem setzt sich die Mischung aus den beiden Kornklassen 0/0,063 und 0,063/0,125mm der groben Gesteinsfraktionen zusammen, welche durch die Vorbereitung mittels waschen und sieben nicht entfernt werden konnte. Es handelt sich hierbei um geringe Mengen des Eigenfüllers.
- Der wesentliche Bestandteil der Füllermischung setzt sich jedoch aus dem zugesetzten Füller zusammen. Die beiden Kornklassen 0/0,063 und 0,063/0,125mm stellen neben dem Bitumen die Verbindung zur Asphaltenebene her und sind essentiell für alle weiteren Untersuchungen.

Um die Füllereigenschaften in den folgenden Abschnitten zu untersuchen, wurden die einzelnen Masseanteile bezogen auf die Füllermischung aus der Soll-Sieblinie berechnet. Daraus resultieren 6 verschiedenen Füllermischungen, welche mit ihrer Laborbezeichnung in Tabelle 6 zu finden sind.

**Tabelle 6: Zusammensetzung der 6 Füllermischungen**

Laborcode	Material Eigenfüller 0/0,063mm 4,95 M. %	Material Eigenfüller 0,063/0,125mm 0,72 M. %	Material zugesetzter Füller 0/0,063mm 58,13 M. %	Material zugesetzter Füller 0,063/0,125mm 36,20 M. %
F01	Granitporphyr	Granitporphyr	Granitporphyr	Granitporphyr
F02	Granitporphyr	Granitporphyr	Granit	Granit
F03	Granitporphyr	Granitporphyr	Basalt	Basalt
F04	Granitporphyr	Granitporphyr	Kalk	Kalk
F05	Granitporphyr	Granitporphyr	Kalkhydrat	Kalkhydrat
F06	Granitporphyr	Granitporphyr	Quarz	Quarz

## 4.5 Asphaltmastixmischung

Die Zusammensetzung der Asphaltmastix wird aus der gewählten Asphaltmischgutkonzeption abgeleitet. Demnach teilt sich die Zusammensetzung in die zwei Teile Bitumen und Füllermischung. Gemäß Tabelle 5 lassen sich die jeweiligen Anteile der einzelnen Komponenten berechnen und sind in Tabelle 7 angegeben:

**Tabelle 7: Asphaltmastixmischung**

<b>Massenanteil Bitumen:</b>	33,13 M%
<b>Massenanteil Füllermischung:</b>	66,87 M%

Eine detaillierte Beschreibung, wie die Mastix hergestellt wird, ist Teil der im Anhang beigefügten Arbeitsanweisung.

## 5 UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND PRÜFERGEBNISSE DER AUSGANGSMATERIALIEN

Die Prüfungen an den einzelnen Bitumensorten und der verwendeten Füller wurden mit möglichst unterschiedlichen Prüfungsmethoden durchgeführt, um ein großes Spektrum an Daten für die weiteren Analysen der Ermüdungsfestigkeit der Mastix- und Asphaltmischungen zu erhalten.

### 5.1 Prüfungen an Bitumen

#### 5.1.1 Nadelpenetration

Das Prüfverfahren zur Bestimmung der Nadelpenetration (Pene) ist in der EN 1426 [25] geregelt und gehört zu den konventionellen Prüfmethode. Die Nadelpenetration wird



mittels eines Penetrometers bestimmt. Unter Einhaltung der Norm für Probenvorbereitung (EN 12594, [26]) wird Bitumen in ein Probengefäß gegossen und abgedeckt. Nachdem die Probe an der Luft ausreichend abgekühlt ist, wird das Probengefäß mit dem Bitumen in einem beheizten Wasserbad auf genau 25°C temperiert. Nach der Temperierphase wird die eigentliche Prüfung durchgeführt. Dazu wird die Spitze einer genormten Nadel, welche inklusive Zusatzgewicht eine Gesamtmasse von 100g hat, vorsichtig auf die Oberfläche der Bitumenprobe gestellt ohne dabei die Oberfläche zu berühren. Folgend kann die Prüfung gestartet werden, bei der die Nadel aus dem Nadelhalter gelöst wird und zufolge des Eigengewichts von 100g in das Bitumen penetriert. Die Eindringtiefe nach 5 Sekunden wird in 1/10mm notiert. Dadurch kann das Bitumen eingeordnet werden. Die beiden Zahlen einer Bitumenbezeichnung stehen dabei für die untere- beziehungsweise obere Grenze der zulässigen Penetrationstiefe. Als Beispiel muss für ein Bitumen 70/100 das Prüfergebnis einer Messprobe demnach zwischen 7 mm und 10 mm liegen. Je kleiner der Wert, desto härter ist das Bitumen. Die Bestimmung der Nadelpenetration erfolgte mit dem Prüfgerät FRÖWAG Nadelpenetrometer 1.571. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der 3 verwendeten Bitumen zusammengefasst.

**Tabelle 8: Ergebnisse der Nadelpenetration**

Bitumensorte	Laborcode	Pene [1/10 mm]
70/100	B655A	85
PmB 45/80-65	B642A	51
PmB 45/80-75	B1026A	54

### 5.1.2 Ring und Kugel

Die Bestimmung des Erweichungspunkts mit Ring und Kugel (ERK) wird gemäß der Norm EN 1427 durchgeführt. Dabei wird jene Temperatur bestimmt, bei der das Bindemittel unter genormten Prüfbedingungen in einen verformbaren Zustand übergeht. Anfangs wird das Bitumen unter Einhaltung der Norm für Probenvorbereitung (EN12594) vorbereitet. Die Bitumenprobe wird normgerecht erhitzt und in zwei auf 120°C vorgeheizten Messingringe gegossen. Nach einer Abkühlphase an der Luft für mindestens 30 Minuten wird das überschüssige Bitumen mit einem scharfkantigen Werkzeug (z.B. Messer) planeben abgeschnitten. Die Ringe können dann in die Prüfapparatur eingesetzt und zusammen mit den aufgelegten Prüfkugeln (3,5g je Kugel) in einem temperierten Wasserbad auf Starttemperatur gebracht werden (Erwartet man einem sehr hohen Erweichungspunkt muss Glycerol statt Wasser als Temperierflüssigkeit verwendet werden). Anschließend

beginnt die Prüfung und das Wasserbad wird mit einer Heizrate von 5 Kelvin/Minute erwärmt. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu gewährleisten ist die Einhaltung der Heizrate entscheidend. Durch die steigende Temperatur erweicht das Bitumen und durch die Auflast der Kugeln biegt sich der Bitumenfilm durch. Die somit von Bitumen umhüllten Kugeln sinken Richtung Gefäßboden. Erreichen die Kugeln eine definierte Messstrecke von 25,4 mm, so wird die zu diesem Zeitpunkt gemessene Temperatur im Wasserbad notiert. Diese Temperatur entspricht dem Erweichungspunkt gemäß EN 1427. Die Bestimmung des Erweichungspunkts mit Ring und Kugel erfolgte mit der Messapparatur FRÖWAG Ring- und Kugelautomat 1.640. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der 3 verwendeten Bitumen zusammengefasst.

**Tabelle 9: Ergebnisse der Erweichungspunkte**

Bitumensorte	Laborcode	ERK [°C]
70/100	B655A	45,4
PmB 45/80-65	B642A	85,3
PmB 45/80-75	B1026A	89,3

## 5.2 Prüfungen an Füller

Im folgenden Abschnitt sind die durchgeführten Prüfungen und deren Ergebnisse zusammengefasst. Als Ausgangsstoff für alle Prüfungen wurde jeweils die fertige Mischung aus Eigenfüller und zugesetztem Füller gemäß Kapitel 4.4 verwendet.

### 5.2.1 Reindichte

Für die zu untersuchenden Füller wurde an der Universität für Bodenkultur in Wien die Reindichte mittels Helium-Pyknometer ermittelt. Dabei wird das Volumen der Probe mittels Gasverdrängung präzise bestimmt. Das Messsystem besteht aus 2 Kammern mit gleich großem Volumen, welches bekannt ist. Für die Messung wird zunächst die Probe gewogen. In eine der beiden Kammer kommt dann der zu messende Füller, die andere Kammer bleibt leer. Zuerst wird die Kammer mit dem Füller mit Helium befüllt. Nach Erreichen eines vordefinierten Druckes wird das Gas in die zweite Kammer abgelassen. Durch den dabei gemessenen Druckunterschied in den beiden Kammern kann das Volumen des verdrängten Gases berechnet werden. Durch die Verwendung von Helium können die Moleküle bis in kleinste Poren vordringen. Aus dem Verhältnis des verdrängten Volumens und der gemessenen Masse der Probe kann die Reindichte ermittelt werden. Die Reindichte bezeichnet somit die Masse einer Substanz ohne Poren dividiert durch ihr

Volumen. Jede Probe wurde 10 Messzyklen unterzogen, aus den erhaltenen Ergebnissen wurde der Mittelwert gebildet, der die Reindichte des untersuchten Füllers ergibt.

**Tabelle 10: Reindichten der Füller**

Material	Laborcode	Reindichte [g/m <sup>3</sup> ]
Granitporphyr	F01	2,87
Granit	F02	2,78
Basalt	F03	3,00
Kalk	F04	2,72
Kalkhydrat	F05	2,57
Quarz	F06	2,65

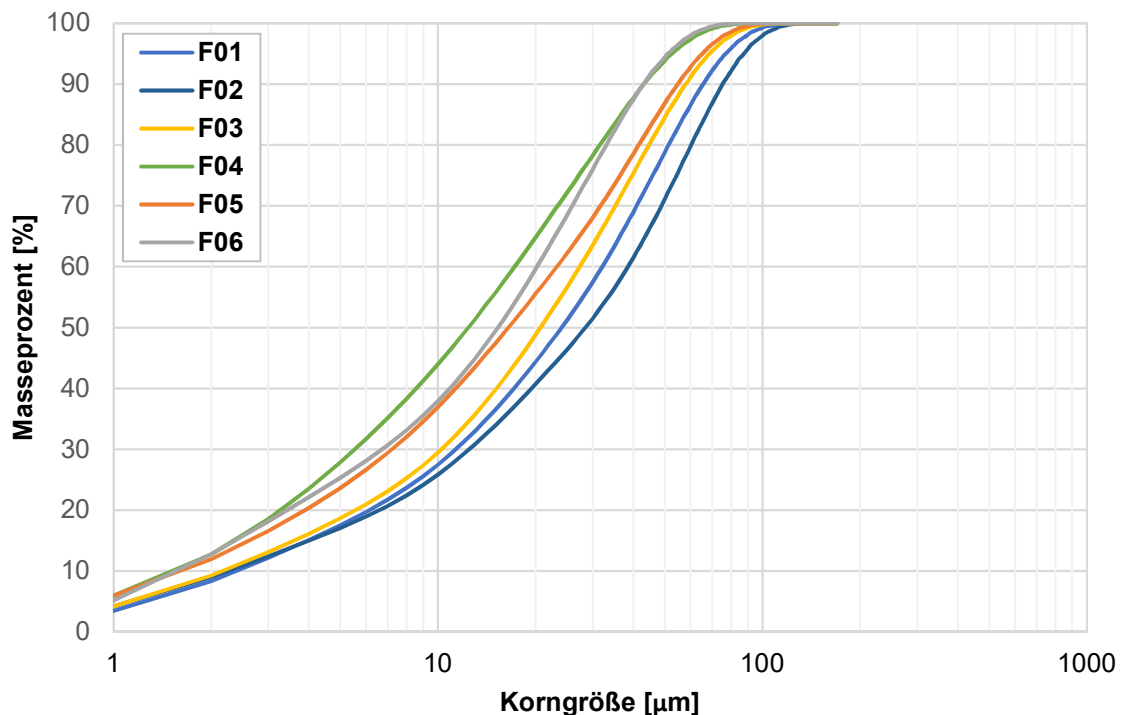
In Tabelle 10 sind die ermittelten Reindichten der 6 untersuchten Füller mittels Helium Pyknometer aufgelistet. Demnach besitzt wie zu erwarten Kalkhydrat mit 2,57 g/cm<sup>3</sup> die kleinste Reindichte während Basalt mit 3,0 g/m<sup>3</sup> die höchste Reindichte besitzt. Die anderen Füller besitzen Reindichten zwischen 2,7 und 2,9 g/m<sup>3</sup>.

### 5.2.2 Siebanalyse bis 0,002mm

Die Korngröße bis zu 0,002 mm der einzelnen Füller wurde mittels Laser-Partikel-Sizer bestimmt. Für die Durchführung der Messungen wurde das Messsystem FRITSCH Analysette 22 MicroTec Plus verwendet. Das Gerät ist vielseitig einsetzbar und wird zur Bestimmung der Größenverteilung von Suspensionen, Emulsionen und Pulvern mittels Laserbeugung verwendet. Im Gegensatz zur klassischen Siebung bietet die Laserbeugung zahlreiche Vorteile, unter anderem hohe Genauigkeit, kurze Analysezeiten und eine gute Reproduzierbarkeit. Der Messbereich der Analysette 22 reicht von 0,0008 mm bis 2 mm. Analysegeräte wie die Analysette basieren auf dem physikalischen Prinzip der Laserbeugung und nutzen die Streuung elektromagnetischer Wellen um die Partikelgrößenverteilung zu bestimmen. Das Prinzip basiert darauf, dass Partikel in einem parallelen Laserstrahl das Licht in einem festen Raumwinkel ablenken, abhängig vom Durchmesser der Partikel. Das gestreute Licht wird mittels Linsensystems auf einen Sensor fokussiert und anhand der Intensitätsverteilung des Streulichts und komplexer Mathematik die Partikelgrößenverteilung berechnet. Zuzufolge der Laserbeugung erhält man als Ergebnis die entsprechenden Partikeldurchmesser mit einem Durchmesser, der einer Kugel mit identischer Streulichtverteilung entspricht. In Tabelle 11 sind die errechneten Rückstände der Füller zufolge Laserbeugung auf den äquivalenten Sieben in Masseprozent (M%) zusammengefasst. In Abbildung 3 sind die dazugehörige Sieblinien dargestellt.

**Tabelle 11: Korngrößenverteilung der verwendeten Füller**

Sieb [mm]	Laborcode					
	F01 [M%]	F02 [M%]	F03 [M%]	F04 [M%]	F05 [M%]	F06 [M%]
0,002	8,34	9,00	9,24	12,74	11,96	12,80
0,004	15,12	14,98	16,11	23,51	20,35	22,14
0,008	23,67	22,43	25,25	38,30	32,04	33,13
0,016	38,13	35,36	41,61	57,66	49,14	51,47
0,032	59,89	53,53	66,11	80,45	70,32	78,70
0,063	88,52	82,10	92,69	98,09	94,16	98,63
0,125	100,00	99,93	100,00	100,00	100,00	100,00
0,250	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



**Abbildung 3: Sieblinien der verwendeten Füller**

Aus den gewonnenen Daten lassen sich sieblinienrelevante Kennwerte ableiten, welche die unterschiedlichen Sieblinien charakterisieren und für spätere Analysen zur Anwendung kommen. Zu den wichtigsten sieblinienverwandten Kennwerten zählen:

- **Siebdurchgang 0,002 mm [M%]**

Der Siebdurchgang entspricht jener Menge der Füllermischung, welche durch ein 0,002 mm Sieb hindurchgeht. Angegeben sind die Werte in Masseprozent [M.%],

berechnet mittels Siebdurchgang in Gramm [g] dividiert durch die Gesamtmasse der untersuchten Füllermischung in Gramm [g].

- **Siebdurchgang 0,016 mm [M%]**

Der Siebdurchgang entspricht jener Menge der Füllermischung, welche durch ein 0,016 mm Sieb hindurchgeht. Angegeben sind die Werte in Masseprozent [M.%], berechnet mittels Siebdurchgang in Gramm [g] dividiert durch die Gesamtmasse der untersuchten Füllermischung in Gramm [g].

- **Siebdurchgang 0,063 mm [M%]**

Der Siebdurchgang entspricht jener Menge der Füllermischung, welche durch ein 0,063 mm Sieb hindurchgeht. Angegeben sind die Werte in Masseprozent [M.%], berechnet mittels Siebdurchgang in Gramm [g] dividiert durch die Gesamtmasse der untersuchten Füllermischung in Gramm [g].

- **Sieblinienkennwerte  $d_{10}$  [mm]**

Rechnerisch ermittelte maximale Maschenweite in Millimeter [mm] eines Siebes bei der 10 Masseprozent der Füllermischung hindurch gehen.

- **Sieblinienkennwerte  $d_{30}$  [mm]**

Rechnerisch ermittelte maximale Maschenweite in Millimeter [mm] eines Siebes bei der 30 Masseprozent der Füllermischung hindurch gehen

- **Sieblinienkennwerte  $d_{60}$  [mm]**

Rechnerisch ermittelte maximale Maschenweite in Millimeter [mm] eines Siebes bei der 60 Masseprozent der Füllermischung hindurch gehen.

- **Sieblinienkennwerte  $C_c$  [-]**

Die Krümmungszahl  $C_c$  ist in der Bodenmechanik ein Kennwert zur Beschreibung der Sieblinie. Sie beschreibt die Krümmung der Sieblinie der untersuchten Probe. Die Ungleichförmigkeitszahl ist wie folgt definiert:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad (1)$$

- **Sieblinienkennwerte  $C_u$  [-]**

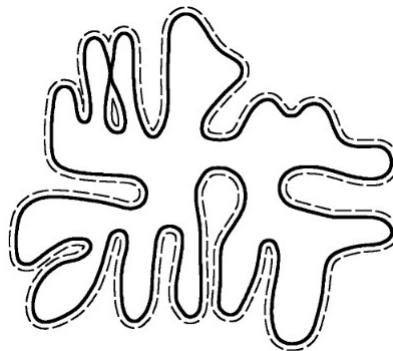
Die Ungleichförmigkeitszahl  $C_u$  ist in der Bodenmechanik ein Kennwert zur Beschreibung der Sieblinie. Sie beschreibt wie gleichförmig die Korngrößen der untersuchten Probe verteilt sind. Die Ungleichförmigkeitszahl ist definiert als das

Verhältnis des Durchmessers  $d_{60}$  zu dem Durchmesser  $d_{10}$  und beschreibt somit die Steigung in diesem Bereich.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2)$$

### 5.2.3 BET-Oberfläche des Füllers

Mittels BET-Verfahren kann die spezifische innere und äußere Oberfläche von dispersen und/oder porösen Festkörpern gemessen werden. Dabei wird die physisorbierte Gasmenge nach dem Verfahren von Grünauer, Emmett und Teller (BET-Verfahren) ermittelt. Dieses Verfahren beruht auf der Bestimmung der erforderlichen Menge an Adsorbates oder Adsorptivgases, um die äußere und innere zugängliche Probenoberfläche des Feststoffes mit einer vollständigen Adsorbatmonoschicht zu bedecken. Unzugängliche Poren können nicht miterfasst werden. [27]



**Abbildung 4: Schematische Darstellung der Oberfläche eines Partikels, die mit der Adsorptionsmethode erfasst wird (gestrichelte Linie) [27]**

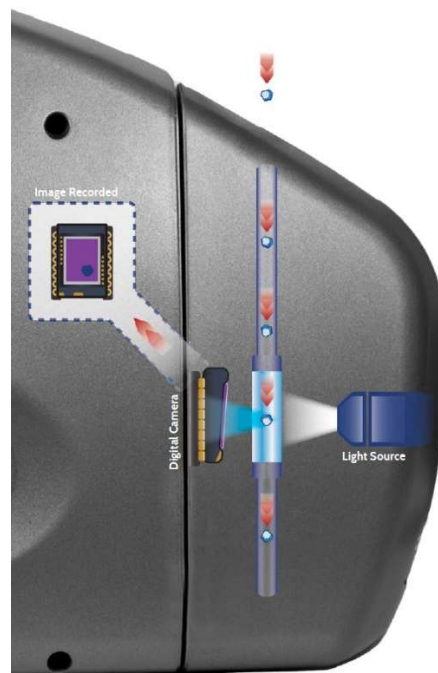
Die Monoschichtstoffmenge wird dann aus der Adsorptionsisotherme mit Hilfe der BET-Gleichung berechnet. Für die Messung kann jedes Gas verwendet werden, welches mit physikalisch schwachen Bindungen (Van-der-Waals-Kräfte) an der Probenoberfläche adsorbiert wird und demnach auch durch eine reine Druckerniedrigung bei gleichbleibender Temperatur desorbierbar ist. Das BET-Verfahren kann nicht für Materialien verwendet werden, welche das Messgas absorbieren [27]. In Tabelle 12 sind die ermittelten spezifischen Oberflächen der 6 untersuchten Füller mittels BET-Verfahren zusammengefasst. Vor allem der Füller aus Basalt sticht zufolge der Größe aus der Menge hinaus. Aufgrund des hohen Wertes wurde dieser Füller erneut gemessen, wodurch der Wert bestätigt wurde.

**Tabelle 12: Spezifische Oberfläche der verwendeten Füller**

Material	Laborcode	BET [m <sup>2</sup> /g]
Granitporphyr	F01	4,43
Granit	F02	1,93
Basalt	F03	18,97
Kalk	F04	1,54
Kalkhydrat	F05	5,43
Quarz	F06	1,29

### 5.2.4 Dynamische Bilduntersuchungen des Füllers

Mittels dynamischer Bildanalyse kann die Partikelform des Füllers untersucht werden. Dafür wird der Füller in einer Lösung dispergiert und anschließend dem Analysegerät zugeführt. Das Ablichten der Partikel des Füllers erfolgt mittels hochauflösender Kamera und einem Hochgeschwindigkeits-Blitzgerät (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5: Funktionsprinzip (SentinelPro ist ein Produkt von Vision Analytical)**

Einzelne Partikelbilder werden direkt betrachtet und als hochauflösende Grafikdateien für die Nachbearbeitung erfasst. Der dynamische, turbulente Strömungsweg ermöglicht eine zufällige Orientierung der Partikel und eine direkte Sicht auf die sich bewegenden Partikel innerhalb der Erfassungszone. Durch die erhaltenen zweidimensionalen Bilder der einzelnen Partikel wird die Partikelgrößenverteilung und Partikelform durch verschiedene Korneigenschaften (Beispiele siehe Abbildung 6) beschrieben.

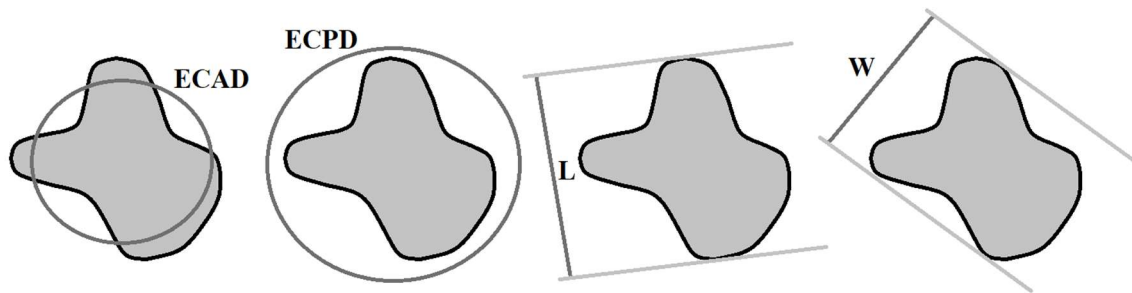


Abbildung 6: Beispiele für erfasste Kornformeigenschaften

In Abbildung 6 sind grundlegende Kennwerte der dynamischen Bilduntersuchung dargestellt. Der äquivalente Kreisflächendurchmesser  $D_a$  beschreibt den Durchmesser eines Kreises der die gleiche Fläche hat wie das Korn.

$$D_a = 2 \cdot \sqrt{\frac{\text{Kornfläche}}{\pi}} \quad (3)$$

Die Werte für die äquivalenten Kreisflächendurchmesser  $D_a$  zu den untersuchten Füllern sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Kreisflächendurchmesser  $D_a$  der verwendeten Füller

Kreisflächendurchmesser $D_a$ (Equivalent circular area diameter ECAD)						
Füller	Mittelwert [µm]	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	6,87	1,18	2,00	4,18	8,40	15,6
F02	6,46	1,41	2,40	4,39	8,00	13,64
F03	6,86	1,52	2,70	4,90	8,80	14,42
F04	5,89	1,52	2,50	4,36	7,50	11,89
F05	5,57	1,48	2,40	4,18	6,90	11,12
F06	6,50	1,36	2,50	4,69	8,40	13,78

Der äquivalente Kreisumfangsdurchmesser  $D_p$  entspricht dem Durchmesser eines Kreises, der den gleichen Umfang wie die Partikelbildsilhouette hat.

$$D_p = \frac{\text{Kornumfang}}{\pi} \quad (4)$$

Die Werte für die äquivalenten Kreisumfangsdurchmesser  $D_p$  zu den untersuchten Füllern sind in Tabelle 14 zusammengefasst.



**Tabelle 14: Kreisumfangsdurchmesser  $D_p$  der verwendeten Füller**

Kreisumfangsdurchmesser $D_p$ (Equivalent circular perimeter diameter ECPD)						
Füller	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	9,66	1,45	3,20	5,65	11,10	21,43
F02	8,10	1,82	3,30	5,38	9,70	16,60
F03	8,50	2,13	3,50	5,93	10,40	17,51
F04	6,93	1,95	3,30	5,12	8,40	13,46
F05	6,55	1,86	3,10	4,85	7,90	12,59
F06	8,32	1,83	3,50	6,00	10,40	17,12

Die Länge  $L$  eines Korn wird zufolge des maximalen Feret-Durchmessers  $F_{max}$  geschätzt. Dieser entspricht dem größten Abstand zwischen zwei parallelen Linien, die das Korn nicht schneiden. Die Breite  $W$  entspricht dem minimalem Feret-Durchmesser  $F_{min}$ . Dieser entspricht dem kleinsten Abstand zwischen zwei parallelen Linien, die das Korn nicht schneiden.

$$L = F_{max} \quad (5)$$

$$W = F_{min} \quad (6)$$

In Tabelle 15 und Tabelle 16 sind die Längen beziehungsweise Breiten der untersuchten Füller zusammengefasst. Aus den beiden Werten lässt sich das Verhältnis aus Länge durch Breite berechnen, bezeichnet als Feret-Aspekt-Verhältnis FA. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

**Tabelle 15: Länge  $L$  der verwendeten Füller**

Länge $L$ (Feret Length)						
Füller	Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	8,3	1,3	1,9	4,5	9,8	19,4
F02	8,2	1,5	2,8	5,4	10	17,5
F03	8,7	1,6	3,1	6,0	11,0	18,6
F04	7,3	1,7	3,0	5,3	9,2	14,8
F05	6,9	1,6	2,9	5,1	8,6	13,9
F06	8,3	1,4	2,7	5,8	10,8	18,0

**Tabelle 16: Breite W der verwendeten Füller**

Breite W (Feret Width)						
Füller	Mittelwert [µm]	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	7,1	1,5	2,5	4,3	8,4	15,6
F02	6,3	1,6	2,6	4,2	7,5	12,8
F03	6,6	1,8	2,8	4,7	8,2	13,7
F04	5,6	1,7	2,6	4,2	6,9	11,0
F05	5,3	1,7	2,6	4,0	6,5	10,3
F06	6,3	1,7	2,7	4,5	8,0	13,0

**Tabelle 17: Feret-Aspekt-Verhältnis FA der verwendeten Füller**

Feret-Aspekt-Verhältnis FA (Feret Aspect Ratio)						
Füller	Mittelwert	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	1,711	1,206	1,324	1,528	1,879	2,503
F02	1,630	1,216	1,318	1,489	1,765	2,214
F03	1,602	1,208	1,308	1,473	1,725	2,137
F04	1,551	1,208	1,295	1,435	1,646	1,985
F05	1,551	1,211	1,297	1,432	1,644	1,982
F06	1,657	1,215	1,332	1,521	1,817	2,243

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der dynamischen Bilduntersuchung hinsichtlich Zirkularität C zusammengefasst. Die Zirkularität ist das Verhältnis der Partikelfläche zur Fläche des Begrenzungskreises, der ein Teilchen umschließt aber nicht schneidet. Der Durchmesser des Begrenzungskreises  $D_{BC}$  ist definiert als der Durchmesser des kleinsten Kreises, der das Partikel umschließt, aber nicht schneidet.

$$\text{Zirkularität } C \text{ (Circularity)} = \frac{4 \cdot \text{Kornfläche}}{\pi \cdot D_{BC}^2} \quad (7)$$

Für die Zirkularität ist der Wert demnach 1 für ein perfekt rundes Korn und wird kleiner umso größer die Abweichung zum perfekten Kreis wird. Aus Tabelle 18 wird ersichtlich, dass vor allem der Füller Loja die größten Abweichungen zum perfekten Kreis im Vergleich zu den anderen Füllern aufweist. Dem gegenüber hat Kalkhydrat die höchsten Werte für die Zirkularität.

**Tabelle 18: Zirkularität C der verwendeten Füller**

Zirkularität C (Circularity)						
Füller	Mittelwert	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	0,658	0,343	0,468	0,677	0,845	0,937
F02	0,726	0,427	0,58	0,764	0,888	0,955
F03	0,734	0,447	602	0,77	0,889	0,955
F04	0,773	0,508	0,669	0,814	0,911	0,965
F05	0,78	0,513	0,673	0,823	0,92	0,968
F06	0,705	0,417	0,559	0,728	0,867	0,943

Die Elliptizität E wird ähnlich der Zirkularität berechnet. Dabei entspricht der Wert für die Elliptizität dem Verhältnis der Kornfläche zur Fläche der begrenzenden Ellipse. Ein Wert von 1 würde einer perfekten elliptischen Form entsprechen. Bei Abweichungen der Kornform zur elliptischen Form wird der Wert kleiner. In Tabelle 19 sind die Werte für die untersuchten Füller zusammengefasst. Daraus lässt sich erkennen, dass vor allem der Füller Kalkhydrat der elliptischen Form am nächsten kommt, wobei Loja am wenigsten dieser Form entspricht.

**Tabelle 19: Elliptizität E der verwendeten Füller**

Elliptizität E (Ellipticity)						
Füller	Mittelwert	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	0,837	0,672	0,766	0,86	0,932	0,97
F02	0,864	0,711	0,808	0,892	0,948	0,977
F03	0,866	0,721	0,810	0,891	0,945	0,975
F04	0,891	0,767	0,845	0,915	0,959	0,983
F05	0,894	0,77	0,850	0,919	0,961	0,983
F06	0,85	0,696	0,789	0,874	0,937	0,971

Die Rechteckigkeit R ist das Verhältnis der Kornfläche zur Fläche des minimal begrenzenden Rechtecks. Das begrenzende Rechteck ist definiert durch die kleinste mögliche Fläche, welche das Korn umschließt, aber nicht schneidet. Die Rechteckigkeit hat einen Wert von 1 für ein exakt rechteckiges Korn und wird kleiner, wenn es von dieser Form abweicht. In Tabelle 20 sind die Werte für die untersuchten Füller zusammengefasst. Zufolge der Ergebnisse lassen sich keine klaren Unterschiede bei den Füllern feststellen.

**Tabelle 20: Rechteckigkeit R der verwendeten Füller**

Rechteckigkeit R (Rectangularity)						
Füller	Mittelwert	10% Perzentil	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	90% Perzentil
F01	0,627	0,507	0,583	0,648	0,687	0,711
F02	0,647	0,545	0,618	0,665	0,695	0,718
F03	0,646	0,552	0,617	0,662	0,693	0,714
F04	0,66	0,583	0,643	0,672	0,699	0,719
F05	0,661	0,588	0,637	0,673	0,699	0,72
F06	0,632	0,526	0,596	0,651	0,684	0,708

### 5.2.5 Bestimmung des Hohlraumgehalts an trocken verdichtetem Füller (Hohlraumgehalt nach Rigden, RV)

Bei diesem Prüfverfahren nach EN 1097-4 [28] wird der Füller mittels normten Verfahren mit einem Verdichtungsgerät verdichtet. Durch Schichtenhöhenmessung wird das Volumen des verdichteten Füllers ermittelt. Daraus wird der prozentuale Hohlraumgehalt des verdichteten Füllers berechnet. Der Hohlraumgehalt wird mittels Dreifachbestimmung ermittelt. Für den Versuch werden  $10 \pm 1$  g Füller in die Bohrung des Fallblocks eingebracht. Der Füller wird mit Filtrierpapier bedeckt und der Kolben wird vorsichtig in die Bohrung eingeführt. Fallblock und Kolben werden bis zum oberen Anschlag angehoben und dann frei hinunterfallen gelassen. Der Vorgang wird 100-mal wiederholt in Abständen von etwa einer Sekunde. Anschließend wird die Schichthöhe des verdichteten Füllers auf eine Genauigkeit von 0,01 mm gemessen. Der Hohlraumgehalt wird mittels ermittelter Höhe, Masse des verdichteten Füllers, Dichte des Füllers und Durchmesser der Bohrung im Fallblock berechnet. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Tabelle 21 zusammengefasst

**Tabelle 21: Hohlraumgehalt der trocken verdichteten Füller**

Material	Laborcode	RV [m <sup>3</sup> /g]
Granitporphyr	F01	39,00
Granit	F02	33,00
Basalt	F03	36,00
Kalk	F04	31,00
Kalkhydrat	F05	43,00
Quarz	F06	35,00

## 6 GVO PRÜFUNGEN AM MISCHGUT

Zufolge der ausgewählten Materialien in Kapitel 4 und den Angaben der Asphaltmischgutrezeptur in Kapitel 4.3 wurden Asphaltprobekörper und zufolge den Angaben in Kapitel 4.4 die entsprechenden Asphaltmastixmischungen im Labor hergestellt und den nachfolgenden Prüfungen unterzogen.

### 6.1 Ermüdungsprüfungen an Asphaltmastix

Die Ermüdungsprüfungen an der Mastix werden mittels DSR durchgeführt. Die dafür benötigten hyperbolischen Mastixprobekörper (siehe Abbildung 7) werden mit Hilfe einer Negativ-Silikonform direkt im DSR vorbereitet und auf +10°C temperiert. Bei dieser Prüftemperatur erreicht die Asphaltmastixprobe die notwendige Steifigkeit, um Kriechen des Probekörpers im Rheometer zu verhindern, da der Probekörper sonst seine ursprüngliche Form verliert. Die hyperbolische Probekörperform wird angewandt, da bei einer zylindrischen Probekörperform häufig ein Versagen am Interface Prüfstempel und Probekörper einhergeht. Die Verjüngung in der Mitte stellt zufolge der Spannungskonzentration in diesem Bereich eine Sollbruchstelle her. [7]



**Abbildung 7: Hyperbolischer Mastixprobekörper**

Durch die gewählte Prüffrequenz von 30 Hz wird die Prüfdauer auf einem praxisgerechtem Niveau gehalten. Zudem soll eine Korrelation mit den 4PB-Versuchen vereinfacht werden, da dieser bei derselben Prüffrequenz ausgeführt wird. Die Schubspannungsstufen werden im Bereich um den linear-viskoelastischen (LVE) Bereich gewählt, um eine Linearität der Ergebnisse anzustreben. In Abbildung 8 ist die Ermüdungskurve eines spannungsgesteuerten Versuchs bis zum Versagen des Probekörpers dargestellt. Wie bei den Versuchen am 4PB gibt es auch bei Mastixermüdungsversuchen eine

Einschwingphase und die darauffolgende Bildung von Mikrorissen in der Struktur. Die im weiteren Verlauf entstehenden Makrorisse, die bis zum Materialversagen führen, werden nur bei Mastixermüdungsprüfung am DSR aufgezeichnet.

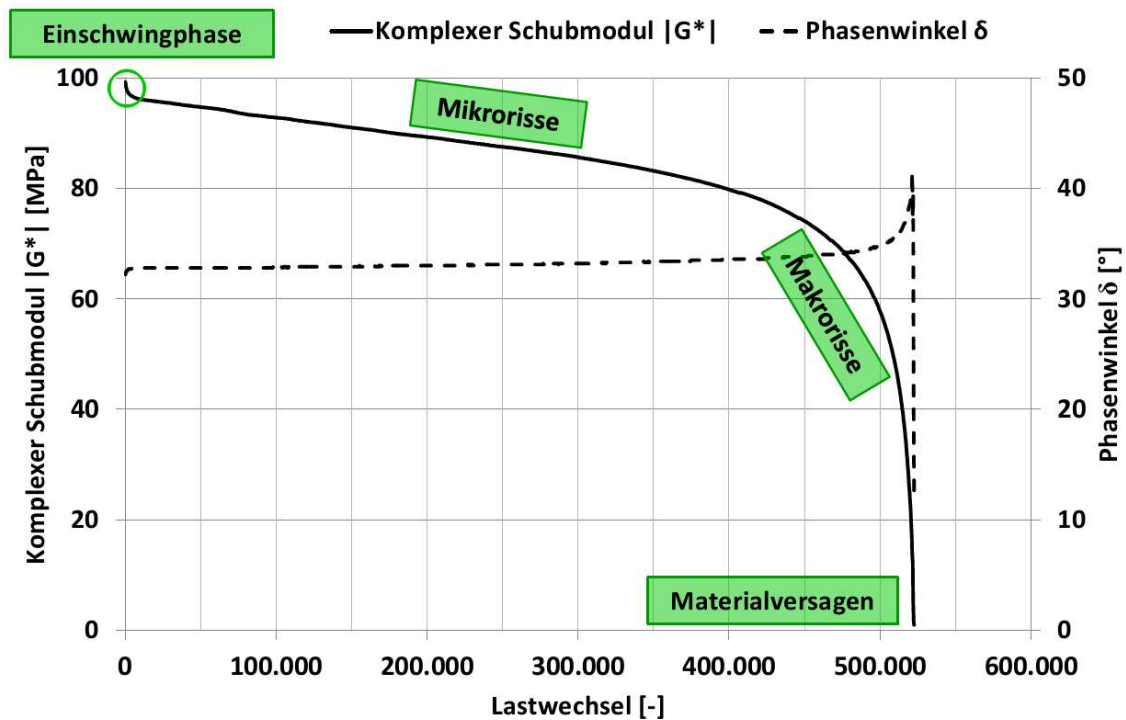


Abbildung 8: Messergebnisse eines Mastixermüdungsversuches [2]

Die anfängliche Einschwingphase der Ermüdungsprüfung an der Mastix wird dabei von Thixotropie angeführt. In der Rheologie beschreibt Thixotropie eine Zeitabhängigkeit der Fließeigenschaften, das bedeutet die Viskosität nimmt infolge der andauernden mechanischen Beanspruchung ab und nimmt nach beendigter Beanspruchung wieder zu. Es beschreibt somit einen reversiblen Effekt. Im Anschluss der kurzen Einschwingphase am Anfang der Ermüdungsprüfung folgt die Bildung der Mikrorisse als Folge der wiederholten Beanspruchung. In der dritten und letzten Phase verbinden sich diese Mikrorisse zu Makrorissen, welche sich in weiterer Folge zu einer Bruchlinie verbinden. Dadurch versagt der Probekörper und kann keine Kräfte mehr übertragen. Das zeigt sich auch im Verlauf der Steifigkeit (komplexer Schubmodul) als auch im Phasenwinkel (siehe Abbildung 8), da Beide im Moment des Versagens abrupt abfallen. [2]

Im Vergleich zu Prüfungen am 4PB, bei dem als Versagenskriterium die Reduzierung der Steifigkeit auf 50% der Anfangssteifigkeit verwendet wird, kann bei Mastixermüdungsversuchen bis zum Materialversagen geprüft werden. Deshalb wurde als

Versagenskriterium das Erreichen des maximalen Phasenwinkels definiert. Der durch das verwendete Prüfverfahren generierte Vorteil gegenüber den häufig in der Literatur erwähnten LAS-Test ([29]; [30]) ist, dass mit keinen mathematischen Modellierungstechniken gearbeitet wird, um das Ermüdungsverhalten zu berechnen, sondern das Material bis zum tatsächlichen Bruch beansprucht wird und somit der Fehlereinfluss durch Modellierungsparameter wegfällt.

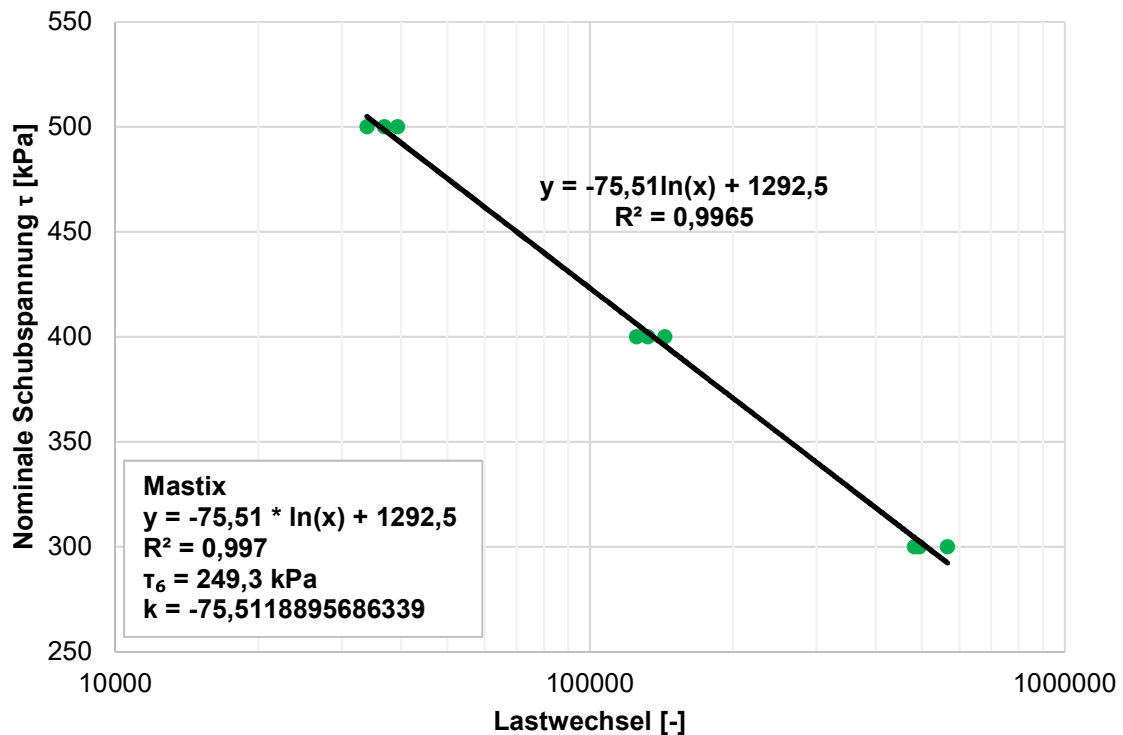


Abbildung 9: Wöhlerkurve einer Mastixprobe

Das Prüfprogramm sieht vor, dass pro Mastixmischung jeweils 3 Prüfungen bei 3 unterschiedlichen Schubspannungen durchgeführt wird, resultierend in 9 Prüfungen pro Mischung. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um nominale Schubspannungen handelt, da die tatsächliche Schubspannung an der Sollbruchstelle aufgrund der eingeschnürten Probekörperform höher ist. Das DSR berechnet die Scherspannung am maximalen Radius für eine zylindrische Probekörperform. Zuzufolge der Einzelversuche kann eine Wöhlerkurve erstellt werden, durch die zwei wesentliche Prüfergebnisse abgeleitet werden können. Zum einen repräsentiert der Ermüdungswert  $\tau_6$  die notwendige Schubspannung, die notwendig ist, um eine Million Lastwechsel zu erreichen. Zum anderen wird die Steigung  $k$  der Wöhlergerade ermittelt, die ebenfalls aussagekräftig hinsichtlich der Ermüdungseigenschaften einer Mastixprobe ist. In Abbildung 9 ist ein exemplarisches

Prüfergebnis einer Mastixprobe in Form der Wöhlerkurve dargestellt. Neben der ausgezeichneten Wiederholbarkeit der einzelnen Versuche auf unterschiedlichen Spannungsniveaus ist auch die Anwendbarkeit der klassischen Regressionsanalyse mit hoher Bestimmtheit ( $R^2$ ) erkennbar.

### 6.1.1 Prüfergebnisse zu den Ermüdungsprüfungen an Asphaltmastix

Im Rahmen dieser Studie wurden aus den in Kapitel 4 beschriebenen Materialien 16 verschiedene Mastixsorten gemischt und mittels DSR auf Ermüdung getestet. In Tabelle 22 sind die einzelnen Mastixsorten und die dafür verwendeten Materialien zusammengefasst.

**Tabelle 22: Asphaltmastixmischungen**

<b>Mastix</b>	<b>Bitumen [33,13 M.-%]</b>	<b>Mischfüller [66,87 M.-%]</b>
<b>M11</b>	B01 (70/100)	F01
<b>M12</b>	B01 (70/100)	F02
<b>M13</b>	B01 (70/100)	F03
<b>M14</b>	B01 (70/100)	F04
<b>M15</b>	B01 (70/100)	F05
<b>M16</b>	B01 (70/100)	F06
<b>M21</b>	B02 (PmB 45/80-65)	F01
<b>M22</b>	B02 (PmB 45/80-65)	F02
<b>M23</b>	B02 (PmB 45/80-65)	F03
<b>M24</b>	B02 (PmB 45/80-65)	F04
<b>M25</b>	B02 (PmB 45/80-65)	F05
<b>M26</b>	B02 (PmB 45/80-65)	F06
<b>M31</b>	B03 (PmB 45/80-75)	F01
<b>M34</b>	B03 (PmB 45/80-75)	F04
<b>M35</b>	B03 (PmB 45/80-75)	F05
<b>M36</b>	B03 (PmB 45/80-75)	F06

Für die Auswertung der Ermüdungsversuche wird jene Lastwechselzahl verwendet, bei der der Phasenwinkel ein Maximum erreicht. Die Prüfungen erfolgen bei 3 unterschiedlichen Schubspannungsniveaus im Rahmen von 300 – 700 kPa und einer Prüftemperatur von +10°C. Pro Mastix werden somit 9 Einzelprüfungen durchgeführt. Daraus ergeben sich mehr als 144 Einzelprüfungen für alle Mastixsorten. Aus den Einzelprüfungen lassen sich die Kennwerte für den Betrag des initialen komplexen Schubmoduls und des initialen Phasenwinkels am Beginn des Versuches festhalten, sowie die Lastwechselzahl zum



Zeitpunkt des Versagens bestimmt. Aus den neun Einzelversuchen lässt sich für jede Mastix eine Wöhlerkurve konstruieren. Aus dieser lässt sich wiederum der Kennwert  $\tau_6$  und die Steigung  $k$  der Wöhlerkurve ableiten. In den Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die konstruierten Wöhlerkurven der 16 verschiedenen Mastixsorten dargestellt, differenziert durch die verwendeten Bitumensorten.

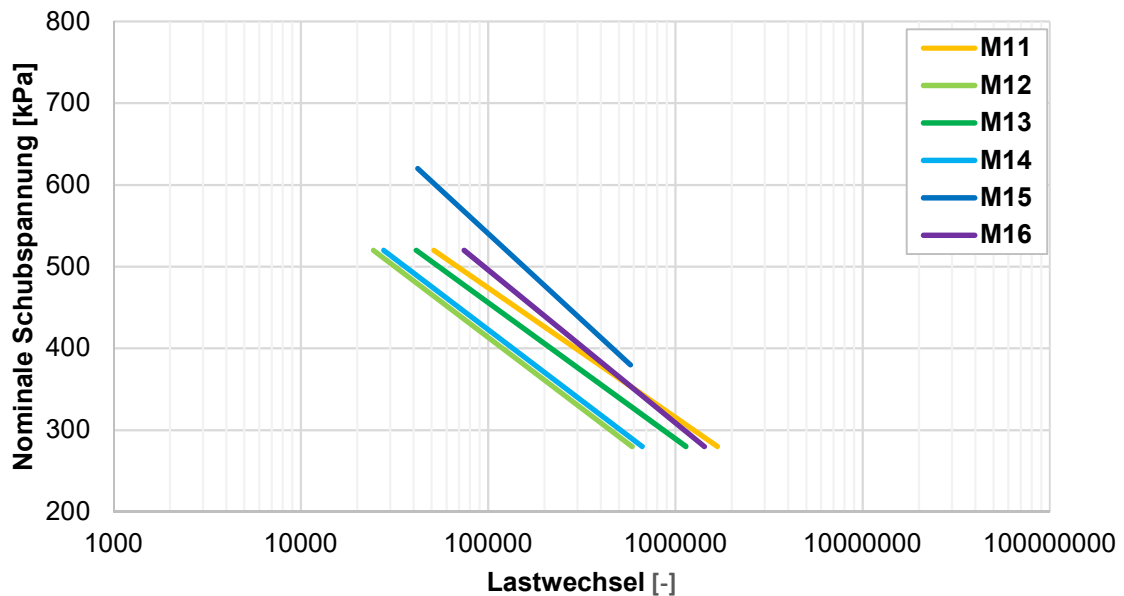


Abbildung 10: Wöhlerkurven der Mastixproben mit Bitumen 70/100

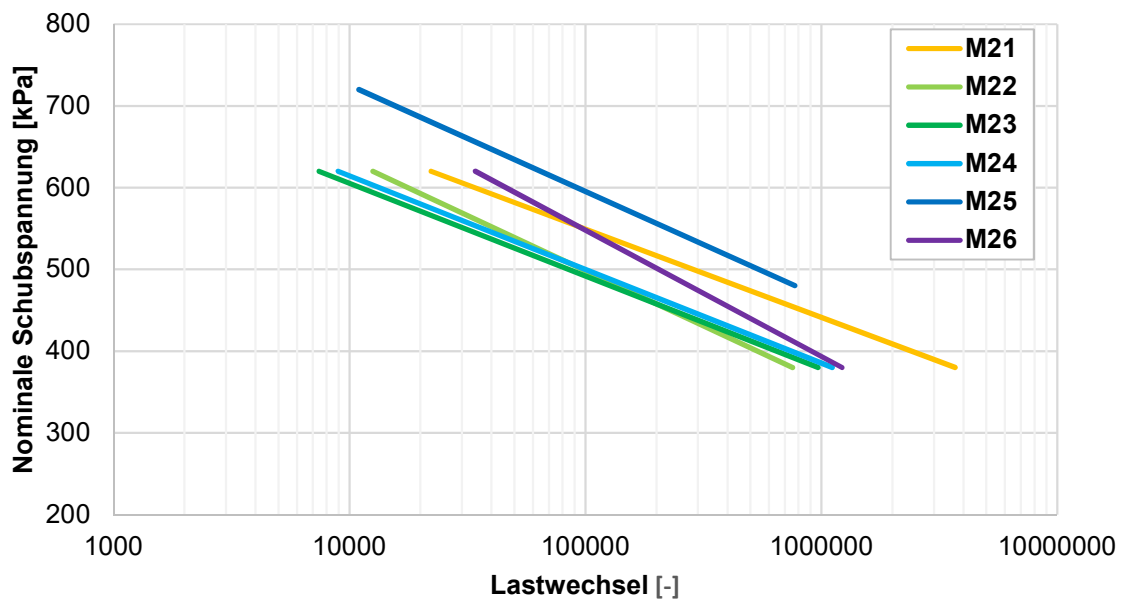
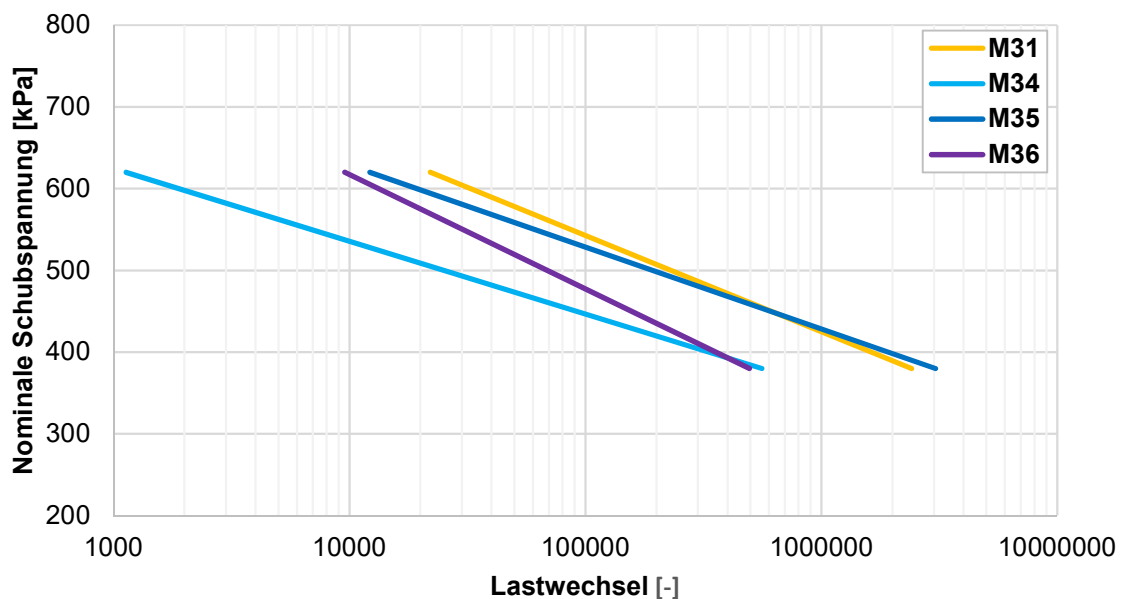


Abbildung 11: Wöhlerkurven der Mastixproben mit Bitumen PmB 45/80-65

Abbildung 10 zeigt auf, dass die Mastix M15 eine hohe Ermüdungsfestigkeit hat, wobei Mastix M12 und M14 geringe Ermüdungsfestigkeiten aufweisen. Zudem haben alle Kurven eine annähernd gleiche Steigung. Abbildung 11 zeigt ein ähnliches Bild wie bei den Wöhlerkurven jener Mastixsorten, welche das Bitumen 70/100 als Ausgangsmaterial haben. Auch hier zeigt die Mastix M25 die höchste Ermüdungsfestigkeit im Gegensatz zu den Mastixsorten M22, M23 und M24, welche geringe Ermüdungsfestigkeiten aufweisen. Zudem haben auch alle Kurven wieder eine annähernd gleiche Steigung mit Ausnahme der Mastix M26.



**Abbildung 12: Wöhlerkurven der Mastixproben mit Bitumen PmB 45/80-75**

Auch in Abbildung 12 können ähnliche Ergebnisse abgelesen werden. Wie zuvor sind auch hier die Steigungen der Kurven ähnlich, mit Ausnahme der Mastix M36. Bei den Ermüdungsfestigkeiten ist M35 wieder im oberen Leistungsbereich und M34 im unteren Leistungsbereich zu finden. Außerdem lässt sich feststellen, dass Mastixsorten mit polymermodifizierten Bitumen ein besseres Leistungsbild haben als jene mit nicht modifizierten Bitumen. Dies ist deutlich in Abbildung 13 zu erkennen. Hier sind die Ergebnisse des Kennwertes  $\tau_6$  aller Mastixsorten, abgeleitet aus den entsprechenden Wöhlerkurven, gegenübergestellt. Die Mastixsorten mit dem nicht modifizierten Bitumen 70/100 (grüne Balken) haben deutlich kleinere Werte als die Mastixsorten mit dem polymermodifizierten Bitumen 45/80-65 (blaue Balken) bzw. 45/80-75 (violette Balken). Im Gegensatz dazu kann aus Abbildung 14 entnommen werden, dass die Steigung  $k$  sich umgekehrt verhält. Die Mastixsorten mit dem nicht modifizierten Bitumen 70/100 (grüne

Balken) haben eine deutlich größere Steigung als die Mastixsorten mit dem polymermodifizierten Bitumen 45/80-65 (blaue Balken) bzw. 45/80-75 (violette Balken).

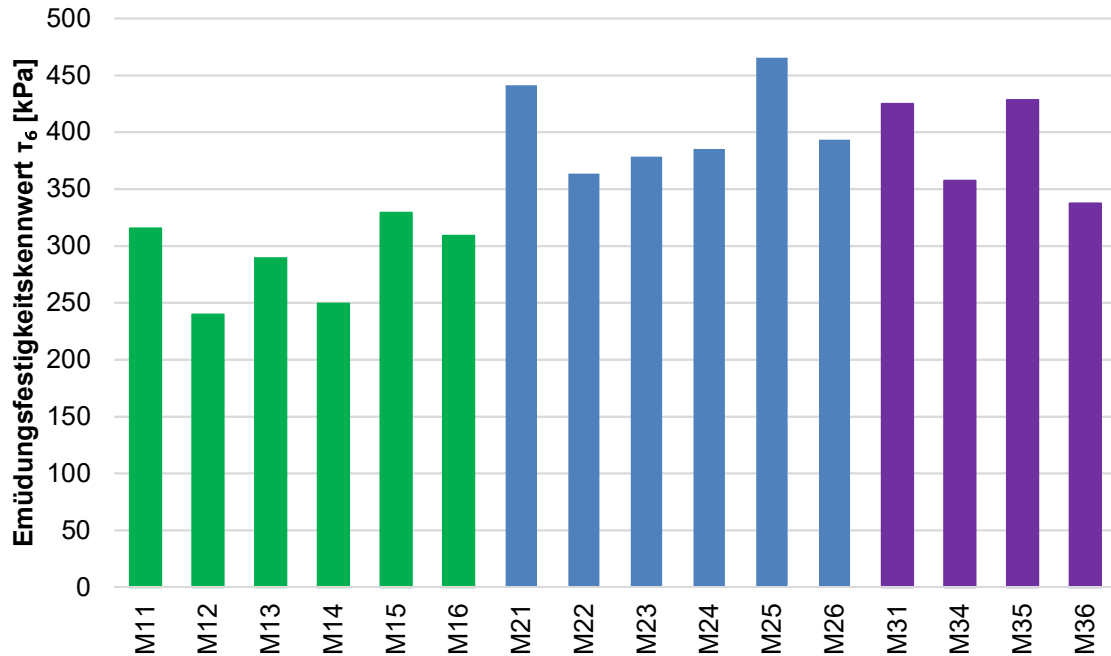


Abbildung 13: Ermüdungsfestigkeitskennwerte  $\tau_6$  der geprüften Mastixsorten

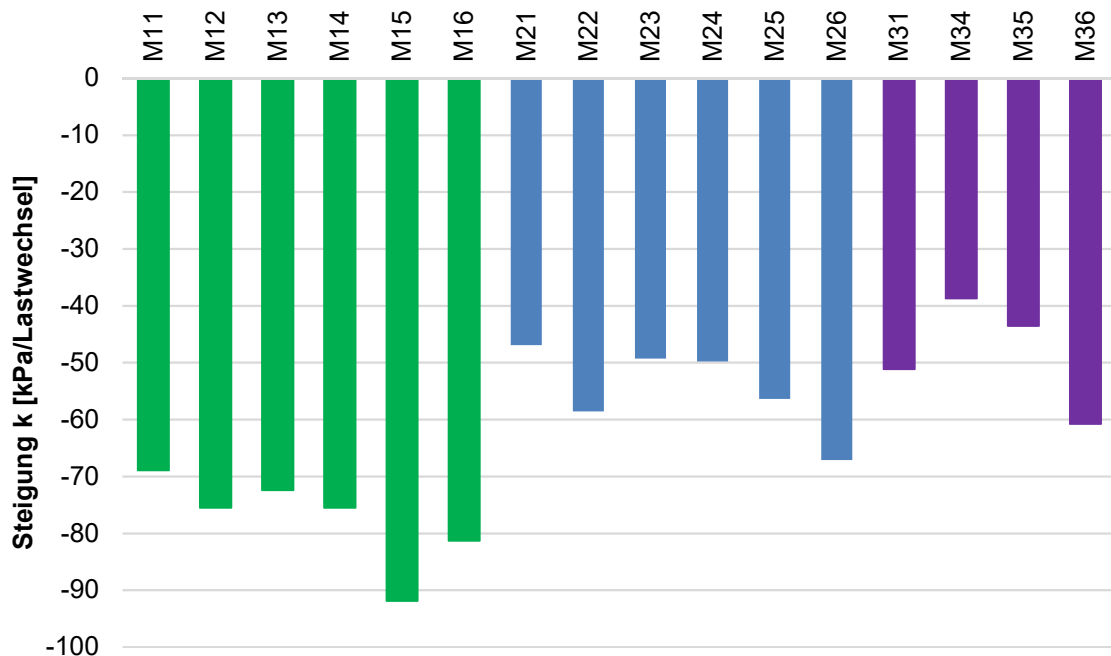


Abbildung 14: Steigung k der geprüften Mastixsorten

Um auch die rheologischen Einflüsse der unterschiedlichen Mastixsorten im weiteren Verlauf untersuchen zu können, wurde aus den Beträgen des komplexen Schubmoduls am

Beginn der einzelnen Prüfungen einer Mastixsorte in einem Mittelwert  $|G^*|_{\text{initial}}$  zusammengefasst. Dasselbe wurde auch für den anfänglichen Phasenwinkel appeziert. In Abbildung 15 sind die entsprechenden Mittelwerte für die geprüften Mastixsorten zusammengefasst. Die vollen Balken im Diagramm entsprechen dem Mittelwert  $|G^*|_{\text{initial}}$ , die karierten dem Mittelwert  $\delta_{\text{initial}}$ .

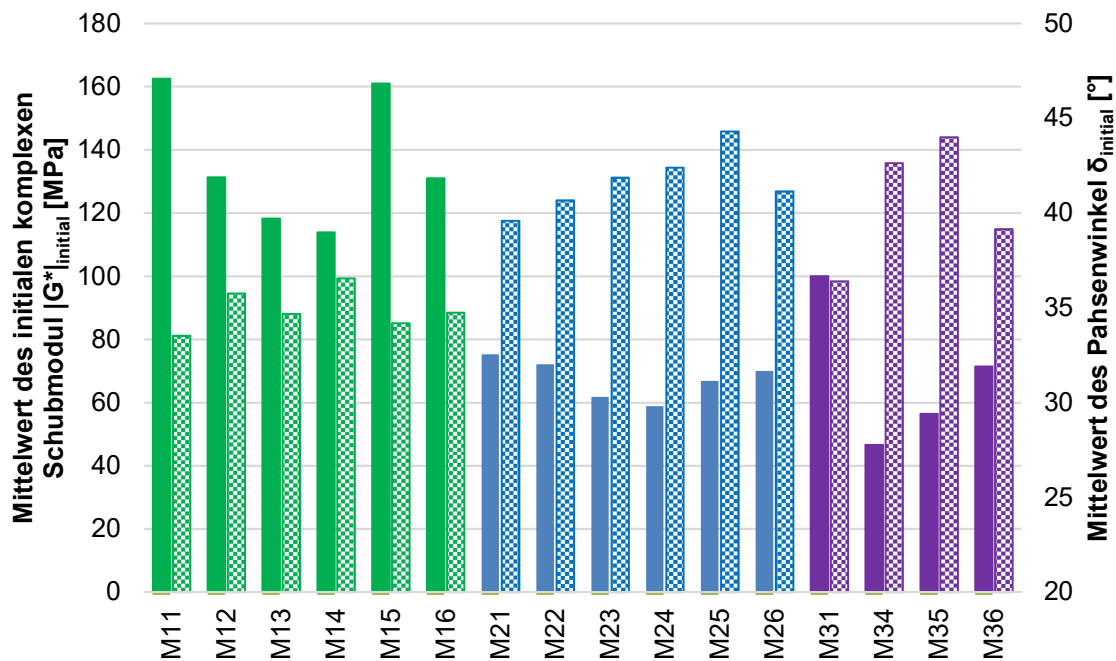


Abbildung 15:  $|G^*|_{\text{initial}}$  und  $\delta_{\text{initial}}$  der geprüften Mastixsorten

Die Mastixsorten mit dem nicht modifizierten Bitumen 70/100 (grüne Balken) weisen deutlich größere Steifigkeiten als die Mastixsorten mit dem polymermodifizierten Bitumen 45/80-65 (blaue Balken) bzw. 45/80-75 (violette Balken) auf. Im Gegensatz dazu ist der Phasenwinkel  $\delta_{\text{initial}}$  für die Mastixsorten mit dem nicht modifizierten Bitumen 70/100 (grüne Balken) geringfügig kleiner als bei den Mastixsorten mit dem polymermodifizierten Bitumen 45/80-65 (blaue Balken) bzw. 45/80-75 (violette Balken).

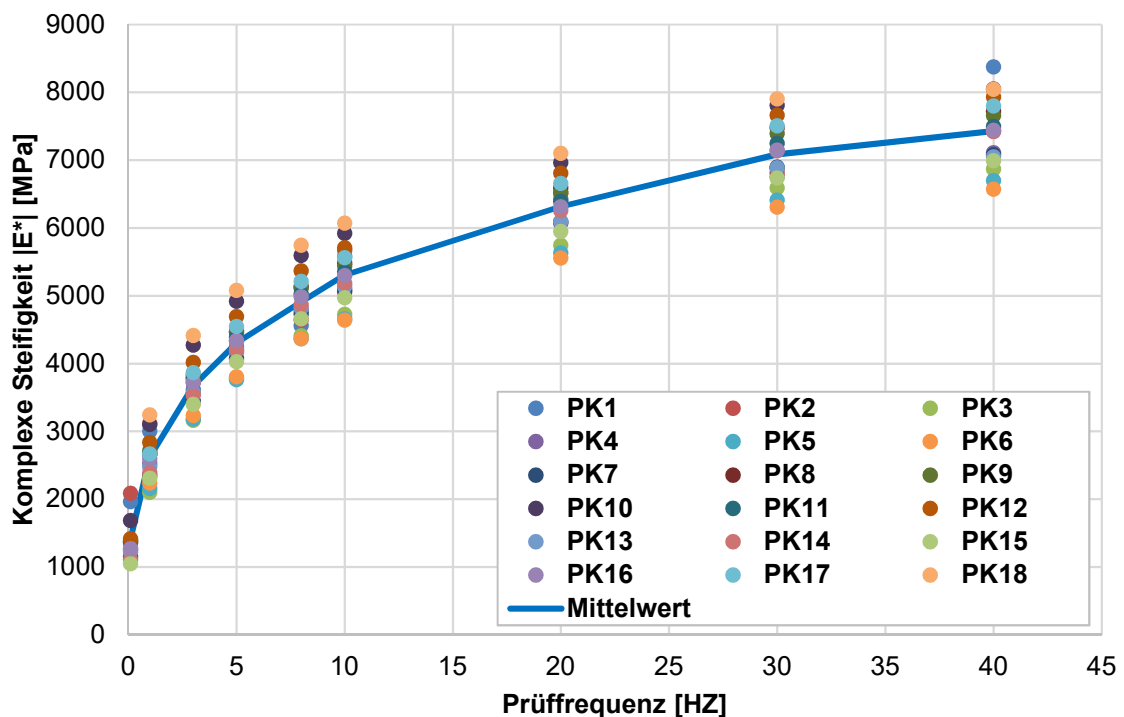
## 6.2 Steifigkeitsprüfungen an Asphalt

Die Steifigkeitsprüfungen wurden gemäß EN 12697-26 [31], Anhang B (4PB) durchgeführt. Mittels einer periodischen und dehnungsgesteuerten 4PB-Prüfung wird ein prismatischer Probekörper durch eine horizontale Auslenkung bei rotationsfreien Belastungs- und Reaktionspunkten beansprucht. Mittels horizontaler Translation der mittigen Lastpunkte wird eine Biegung senkrecht zur Längsachse des Probekörpers erreicht. Die vertikale Lage der beiden Endpunkte bleibt erhalten. Die sinusförmige und periodische Verschiebung um

den horizontalen Nullpunkt erfolgt symmetrisch und bleibt über die Zeit konstant. Die erforderliche Kraft, die nötig ist um die vordefinierte Verformung zu erreichen, wird während der Versuchsdauer aufgezeichnet. Daraus kann der Steifigkeitsmodul berechnet werden. Man erhält als Ergebnis den Betrag der dynamischen Steifigkeit. Während der Prüfung wird die für die Verformung des Probekörpers erforderliche Kraft als Funktion der Zeit gemessen. Daraus wird der Steifigkeitsmodul des Mischguts berechnet. Als Ergebnis erhält man den Betrag der dynamischen Steifigkeit  $|E^*|$  in MPa (siehe Abbildung 16), den elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteil der dynamischen Steifigkeit (siehe Abbildung 17) sowie den Phasenwinkel ( $\delta$ ) (siehe Abbildung 18) in Abhängigkeit der Frequenz. Das zur Berechnung erforderliche Formelwerk ist der gegenständlichen Norm zu entnehmen. Um eine Schädigung des Probekörpers während der Steifigkeitsprüfung zu vermeiden, wird die Dehnung an der Unterseite des Probekörpers mit  $35 \mu\text{m/m}$  begrenzt. Somit kann der Probekörper im Anschluss für die Ermüdungsprüfung gemäß EN 12697-24 [23] verwendet werden. Die Prüfung erfolgt bei einer Temperatur von  $+20^\circ\text{C}$  und bei den in Tabelle 23 angegebenen Prüffrequenzen.

**Tabelle 23: Prüffrequenzen der Steifigkeitsprüfung am 4PB**

Frequenz [Hz]	0,1	1,0	3,0	5,0	8,0	10,0	20,0	30,0	40,0
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------



**Abbildung 16: Verlauf der dynamischen Steifigkeit  $|E^*|$  einer exemplarischen Steifigkeitsprüfung**

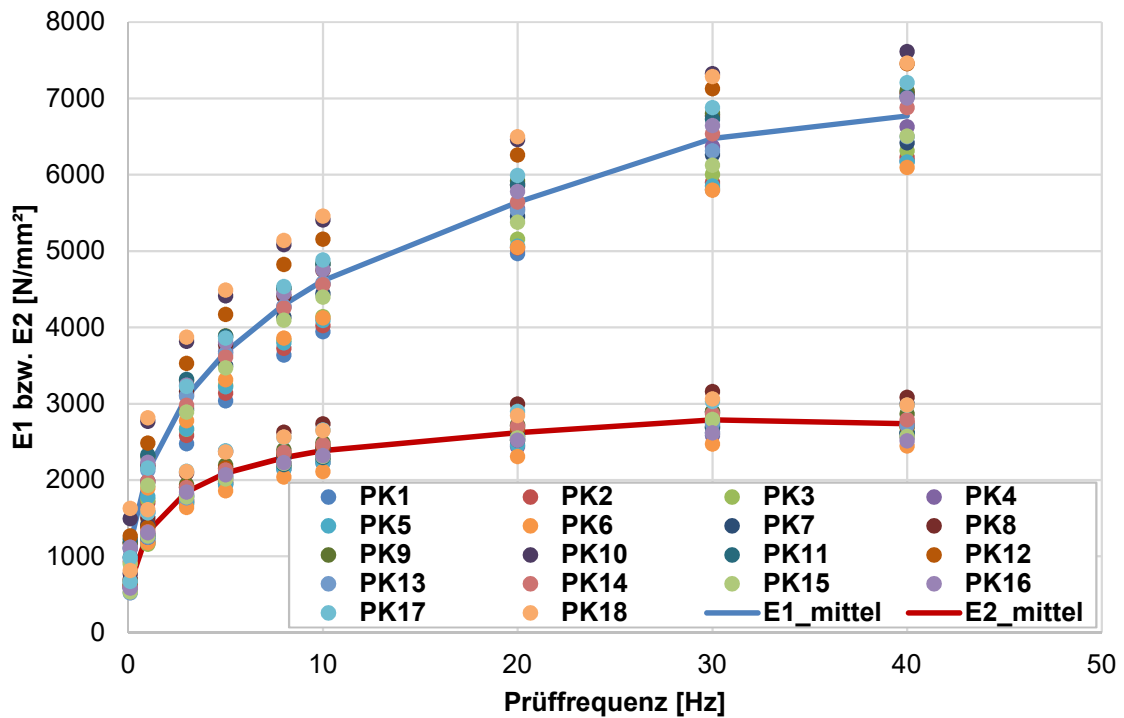


Abbildung 17: Verlauf der elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteile einer exemplarischen Steifigkeitsprüfung

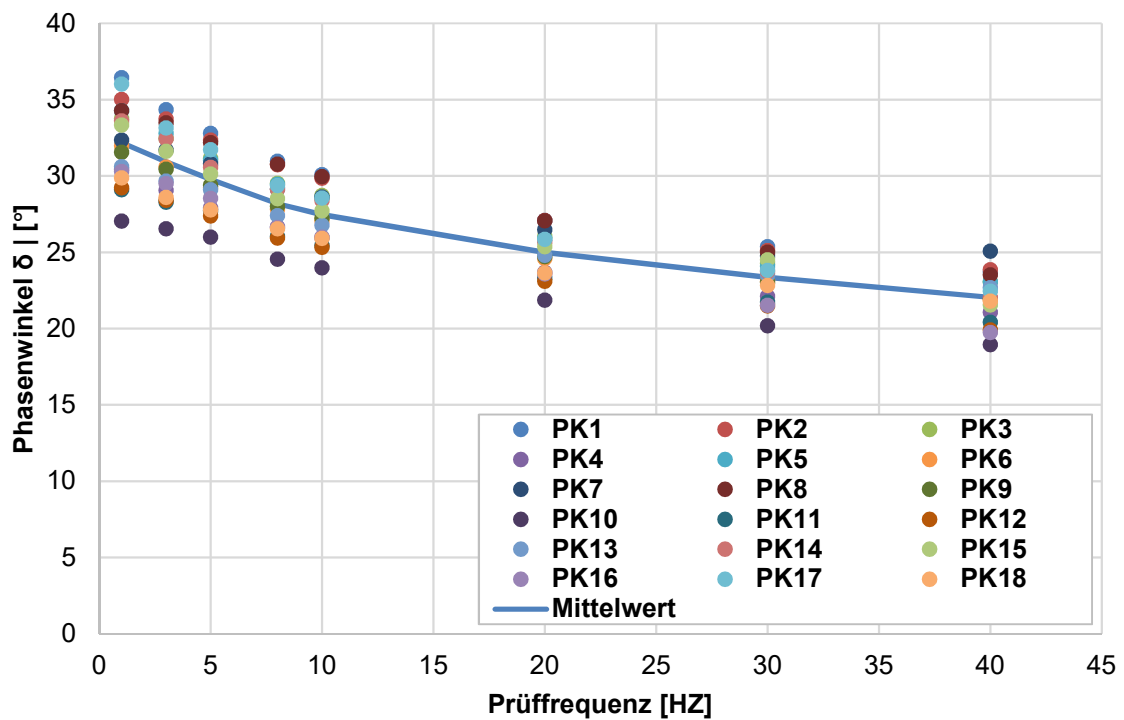


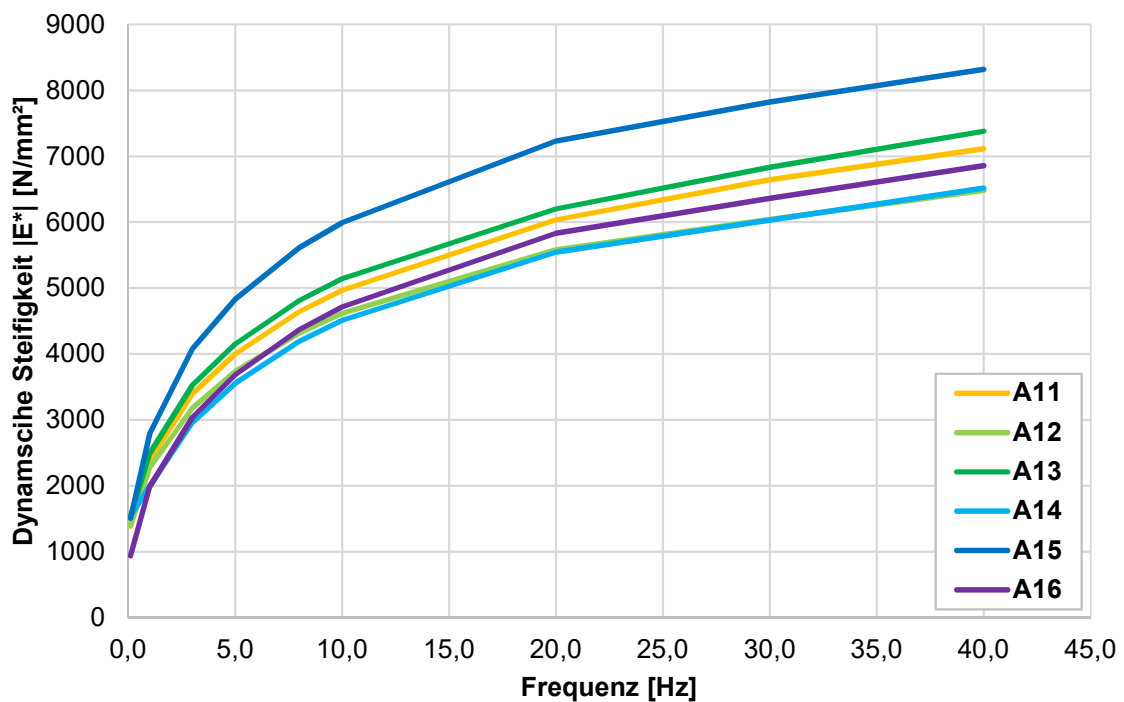
Abbildung 18: Verlauf des Phasenwinkels  $\delta$  einer exemplarische Steifigkeitsprüfung

### 6.2.1 Prüfergebnisse zu den Steifigkeitsprüfungen an Asphalt

Die Prüfungen zur Ermittlung der Steifigkeiten der Asphaltprobekörper erfolgte jeweils vor den Ermüdungsprüfungen am 4PB. Im Rahmen dieser Studie wurden aus den in Kapitel 4 beschriebenen Materialien 6 verschiedene Asphaltmischgüter hergestellt und mittels 4PB getestet. In Tabelle 24 sind die einzelnen Asphaltartensorten und die dafür verwendeten Materialien zusammengefasst.

**Tabelle 24: Asphaltmischgüter**

Asphalt	Bitumen	Zugesetzter Füller 0/0,063	Zugesetzter Füller 0,063/0,125	Korn 0/2	Korn 2/4	Korn 4/8	Korn 8/11
<b>A11</b>	B01 (70/100)	Granitporphyr	Granitporphyr	G01	G02	G03	G04
<b>A12</b>	B01 (70/100)	Granit	Granit	G01	G02	G03	G04
<b>A13</b>	B01 (70/100)	Basalt	Basalt	G01	G02	G03	G04
<b>A14</b>	B01 (70/100)	Kalk	Kalk	G01	G02	G03	G04
<b>A15</b>	B01 (70/100)	Kalkhydrat	Kalkhydrat	G01	G02	G03	G04
<b>A16</b>	B01 (70/100)	Quarz	Quarz	G01	G02	G03	G04



**Abbildung 19: Steifigkeiten |E\*| der geprüften Asphaltmischungen**

Aufgrund der geringen Amplitude von 35  $\mu\text{m/m}$  wird der Probekörper nicht beschädigt. Die Prüfungen erfolgen wie auch die Ermüdungsprüfung bei +20°C. Die dabei ermittelte mittlere Steifigkeit bei den Prüffrequenzen 0,1; 1; 3; 5; 8; 10; 20; 30 und 40 Hz sind in Abbildung 19 zusammengefasst. Die höchste Steifigkeit bei den geprüften Frequenzen hat das Asphaltmischgut A15. Die geringste Steifigkeit haben die Mischgüter A12 und A14. In Abbildung 20 sind die mittleren Phasenwinkel dargestellt. In Tabelle 25 sind repräsentativ alle Werte für eine Frequenz von 8 Hertz zusammengefasst.

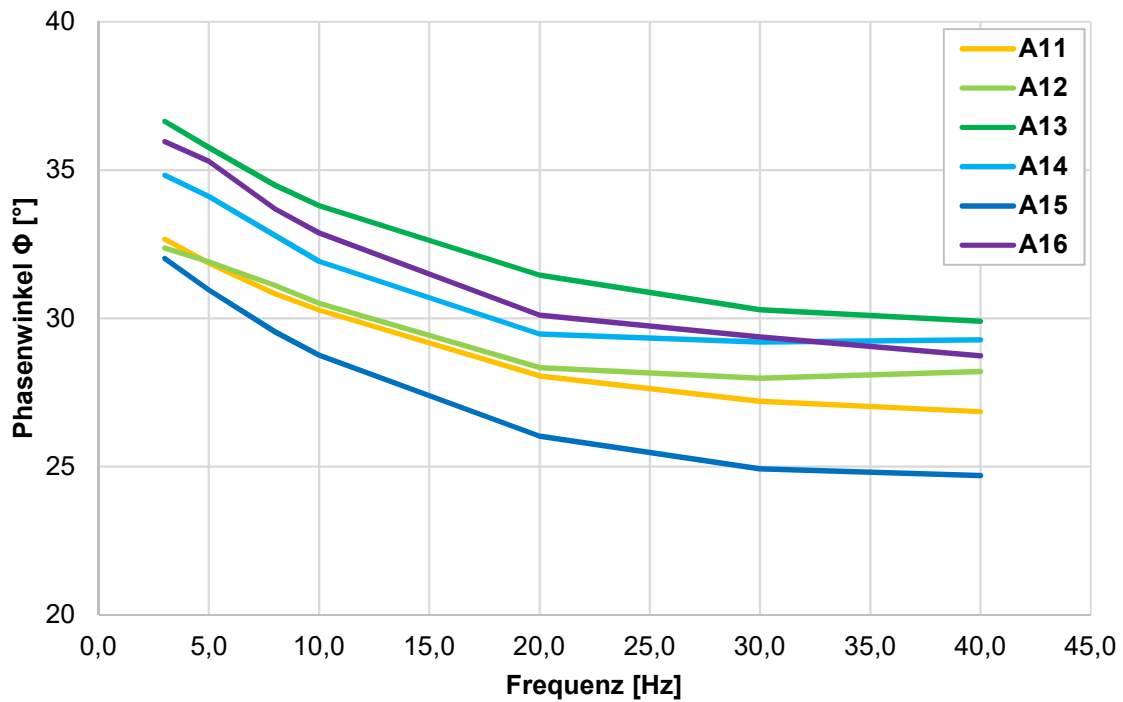


Abbildung 20: Phasenwinkel  $\Phi$  der geprüften Asphaltmischungen

Tabelle 25: Ergebnisse der Steifigkeitsprüfungen bei 8 Hz der geprüften Asphaltmischungen

Asphalt	$ E^* $ [MPa]	E1 [N/mm <sup>2</sup> ]	E2 [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Phi$ [°]
A11	4644,7	3990,4	2376,8	30,8
A12	4320,1	3700,2	2232,0	31,1
A13	4810,3	3959,5	2729,1	34,5
A14	4191,1	3522,4	2264,6	32,8
A15	5614,3	4887,4	2755,7	29,6
A16	4371,4	3637,2	2416,6	33,7

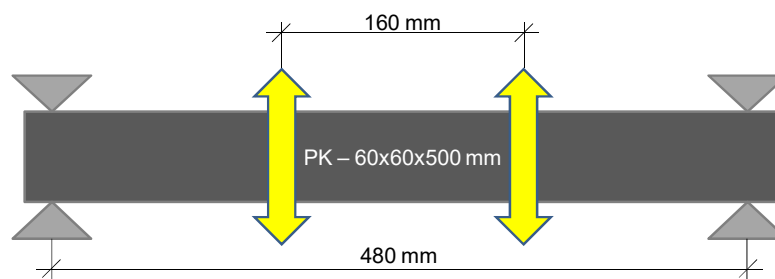


### 6.3 Ermüdungsprüfungen an Asphalt

Das europäische Komitee für Normung standardisierte mit der EN 12697-24 [23] unterschiedliche Verfahren zur Charakterisierung der Ermüdungsfestigkeit von Asphalt durch die Biegeprüfungen oder die Prüfung der direkten sowie der indirekten Zugfestigkeit. All diese Prüfungen werden unter kontrollierter Belastung und unterschiedlichen Probekörpertypen sowie Auflagerungen an verdichtetem Asphalt durchgeführt. Das Verfahren dient somit für Asphalt gemäß EN 12697-24 [23]:

- zur Einstufung von Asphalt nach Ermüdungsbeständigkeit;
- zur Bestimmung des relativen Leistungsvermögens der Fahrbahnbefestigung;
- zur Abschätzung des Tragverhaltens;
- zur Beurteilung festgelegter Asphaltanforderungen.

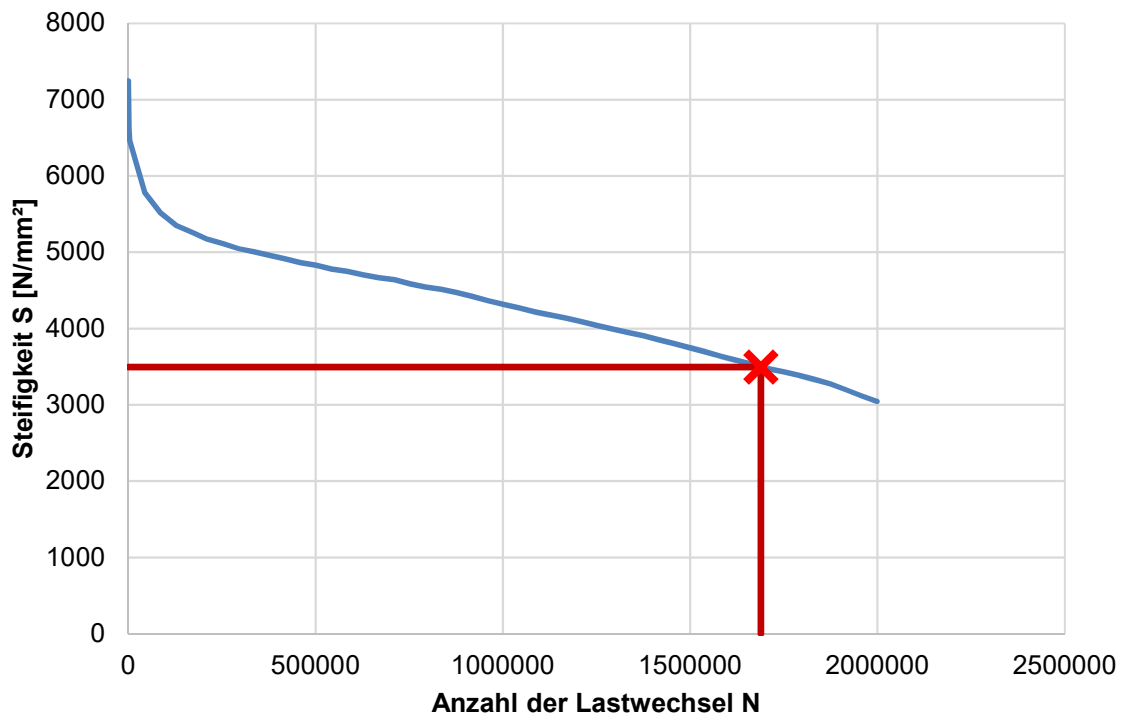
In Österreich wird die Ermüdungsfestigkeit von Asphalt mittels 4PB-Prüfung gemäß EN 12697-24 [23], Anhang D bestimmt. In Abbildung 21 ist der prismatische Probekörper schematisch dargestellt. Dieser hat eine Länge von 500 mm und eine Querschnittsfläche von 50 x 50 mm. Die äußeren Klemmen haben einen Abstand von 480 mm und die inneren Klemmen haben einen Abstand von 160 mm zueinander.



**Abbildung 21: Schematische Darstellung 4PB.**

Das Hauptaugenmerk bei der Ermüdungsprüfung liegt bei der Anzahl an Lastwechsel, bis der Probekörper das Ermüdungskriterium erreicht hat. Das Kriterium ist erfüllt, wenn der Betrag des komplexen Steifigkeitsmodul die Hälfte des Ausgangswertes erreicht hat. Der Ausgangswert, auch  $S_{\max,0}$ , ist als Betrag der komplexen Steifigkeit nach 100 Lastwechsel definiert. Jene Anzahl an Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriterium wird als  $N_{f/50}$  bezeichnet. Die Prüfungen werden bei  $+20^{\circ}\text{C}$  und 30 Hz durchgeführt. In Abbildung 22 ist ein exemplarischer Verlauf einer Einzelprüfung dargestellt. Der Schnittpunkt markiert jene Stelle, wo das Ermüdungskriterium erreicht wurde, also der Betrag der dynamischen Steifigkeit die Hälfte von  $S_{\max,0}$  erreicht hat. Somit kann die Anzahl der Lastwechsel  $N_{f/50}$  auf

der X-Achse abgelesen werden. Für eine vollständige Prüfung werden je 6 Probekörper bei 3 unterschiedlichen Dehnungsstufen geprüft. Die Dehnungsstufe gibt dabei die maximale horizontale Dehnung an der Unterseite des Probekörpers an. Es sollte darauf geachtet werden, dass das Ermüdungskriterium im Bereich zwischen  $10^4$  und  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel erreicht wird.



**Abbildung 22: Einzelprüfungen eines Asphaltprobekörpers mit Ermüdungspunkt**

Anhand der 18 Prüfergebnisse kann eine Wöhlerkurve konstruiert werden. Dadurch kann der durch die Norm definierte Festigkeitswert  $\epsilon_6$  berechnet werden. Dieser Wert widerspiegelt jene Dehnungsamplitude, die notwendig ist, um eine Million Lastwechsel bis zum Erreichen des Ermüdungskriterium benötigt wird. In Abbildung 23 ist eine exemplarische Wöhlerkurve und die abgeleiteten Kennwerte dargestellt. Im gegenständlichen Projekt wurden 6 verschiedene Asphaltmischungen getestet. Aus ressourcentechnischen und projekttechnischen Gründen wurde der Prüfumfang bei 5 getesteten Asphaltmischgütern von 18 Probekörpern auf 12 Probekörper reduziert. Bei einem Mischgut konnten aus Gründen begrenzten Materials nur 6 von 18 Probekörper getestet werden.

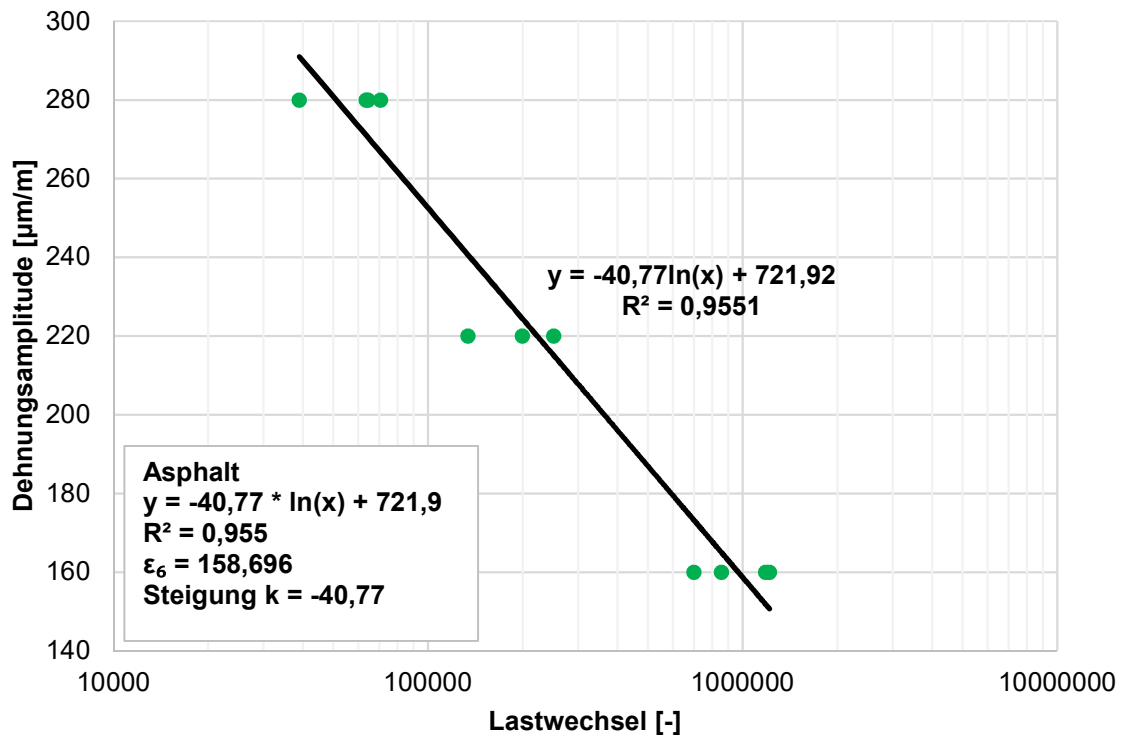


Abbildung 23: Exemplarische Wöhlerkurve einer Asphaltmischung

### 6.3.1 Prüfergebnisse zu den Ermüdungsprüfungen an Asphalt

Das Versagenskriterium bei einem Probekörper im Rahmen der Ermüdungsprüfung ist erfüllt, wenn die Steifigkeit die Hälfte der Anfangssteifigkeit  $S_{\max,0}$  (Steifigkeit nach 100 Lastwechsel) erreicht hat. Die bis dahin gezählten Lastwechsel beschreiben die Ermüdungsfestigkeit eines einzelnen Probekörpers. Die Prüfungen erfolgen bei einer Prüffrequenz von 30 Hz und jedes Mischgut wird bei 3 unterschiedlichen Amplituden (160, 220 und 280  $\mu\text{m/m}$ ) mit jeweils 4 Probekörpern (Ausnahme: Asphalt A12, da nicht ausreichend Füller vorhanden war; bei diesem Mischgut wurden jeweils nur 2 Probekörper je Amplitude geprüft) und einer Prüftemperatur von +20 °C geprüft. Insgesamt wurden 6 verschiedene Asphalte untersucht. Anhand der ermittelten Lastwechselzahl eines jeden Probekörpers lässt sich eine Wöhlerlinie (Ermüdungskurve) für jede Asphaltart konstruieren. Um die unterschiedlichen Mischgüter zu vergleichen, wird gemäß EN 12697-24 [23] als Beurteilungskriterium für die Ermüdungsprüfung der  $\epsilon_6$ -Wert herangezogen. Anhand der Wöhlerkurve kann der  $\epsilon_6$ -Wert ermittelt werden. Er entspricht der notwendigen Amplitude, um ein Versagen bei  $10^6$  Lastwechsel zu erreichen. In Abbildung 24 sind die Ermüdungskurven der 6 untersuchten Asphalte dargestellt.

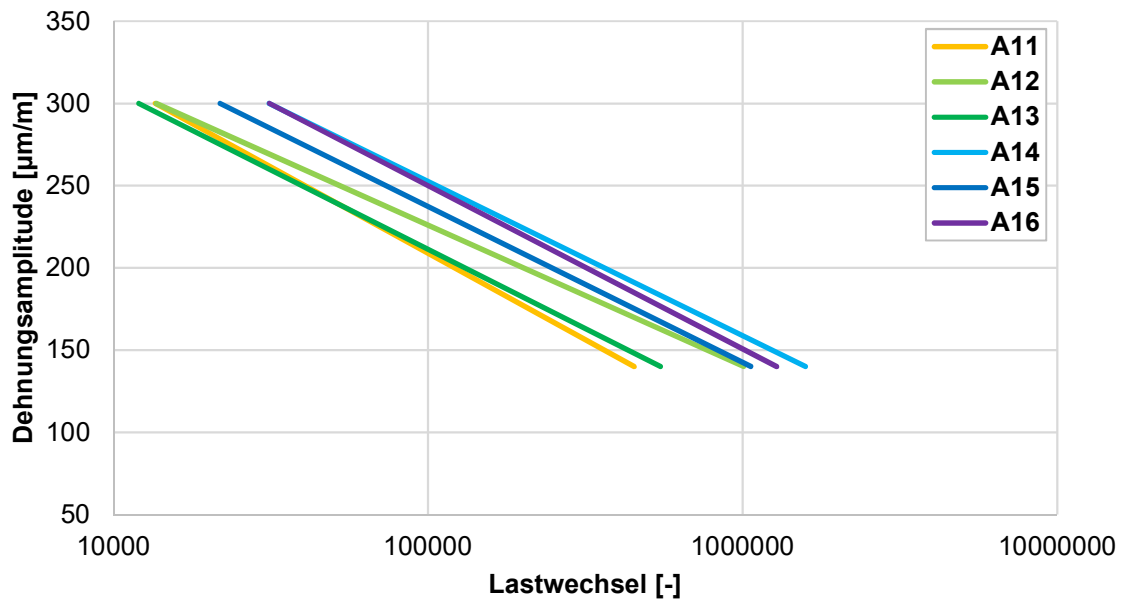


Abbildung 24: Wöhlerkurven der geprüften Asphaltmischungen

Aus Abbildung 24 wird ersichtlich, dass alle Asphaltmischungen nahezu die gleiche Steigung haben. Größter Ausreiser dabei ist der Asphalt A12. Ursache dafür könnte der eingeschränkte Prüfumfang bei dieser Probe sein. Die nahezu gleiche Steigung resultiert aus der Verwendung desselben Bitumen B1 (70/100) sowie derselben Sieblinie bzw. Gesteinscharge für die Fraktionen größer 0,125mm für alle Mischgüter. In Tabelle 26 sind die detaillierten Ergebnisse zu den unterschiedlichen Asphaltmischungen angegeben (Die Werte für die Steifigkeit  $S_{\max,0}$  (S) und Phasenwinkel ( $\Phi$ ) entsprechen dem Mittelwert aller geprüften Probekörper einer Asphaltsorte).

Tabelle 26: Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen der geprüften Asphaltmischungen

Asphalt	$\epsilon_6$ [µm/m]	$R^2$ [-]	Steigung k [-]	S [MPa]	$\Phi$ [°]
A11	103,71	0,94	-45,66	5857,22	29,88
A12	140,27	0,97	-37,22	5167,00	30,52
A13	114,72	0,93	-41,92	5572,92	31,84
A14	158,70	0,96	-40,77	5615,64	30,88
A15	142,43	0,94	-41,20	7002,50	28,57
A16	150,68	0,95	-43,12	6060,82	30,27

Aus den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die Proben A14, A15 und A16 hohe Ermüdungsfestigkeiten ( $\epsilon_6$ ) aufweisen. Auch das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ist mit Werten größer 0,9 für alle Ermüdungskurven sehr gut. Neben den Ermüdungseigenschaften

werden auch geometrische Kenngrößen der Asphaltmischgüter ermittelt. In Tabelle 28 sind die Mittelwerte der einzelnen Probekörper je Mischgutsorte zusammengefasst. Der Grund für die unterschiedlichen Hohlraumgehalte liegt neben den messtechnischen Ungenauigkeiten in der Tatsache, dass die Einwaage nach der erforderlichen Masse erfolgt (Massenbezogen und nicht Volumenbezogen), und somit bei leichten Füllern zu einem geringeren Hohlraumgehalt führt, da er mehr Volumen einnimmt als ein schwerer Füller.

**Tabelle 27: Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen der geprüften Asphaltmischungen**

Asphalt	Raumdichte [t/m <sup>3</sup> ]	Hohlraumgehalt [%]
A11	2,48	4,4
A12	2,46	5,3
A13	2,47	5,8
A14	2,49	2,5
A15	2,50	2,8
A16	2,51	2,9

## 7 ANALYSE DER PRÜFERGEBNISSE

### 7.1 Auswirkung der Füllermorphologie auf die Asphaltmastix

Im folgenden Kapitel werden die ermittelten Füllerparameter mit der Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix korreliert. Als Kennwert wird der Wert  $\tau_6$  verwendet, um die Unterschiede in Bezug auf die Ermüdungsbeständigkeit der einzelnen Mastixmischungen zu charakterisieren. Da für die Füllermischung bis zu drei unterschiedlichen Bitumen verwendet wurden, wird aufgrund der verwendeten Analysemethoden der Zusammenhang für jede Bitumensorte getrennt betrachtet.

#### 7.1.1 Auswirkung der Reindichte

In Abbildung 25 ist der Zusammenhang der Reindichte und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix dargestellt. Dafür wurde ein einfaches lineares Regressionsmodell verwendet. Die grünen Punkte bzw. Linie sind die Korrelationspunkte bzw. -linie zu den Mastixmischungen mit dem unmodifiziertem Bitumen 70/100. Gleichmaßen gehören die blauen Datenpunkte/Linie bzw. violetten Datenpunkte/Linie zu den Mastixmischungen mit dem modifiziertem Bitumen PmB 45/80-65 bzw. PmB 45/80-75. Der Grafik nach haben die Ermüdungsfestigkeiten  $\tau_6$  und die Reindichte der unterschiedlichen Füllermischungen bei keiner der verwendeten Bitumensorten einen Zusammenhang.

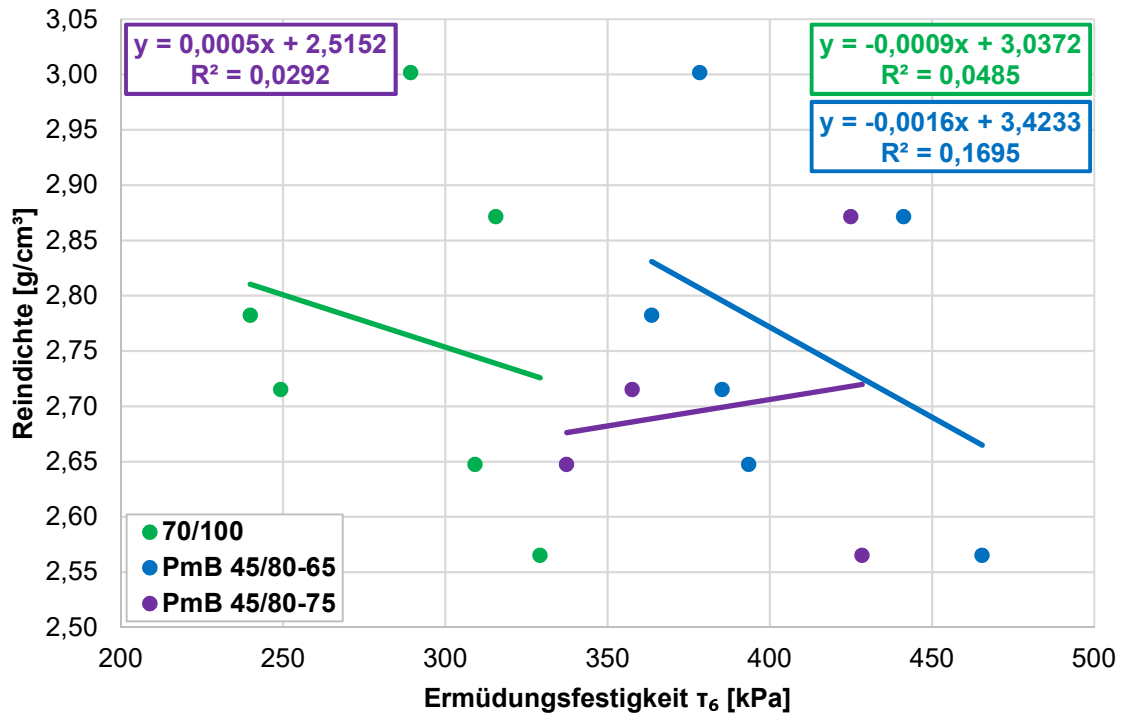


Abbildung 25: Zusammenhang der Reindichte und der Ermüdungsfestigkeit

### 7.1.2 Auswirkung der sieblinienverwandten Kennwerte

In Tabelle 28 sind die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der einfachen linearen Regressionsanalysen zwischen den sieblinienverwandten Kennwerten der Füllermischungen und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zusammengefasst.

Tabelle 28: Zusammenhang der sieblinienverwandten Kennwerte und der Ermüdungsfestigkeit ausgedrückt durch  $R^2$

	B1 (70/100)	B2 (PmB 45/80-65)	B3 (PmB 45/80-75)
Siebdurchgang 0,002mm [M%]	0,08	0,06	0,47
Siebdurchgang 0,016mm [M%]	0,04	0,04	0,48
Siebdurchgang 0,063mm [M%]	0,25	0,11	0,72
Sieblinienkennwerte d10 [-]	0,01	0,02	0,35
Sieblinienkennwerte d30 [-]	0,03	0,04	0,43
Sieblinienkennwerte d60 [-]	0,05	0,03	0,55
Sieblinienkennwerte Cc [-]	0,00	0,06	0,29
Sieblinienkennwerte Cu [-]	0,04	0,01	0,57

Aus Tabelle 28 lässt sich ableiten, dass zwischen den sieblinienverwandten Kennwerten der Füllermischungen und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix kein Zusammenhang besteht. Die Mastixmischungen mit dem Bitumen B3 haben zwar in den Analysen ein hohes Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , dies ist jedoch der geringen Stichprobe verschuldet, da nur 4 Mastixmischungen mit dem Bitumen B3 untersucht wurden.

### 7.1.3 Auswirkung der BET-Oberfläche

In Abbildung 26 ist der Zusammenhang der BET-Oberfläche der untersuchten Füllermischungen und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix dargestellt. Es wurde ein einfaches lineares Regressionsmodell verwendet. Die grünen Punkte bzw. Linie sind die Korrelationspunkte bzw. -linie zu den Mastixmischungen mit dem unmodifiziertem Bitumen 70/100. Gleichermäßen gehören die blauen Datenpunkte/Linie bzw. violetten Datenpunkte/Linie zu der Mastixmischungen mit dem modifiziertem Bitumen PmB 45/80-65 bzw. PmB 45/80-75. Man erkennt, dass bei den Mastixmischungen mit den Bitumensorten B1 und B2 es einen klaren Ausreißer gibt. Es handelt sich hierbei um Mastixmischungen mit dem Füller F03. Er sticht durch eine sehr hohe spezifische Oberfläche heraus.

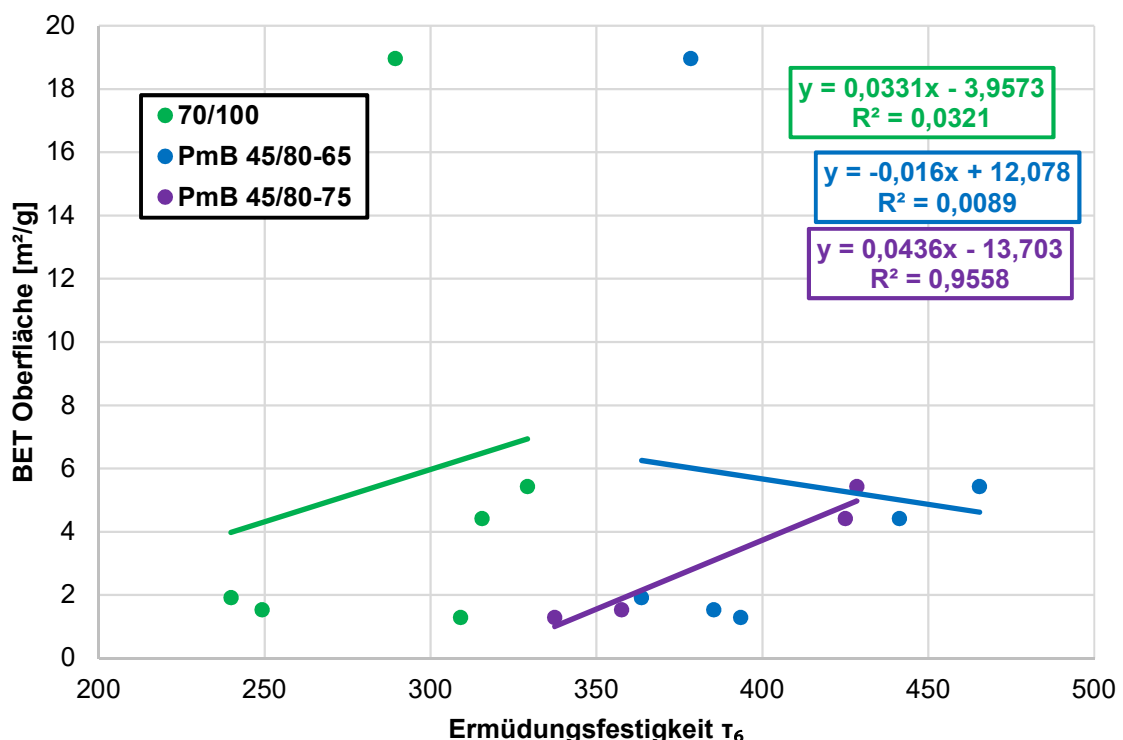


Abbildung 26: Zusammenhang der BET-Oberfläche und der Ermüdungsfestigkeit inkl. Ausreißer

In Abbildung 27 ist der Zusammenhang der BET-Oberfläche der untersuchten Füllermischungen und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix ohne den Mastixmischungen M13 und M23 dargestellt. Es lässt sich ein Zusammenhang erkennen, mit teils hohem Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Jedoch zeigt dies, dass die spezifische Oberfläche kein optimaler Parameter zur Charakterisierung der Füllerqualität in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix ist, da durch Ausreißer wie F03 (durch Nachmessung bestätigter hoher Wert für die BET-Oberfläche) zu unzuverlässigen Ergebnissen führen kann.

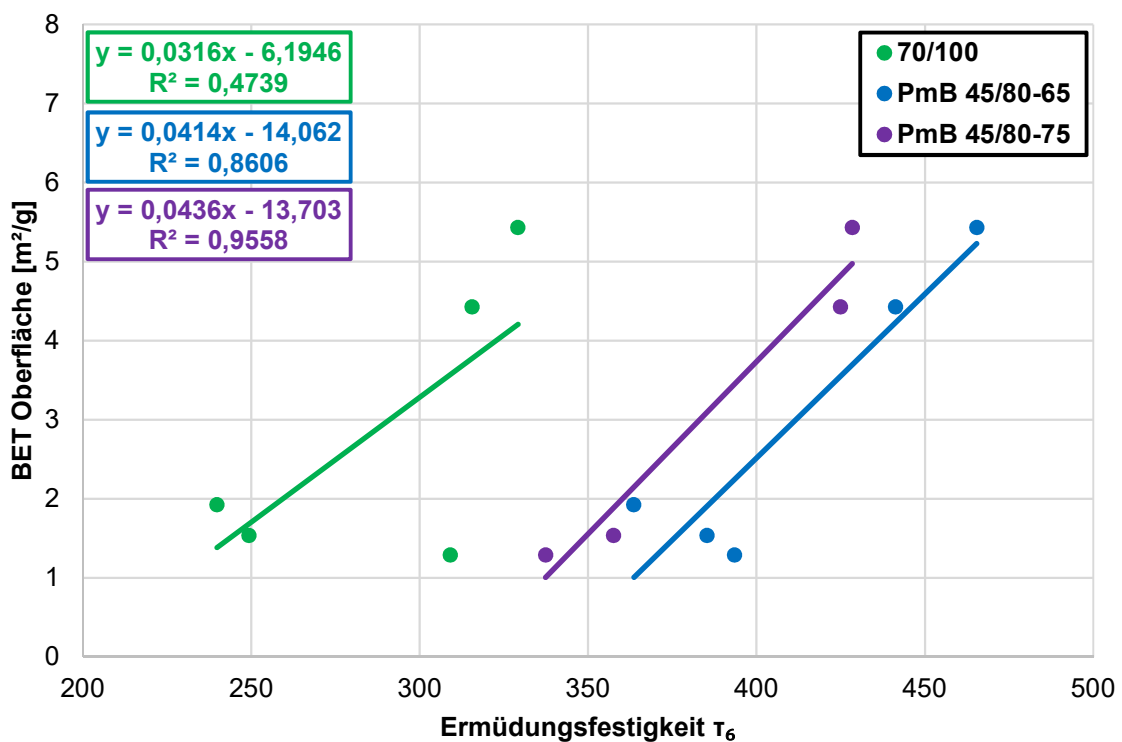


Abbildung 27: Zusammenhang der BET-Oberfläche und der Ermüdungsfestigkeit ohne Ausreißer

#### 7.1.4 Auswirkung der Kornform

In Tabelle 29 sind die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der einfachen linearen Regressionsanalysen zwischen den kornformverwandten Kennwerten der Füllermischungen und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zusammengefasst. Korreliert wurden dabei die in Abschnitt 0 beschriebenen Kornformparameter zufolge dynamischer Bildanalyse. Daraus lässt sich ableiten, dass sich allein durch die Kornform die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix nicht abschätzen lässt.

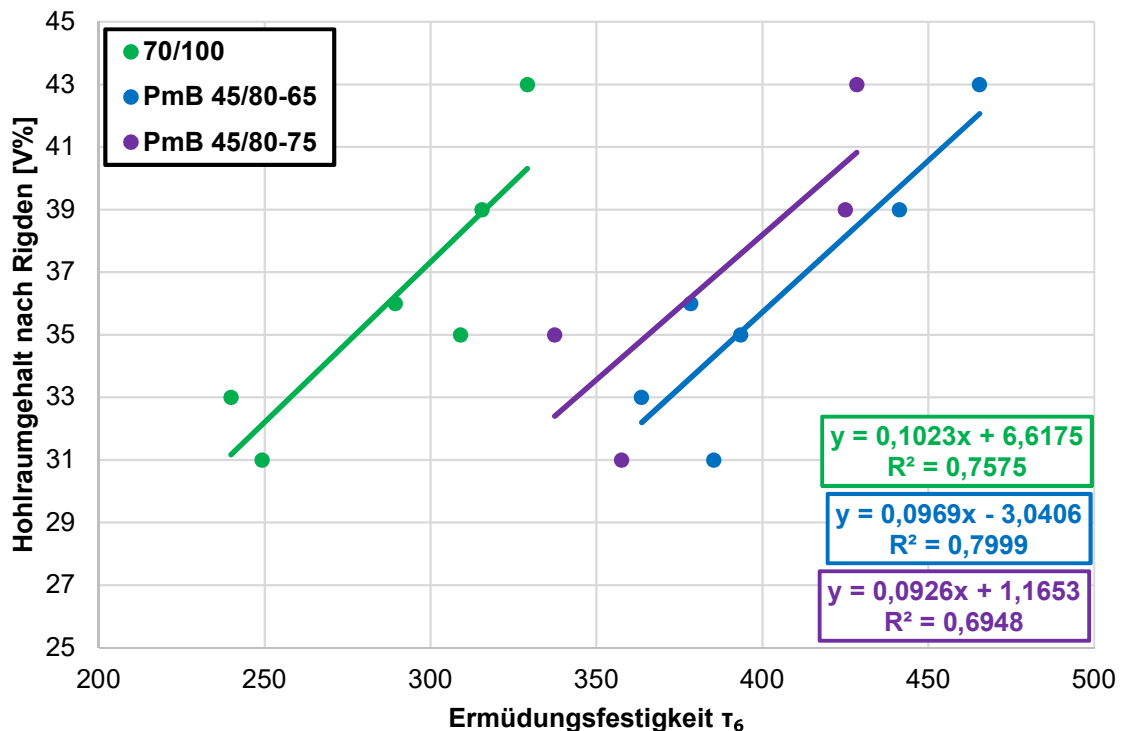


**Tabelle 29: Zusammenhang der Kornform des Füllers und der Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix ausgedrückt durch R<sup>2</sup>**

	B1 (70/100)	B2 (45/80-65)	B3 (45/80-75)
Äquivalenter Kreisflächendurchmesser	0,00	0,14	0,01
Äquivalenter Kreisumfangsdurchmesser	0,02	0,01	0,01
Länge L	0,01	0,28	0,08
Breite W	0,01	0,04	0,01
Feret-Aspekt-Verhältnis	0,05	0,00	0,01
Kreisförmigkeit	0,05	0,00	0,01
Elliptizität	0,04	0,01	0,00
Rechteckigkeit	0,09	0,00	0,01

### 7.1.5 Auswirkung des Hohlraumgehalts des trocken verdichteten Füllers

In Abbildung 28 ist der Zusammenhang des Hohlraumgehalts des trocken verdichteten Füllers und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix dargestellt.



**Abbildung 28: Zusammenhang des Hohlraumgehalts des trocken verdichteten Füllers und der Ermüdungsfestigkeit**

Für die Regressionsanalyse wurde ein einfaches lineares Korrelationsmodell verwendet. Die grünen Punkte bzw. Linie sind die Korrelationspunkte bzw. -linie zu den Mastixmischungen mit dem unmodifiziertem Bitumen 70/100. Gleichmaßen gehören die blauen Datenpunkte/Linie bzw. violetten Datenpunkte/Linie zu der Mastixmischungen mit dem modifiziertem Bitumen PmB 45/80-65 bzw. PmB 45/80-75. Die hohen Bestimmtheitsmaße  $R^2$  der untersuchten Mastixmischungen, differenziert nach den verwendeten Bitumen, lassen den Schluss zu, dass sich zufolge des Hohlraumgehalts des trocken verdichteten Füllers (Hohlraumgehalt nach Rigden) die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix abschätzen lässt. Somit eignet sich dieser Parameter, die Füllerqualität in Bezug auf die Ermüdungsbeständigkeit der Asphaltmastix zu charakterisieren. Eine breite Datenbasis muss jedoch aufgebaut werden, um schlüssige Grenzwerte ableiten zu können.

### **7.1.6 Multiple Regressionsanalyse zur Abschätzung der Ermüdungsbeständigkeit der Asphaltmastix**

In den Kapiteln 7.1.1 bis 7.1.5 wurden einfache lineare Regressionsmodelle verwendet, um Zusammenhänge zwischen den Füllereigenschaften und den Ermüdungsfestigkeiten  $\tau_6$  der Asphaltmastix zu studieren. Um eine eventuelle Abhängigkeit mehrerer unabhängigen Füller- und Mastixparameter auf die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zu analysieren, wurde ein multiples lineares Regressionsmodell verwendet. Wie auch schon in den Kapiteln zuvor, werden die Bitumen getrennt voneinander getrennt betrachtet, wobei das Bitumen B3 (PmB 45/80-75) vernachlässigt wird, da aus einem Stichprobenumfang von nur 4 Proben keine plausiblen Ergebnisse ableitbar sind.

Zuerst werden die Mastixproben mit dem Bitumen B1 (70/100) untersucht. In Tabelle 30 sind die Zusammenhänge zwischen Mastixparametern, der Reindichte, dem Hohlraumgehalt des trocken verdichteten Füllers (Hohlraumgehalt nach Rigden), BET-Oberfläche und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zusammengefasst. Als Beurteilungskriterium für die Abhängigkeit dieser Parameter wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  herangezogen.

**Tabelle 30: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen Mastixparameter und Eigenschaften der Füllermischung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix mit dem Bitumen B1**

	$ G^* _{\text{initial}}$	$\delta_{\text{initial}}$	k	$\rho$	R.-V%	BET
$ G^* _{\text{initial}}$	0,50	0,78	0,54	0,50	0,76	0,61
$\delta_{\text{initial}}$	-	0,78	0,90	0,89	0,83	0,78
k	-	-	0,16	0,21	0,76	0,24
$\rho$	-	-	-	0,05	0,76	0,27
R.-V%	-	-	-	-	0,76	0,76
BET	-	-	-	-	-	0,03

In Tabelle 31 sind die Zusammenhänge zwischen Mastixparametern, sieblinienverwandten Parameter und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zusammengefasst.

**Tabelle 31: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen Mastixparameter und Sieblinienkennwerte der Füllermischung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix mit dem Bitumen B1**

	0,002	0,016	0,063	d10	d30	d60	Cc	Cu
$ G^* _{\text{initial}}$	0,67	0,65	0,83	0,58	0,62	0,70	0,53	0,71
$\delta_{\text{initial}}$	0,99	0,97	0,93	1,00	0,99	0,97	0,95	0,85
k	0,17	0,17	0,33	0,22	0,17	0,17	0,18	0,22
$\rho$	0,08	0,06	0,26	0,06	0,05	0,07	0,06	0,09

In Tabelle 32 sind die Zusammenhänge zwischen Mastixparametern, kornformverwandten Parameter und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zusammengefasst.

**Tabelle 32: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen Mastixparameter und Kornformkennwerten der Füllermischung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix mit dem Bitumen B1**

	ECAD	ECPD	L	W	FA	C	E	R
$ G^* _{\text{initial}}$	0,51	0,50	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,52
$\delta_{\text{initial}}$	0,89	0,90	0,86	0,91	0,86	0,87	0,85	0,82
k	0,42	0,63	0,24	0,60	0,47	0,55	0,48	0,53
$\rho$	0,13	0,21	0,06	0,18	0,16	0,19	0,17	0,22

Die multiplen linearen Regressionsanalysen zeigen eine Vielzahl von Zusammenhängen zwischen den betrachteten Parametern und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix. Jedoch muss man jede Abhängigkeit auf ihre Sinnhaftigkeit prüfen. So kann zum Beispiel die hohe Abhängigkeit des initialen Phasenwinkels  $\delta_{\text{initial}}$  (jener Wert zu Beginn einer Ermüdungsprüfung) mit den sieblinienverwandten Parametern nicht als zuverlässiges Kriterium herangezogen werden, da es sich hierbei nur um Initialwerte handelt. In den

Tabelle 33 bis

Tabelle 35 sind die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalysen zu den Mastixproben mit dem Bitumen B2 (PmB 45/80-65) zusammengefasst, äquivalent zu den Analysen der Mastixproben mit dem Bitumen B1.

**Tabelle 33: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen Mastixparameter und Eigenschaften der Füllermischung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix mit dem Bitumen B2**

	$ G^* _{\text{initial}}$	$\delta_{\text{initial}}$	k	$\rho$	R.-V%	BET
$ G^* _{\text{initial}}$	0,08	0,51	0,13	0,24	0,80	0,08
$\delta_{\text{initial}}$	-	0,12	0,16	0,19	0,80	0,14
k	-	-	0,03	0,43	0,81	0,06
$\rho$	-	-	-	0,17	0,85	0,24
R.-V%	-	-	-	-	0,80	0,88
BET	-	-	-	-	-	0,01

**Tabelle 34: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen Mastixparameter und Sieblinienkennwerte der Füllermischung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix mit dem Bitumen B2**

	0,002	0,016	0,063	d10	d30	d60	Cc	Cu
$ G^* _{\text{initial}}$	0,27	0,32	0,38	0,18	0,28	0,28	0,28	0,18
$\delta_{\text{initial}}$	0,12	0,12	0,16	0,15	0,12	0,12	0,13	0,12
k	0,12	0,07	0,13	0,07	0,08	0,06	0,10	0,03
$\rho$	0,17	0,17	0,22	0,26	0,18	0,17	0,17	0,18

**Tabelle 35: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen Mastixparameter und Kornformkennwerten der Füllermischung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix mit dem Bitumen B1**

	ECAD	ECPD	L	W	FA	C	E	R
$ G^* _{\text{initial}}$	0,35	0,21	0,49	0,25	0,21	0,17	0,26	0,17
$\delta_{\text{initial}}$	0,14	0,31	0,28	0,18	0,65	0,70	0,37	0,38
k	0,19	0,05	0,30	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03
$\rho$	0,17	0,22	0,28	0,20	0,20	0,22	0,18	0,19

Betrachtet man die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalysen zu den Zusammenhängen zwischen den betrachteten Parametern und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix, kann man erkennen, dass bei den Mastixmischungen mit dem Bitumen B2 (PmB 45/80-65) nur noch wenige Abhängigkeiten erkennbar sind.

Deshalb werden in weiterer Folge die Ergebnisse der beiden Bitumensorten aus dem Tabelle 30 bis 35 zusammen betrachtet, und diese als Kriterium bewertet. Bei den

Mastixmischungen mit den beiden Bitumensorten zeigt der Mittelwert des Initialwertes des komplexen Schubmoduls  $|G^*|_{\text{initial}}$  und dem Mittelwert des Initialwertes des Phasenverschiebungswinkel  $\delta_{\text{initial}}$  einen Zusammenhang. Diese Abhängigkeit ist jedoch den rheologischen Eigenschaften der Mastix verschuldet, wonach hohe Schubmodule zu kleineren Phasenwinkel führen und umgekehrt. Da es sich zu dem um Initialwerte handelt, wofür keine Ermüdungsprüfung notwendig ist, wird dieser Wert nicht weiter betrachtet, da es sich hierbei um keine aussagekräftige Korrelation handelt. Als nächstes werden die Werte mit den Ergebnissen des Hohlraumgehalt nach Rigden bzw. BET-Oberfläche analysiert. Betrachtet man die ermittelten Bestimmtheitsmaße der einzelnen Korrelationen, so lässt sich erkennen, dass durch eine Kombination mit anderen Parametern es keine deutliche Verbesserung zur Bewertung der Füllerqualität in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix gibt. Daraus folgt, dass es aus wirtschaftlicher Sicht keinen Vorteil bringt, mehrere Messverfahren zu kombinieren, um die Füllerqualität in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zu bewerten.

## 7.2 Auswirkung von Feuchtigkeit auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmastix

Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen von Feuchtigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix betrachtet. Für diese Analyse wurden zwei Herstellungsverfahren entwickelt, welche nachfolgend im Detail erläutert werden.

### 7.2.1 Mastix mit feuchtem Füller

Für die Herstellung einer Mastix mit einer gewünschten Restfeuchte von ca. 5 M.% in der Füllermischung wird diese abgewogen und mit destilliertem Wasser vermischt, sodass ein Füller-Wasser-Gemisch im Verhältnis von 1:1 entsteht. Das mit einem Glasstab homogenisierte Gemisch wird für die Sicherstellung einer optimalen Befeuchtung des gesamten Feinanteils über einen Zeitraum von 24 Stunden bei einer Temperatur von +25°C gelagert. Nach Ablauf der Standzeit wird das Füller-Wasser-Gemisch für die anschließende Trocknung ohne Abdeckung in einen auf +180°C vorgeheizten Ofen gestellt.

In Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die anschließende Verdunstung des Wassers nahezu linear verläuft (siehe Abbildung 29) und es unter den gegebenen Umständen (Füller und Wassermenge, Größe und Öffnungsweite des Metallbehälters) ca. 150 Minuten Trocknungszeit benötigt, um eine Restfeuchte von 10 M.% in dem Füllergemisch zu erreichen. Für ein genaues Erreichen der angestrebten Restfeuchte

wurde jedoch die Restfeuchte nach ca. 120 Minuten über regelmäßiges Wiegen der Probe kontrolliert.

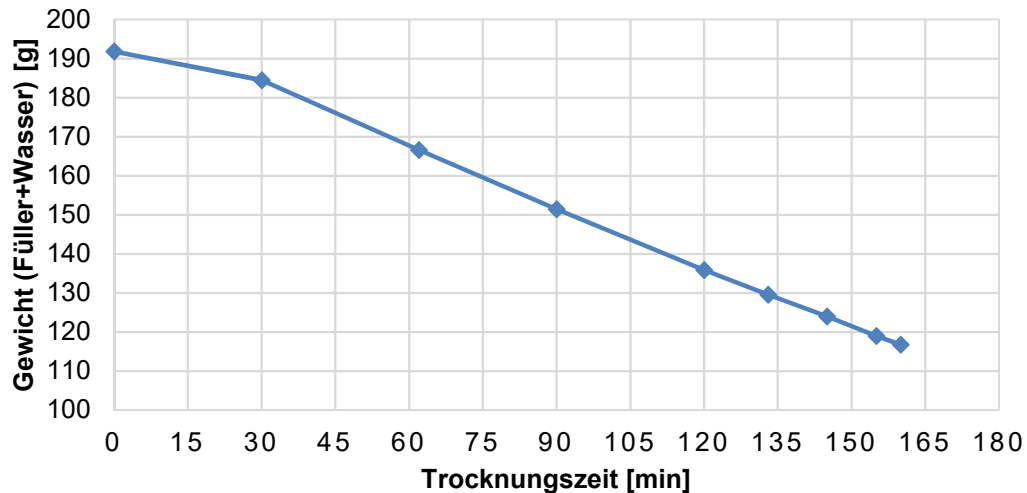


Abbildung 29: Trocknungskurve des durchnässten Füllergemisches

Die im Ofen getrocknete Füllermischung lässt sich nicht ohne weitere Arbeitsschritte mit dem Bitumen zu einer Mastix vermischen, da sich aufgrund der Trocknung eine Masse mit sehr fester Konsistenz bildet. Nach dem Erreichen der angestrebten Restfeuchte von 10 M.% muss das Gemisch mit einem Glasstab zerkleinert werden. Durch das in dieser Zeit weiter verdampfende Wasser sinkt der Wassergehalt der Füllermischung auf ca. 8 M.% ab (ermittelt durch erneute Wägung). Damit die nun für die Vermengung mit dem Bitumen vorbereitete Füllermischung nicht weiter trocknet und abkühlt, muss das für die Mastix benötigte Bitumen in vorangegangenen Arbeitsschritten abgenommen, abgewogen und auf +180°C erhitzt worden sein. Für das Erreichen einer konstanten Temperatur von 180 °C wird das Bindemittel für 10 Minuten in den Ofen gestellt, bevor das Füllergemisch zu dem Bitumen hinzugegeben werden kann. Nach der Zugabe des Feinanteils zu dem Bindemittel wird die Mastix anschließend über einem Heißluftföhn unter Beachtung der einzuhaltenden maximalen Temperatur homogenisiert, sodass anschließend keine Füllerreste zu erkennen sind und jedes Korn der Füllermischung mit dem Bitumen umschlossen ist. Da es bei der Homogenisierung der Mastix zu einem weiteren Verdunsten der im Füller gespeicherten Feuchtigkeit kommt und so der Wassergehalt weiter absinkt, sollte der für die Homogenisierung der Mastix notwendige Zeitaufwand bei der Herstellung aller Mastixproben gleich sein, sodass die Proben einen vergleichbaren Wasseranteil im Füllergemisch aufzeigen sollten. Der nach der Homogenisierung zurückgebliebene Wasseranteil wird auf ca. 5 M.% geschätzt. Mit diesen Proben soll der Einfluss von Wasser

auf die Mastix ausgeforscht werden, welches repräsentativ zu jenem Wasseranteil ist, welches bei der Herstellung von Asphalt in Form von nicht ausreichend getrocknetem Füller in den Asphalt gelangt.

### **7.2.2 Mastix in Wasser gelagert**

Neben der Herstellung von Mastixproben mit Restfeuchte in der Füllermischung wurden auch normale Mastixproben hergestellt, die in einem Wasserbad unter dem Einfluss von Temperatur und Druck über einen Zeitraum von 24 Stunden gelagert wurden. Auf diesem Weg soll der Einfluss von Feuchtigkeit nach der Herstellung einer Mastixprobe gezeigt werden. Dazu werden ca. 30 g der zu prüfenden Mastix mit einem heißen Metallspatel abgenommen und auf 180 °C erhitzt. Die nun zähflüssige Mastix wird in zwölf vorbereitete 25 mm Silikonformen gegossen, sodass in jeder Form eine gleichförmige, ca. 2 g schwere und runde Mastixprobe mit einer glatten Oberfläche entsteht. Die Mastixproben werden nun für die Wasserlagerung in eine Glasschale gelegt, welche anschließend mit destilliertem Wasser gefüllt wird. Diese Glasschale wird in einen Druckbehälter gestellt, welcher dicht verschlossen und auf einen Überdruck von 4,5 bar eingestellt wird. In vorangegangenen Berechnungen und mehreren Testläufen konnte gezeigt werden, dass sich durch die anschließende Temperaturerhöhung auf +60°C der Innendruck des Behälters auf  $5,0 \pm 0,2$  bar erhöht. Der mit den in destilliertem Wasser gelagerten Mastixproben gefüllte und unter Druck gesetzte Druckbehälter wird anschließend in einen auf +60°C vorgeheizten Ofen gestellt. Ist der angestrebte Innendruck von  $5,0 \pm 0,2$  bar erreicht, beginnt die Drucklagerungszeit von 24 Stunden. Nach Ablauf der Zeit kann der Druckbehälter aus dem Ofen genommen werden, der Druck langsam abgelassen werden und die Mastixproben in der weiterhin mit dem destillierten Wasser gefüllten Glasschale abgedeckt und im Kühlschrank gelagert werden. Hintergrund der Drucklagerung bei erhöhter Temperatur ist, dass auf diesem Weg eine deutlich längere Wasserlagerung der Mastixproben unter „normalen Bedingungen“ simuliert werden soll und durch die Beschleunigung dieses Prozesses eine wirtschaftlich vertretbare Prüfzeit erreicht werden kann.

### **7.2.3 Ergebnis**

Die Mastixproben, hergestellt mittels den beiden Methoden aus den vorherigen Kapiteln, wurden gemäß Kapitel 6.1 auf Ermüdung geprüft. In Abbildung 36 sind die Ermüdungsfestigkeiten  $\tau_6$  der unbehandelten Mastix M14 und M15 mit den Ergebnissen der beiden Untersuchungsmethoden gegenübergestellt.

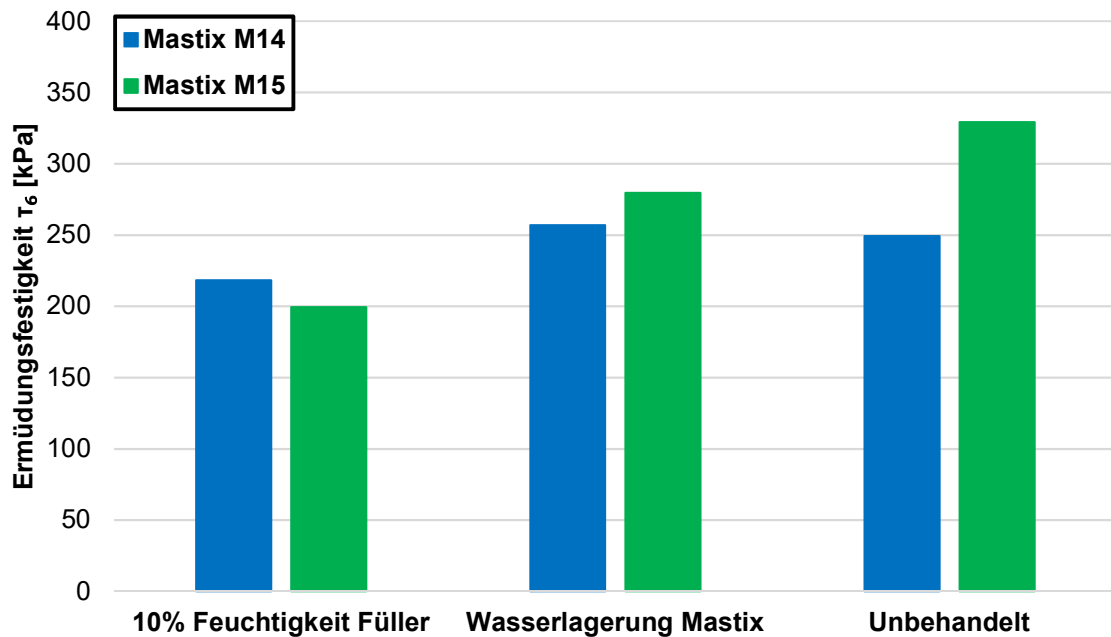


Abbildung 30: Auswirkung von Feuchtigkeit auf die Ermüdungsbeständigkeit

Für die beiden Untersuchungsmethoden wurden die beiden Mastixsorten M14 und M15 ausgewählt, da diese typische Ausgangsmaterialien im Straßenbau beinhalten. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch einen feuchten Füller bei der Herstellung der Asphaltmastix die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  im Vergleich zu den unbehandelten Mastixproben M14 und M15 abnimmt. Bei der Wasserlagerung der Mastix im Druckbehälter tritt dieser Effekt nur bei der Mastix M15 auf. Bei beiden Versuchen dürfte die Abminderung der Festigkeit durch Feuchtigkeit bzw. Wasserrückstände in Poren in der Mastix verursacht werden. Ersichtlich wird dies beim erneuten Aufheizen der Mastixprobe zum Einbau in das DSR.

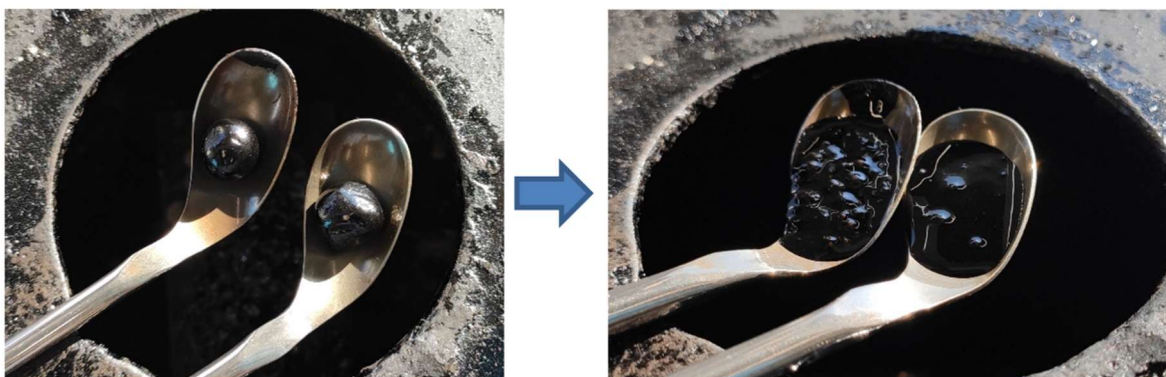
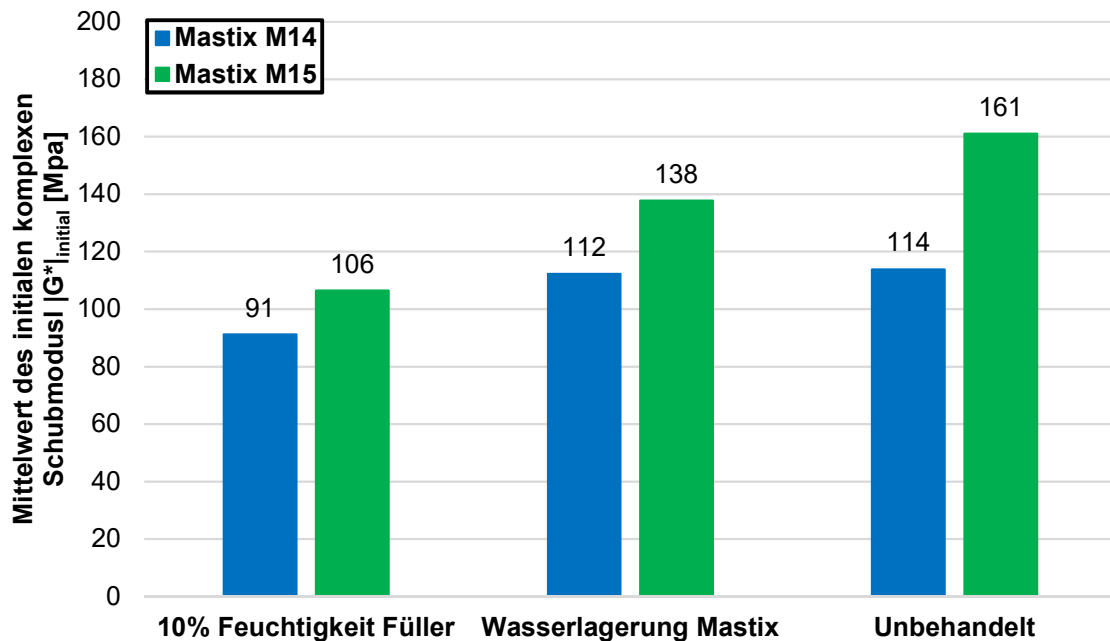


Abbildung 31: Schäumende Mastix beim Erhitzen (linker Löffel: M14 mit feuchtem Füller; rechter Löffel: M14 in Wasser gelagert)



In Abbildung 31 ist zu erkennen, dass durch das Aufheizen der präparierten Mastixproben Wasser verdampft, wodurch die Mastix zu schäumen beginnt, was wiederum zu kleinen Lufteinschlüssen im hergestellten Probekörper führt. Dadurch sinkt die Steifigkeit (siehe Abbildung 32) und demzufolge auch die Ermüdungsfestigkeit.



**Abbildung 32: Auswirkung von Feuchtigkeit auf  $[G^*]_{\text{initial}}$  von Asphaltmastix**

Dieser Effekt tritt vor allem bei jenen Mastixproben mit feuchtem Füller auf. Da dieser Effekt auch auf Asphaltebene auftreten könnte, wurde zu dem im Angebot definierten Prüfumfang zusätzlich eine Prüfung von Asphaltprobekörpern, hergestellt mit feuchtem Füller, in das Prüfprogramm aufgenommen. Die Herstellung und Ergebnisse zu diesen Versuchen sind in Kapitel 7.5 zu finden.

### 7.3 Auswirkung von Alterung auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmastix

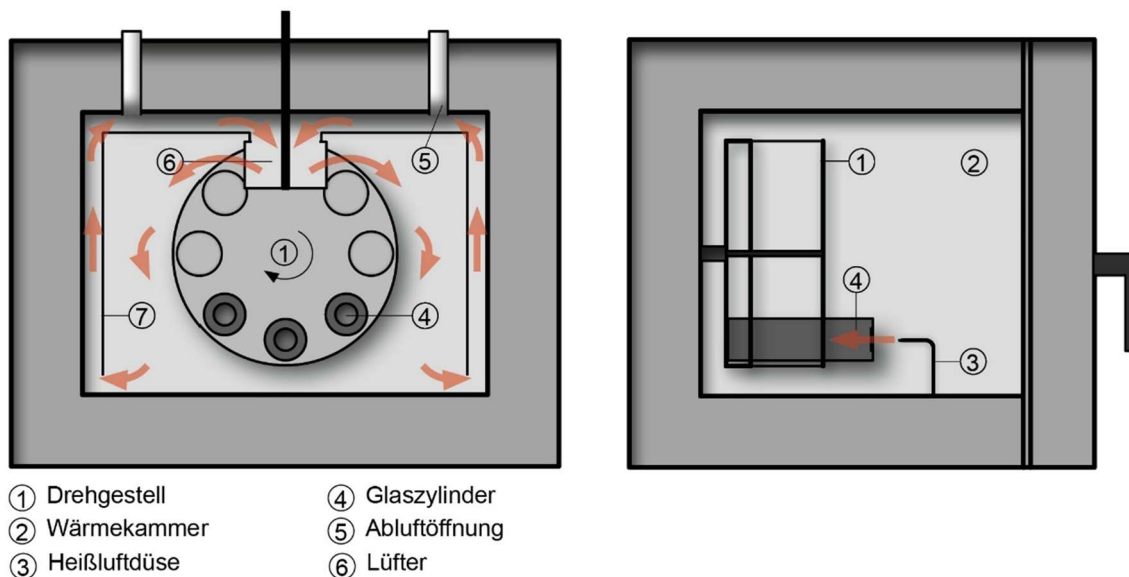
Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen einer Alterung auf die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix betrachtet. Für diese Analyse wurden drei unterschiedliche Alterungsmethoden verwendet.

#### 7.3.1 RTFOT-Verfahren

Bei diesem Verfahren gem. ÖNORM EN 12607-1 [32] werden  $35 \pm 0,5$  g des ungealterten Bitumens in zylindrische Glasgefäße gefüllt. Anschließend werden die Glasgefäße in einem Drehgestell in einer Wärmekammer liegend positioniert. In der Wärmekammer wird die

Temperatur auf +163°C gehalten, während die Glaszylinder darin 90 Minuten lange rotieren. Um die Alterung zu beschleunigen, wird während der gesamten Alterung heiße Luft in jedes Glasgefäß eingeblasen.

In Abbildung 33 ist das RTFOT-Verfahren schematisch dargestellt. Durch die hohe Temperatur und der gleichmäßigen Rotation bildet sich ein dünner, fließender Bitumenfilm an der Mantelfläche des Glasgefäßes. Durch die heiße, eingeblasene Luft und dem dünnen Bitumenfilm entsteht eine große Oxidationsfläche. Das RTFOT-Verfahren simuliert die Kurzzeitalterung, wie sie nach dem Mischen bzw. dem Einbauprozess von Asphalt im Straßenbau stattfindet. [1]



**Abbildung 33: RTFOT-Verfahren für Kurzzeitalterung [33]**

### 7.3.2 PAV- Verfahren

Mit Hilfe des PAV-Verfahren gemäß ÖNORM EN 14769 [34] wird die Langzeitalterung simuliert. Dafür wird eine bereits kurzzeitgealterte Bitumenprobe (z.B. mit dem RTFOT-Verfahren) in eine standardisierte Edelstahlschale gegossen. Durch Vorerwärmung bildet sich ein gleichmäßig dünner Bitumenfilm. Die Schalen mit dem vorbereiteten Bitumenproben werden in einen temperierten Druckkessel mit 2,1 MPa und einer Temperatur von 90, 100 oder 110 °C gegeben und somit innerhalb von 20 Stunden beschleunigt gealtert. In Abbildung 34 ist das PAV-Verfahren schematisch dargestellt. Durch dieses Verfahren kann eine Alterung entsprechend einer Liegedauer von zirka 10 Jahren simuliert werden. [1]

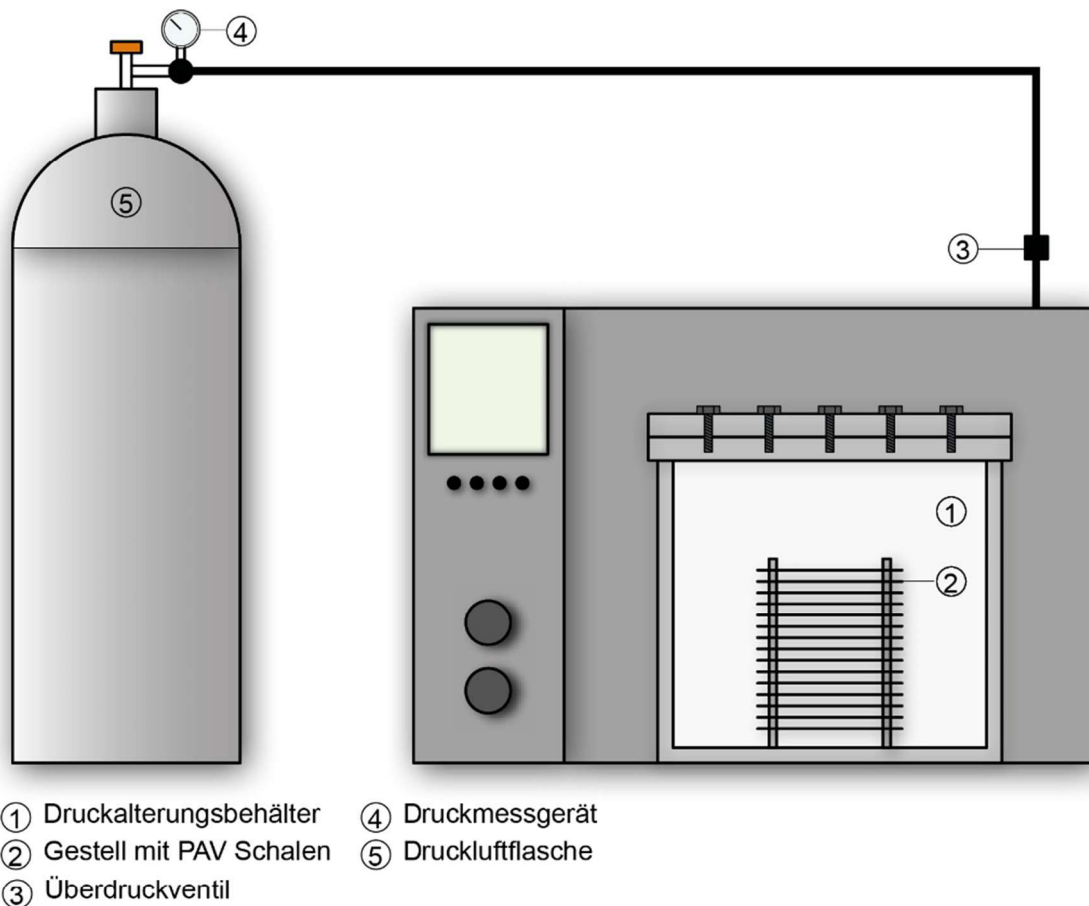


Abbildung 34: PAV-Verfahren für Langzeitalterung [33]

### 7.3.3 Viennese Binder Aging (VBA)

Das „Viennese Binder Aging“ [35] ist ein Alterungsverfahren, welches an der TU Wien entwickelt wurde. Dabei erfolgt die Alterung im Gegensatz zur Alterung mittels PAV-Verfahren bei Umgebungsdruck und geringer Temperatur. Dadurch werden thermische Alterungsprozesse vermieden. Um den Alterungsprozess dennoch beschleunigen zu können, werden hohe Konzentrationen an reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) verwendet. Dafür wird Umgebungsluft mit Ozon  $O_3$  und Stickstoffen  $NO_x$  angereichert und über die Oberfläche der Probe geblasen. In Abbildung 35 ist das VBA-Verfahren schematisch dargestellt. Aufgrund des hohen Oxidationspotential kann mit diesem Verfahren ein Alterungsniveau innerhalb von 3 Tagen erzielt werden, welches Vergleichbar mit der Kombination des RTFOT- und PAV-Verfahrens ist. Durch die Variation der ROS-Konzentration kann der Alterungsgrad beeinflusst werden. [35]

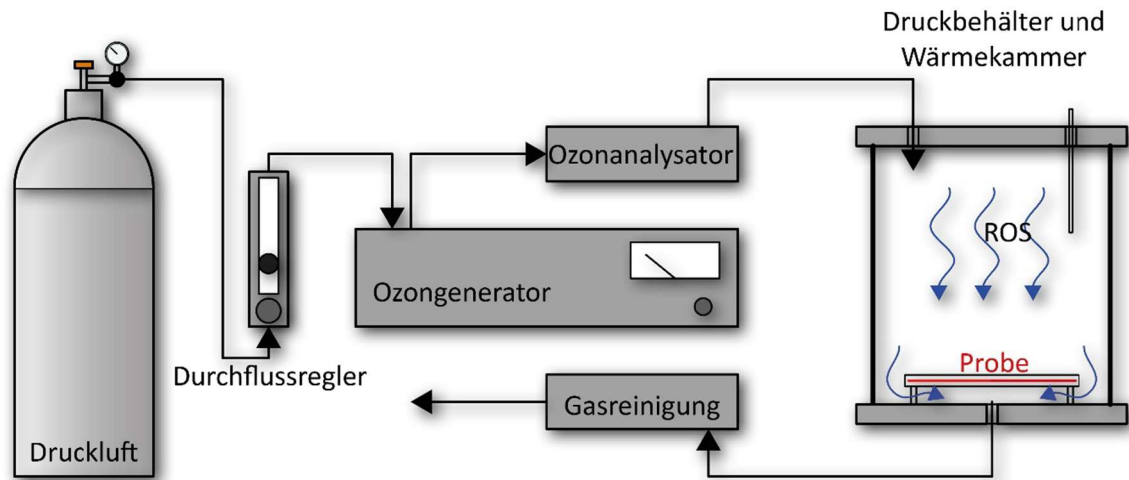


Abbildung 35: VBA-Verfahren für Langzeitalterung gemäß [33]

### 7.3.4 Ergebnisse der Alterungsverfahren

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Alterungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix zu untersuchen, wurden unterschiedliche Methoden miteinander kombiniert. Ausgangsstoffe für die Alterung waren das Bitumen ohne Füller oder die bereits gemischte Mastix. Insgesamt wurden 6 unterschiedliche gealterte Mastixproben hergestellt:

- **Bitumen gealtert mittels RTFOT- und PAV-Verfahren**

Zur Herstellung dieser Mastixproben wurde das Ausgangsmaterial Bitumen mittels RTFOT-Verfahren (Kapitel 7.3.1) und anschließend mittels PAV-Verfahren (Kapitel 7.3.2) gealtert. Mit dieser Methode wurde sowohl das Bitumen B1 (70/100) als auch das Bitumen B2 (45/80-65) gealtert und anschließend mit dem Füller F04 mit demselben Mischungsverhältnis wie M14 bzw. M24 zu einer Mastix gemischt. Sie haben die Bezeichnung M14\_BRP und M24\_BRP

- **Mastix gealtert mittels RTFOT- und PAV-Verfahren**

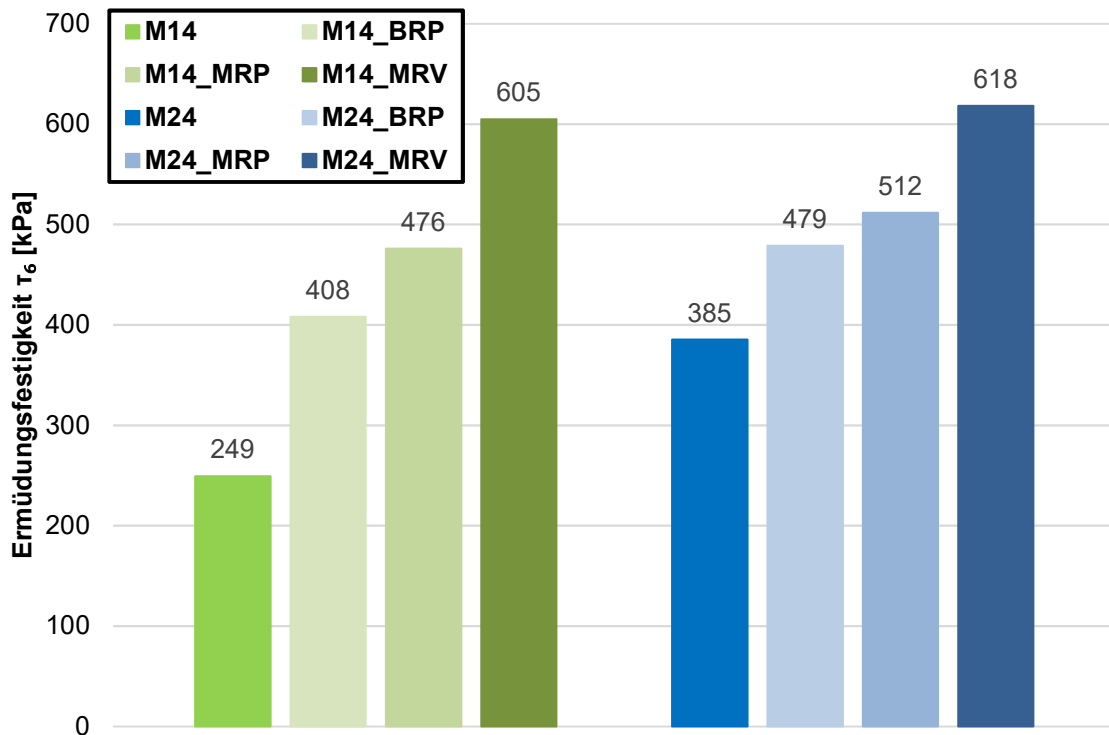
Zur Herstellung dieser Mastixproben wurde als Ausgangsmaterial die Mastix mittels RTFOT-Verfahren (Kapitel 7.3.1) und anschließend mittels PAV-Verfahren (Kapitel 7.3.2) gealtert. Mit dieser Methode wurde sowohl die Mastix M14 als auch die Mastix M24 gealtert. Sie tragen die Bezeichnung M14\_MRP und M24\_MRP

- **Mastix gealtert mittels RTFOT- und VAB-Verfahren**

Zur Herstellung dieser Mastixproben wurde als Ausgangsmaterial die Mastix mittels RTFOT-Verfahren (Kapitel 7.3.1) und anschließend mittels VBA-Verfahren (Kapitel

7.3.37.3.2) gealtert. Mit dieser Methode wurde sowohl die Mastix M14 als auch die Mastix M24 gealtert. Sie tragen die Bezeichnung M14\_MRV und M24\_MRV.

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen an den gealterten Mastixproben jenen der ungealterten Mastixproben graphisch gegenübergestellt.



**Abbildung 36: Auswirkung der Alterungsverfahren auf die Ermüdungsbeständigkeit**

In Abbildung 36 ist deutlich zu erkennen, dass die Alterungsverfahren eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  der Asphaltmastix bewirken. Dies ist der spannungsgesteuerten Prüfmethode bei der Ermüdungsprüfung auf Mastixebene verschuldet. In Abbildung 37 ist die deutliche Zunahme der Steifigkeiten durch die Alterungsverfahren bei den beiden Mastixsorten zu erkennen. Eine hohe Anfangssteifigkeit bedeutet bei einer spannungsgesteuerten Prüfmethode eine kleine aufgebrachte Dehnung im Probekörper, um die definierte Spannung zu erreichen. Durch kleine Dehnungen ist jedoch die Ermüdungsbeanspruchung im Probekörper klein, weshalb auch die Lastwechselzahl bis zur Ermüdung steigt. Um einen Einfluss der Ermüdung mittels DSR messen zu können, müsste man eine dehnungsgesteuerte Prüfmethode anwenden. Hier wäre zufolge der hohen Steifigkeit eine hohe Anfangsspannung notwendig, um die vorgegebene Dehnung zu erreichen. Jedoch tritt bei dehnungsgesteuerten Prüfmethoden kein tatsächliches Versagen ein, wodurch die Wiederholbarkeit leidet. Demnach kann die Alterung mit der

gewählten Ermüdungsprüfung bestätigt werden, jedoch können die Ergebnisse nicht direkt in Relation zu den nicht gealterten Probekörpern gesetzt werden. Es ist zu erkennen, dass die Proben M14\_BRP und M14\_MRP bzw. M24\_BRP und M24\_MRP nicht zu denselben Ergebnissen führen. Grund dafür dürfte die Alterung der Mastix mittels RTFOT-Verfahren sein. Zuzufolge des Alterungsverfahrens bleibt ein dünner Bitumenfilm im Glasgefäß der RTFOT-Anlage zurück, wodurch sich das Bitumen/Füller-Verhältnis in der Mastix M14\_MRP bzw. M24\_MRP verändert. Durch das steigende Füller/Bitumen-Verhältnis zuzufolge des Verlust von Bitumen im RTFOT-Glasgefäß steigt auch die Ermüdungsfestigkeit an. Des Weiteren zeigt das Alterungsverfahren mittels RTFOT- und VBA-Verfahren den höchsten Alterungsgrad an. Dies ist der Tatsache verschuldet, dass nur das VBA-Verfahren alleine bereits beide Alterungsmethoden (RTFOT und PAV) abdeckt, jedoch für die Alterung mittels VBA-Verfahren bereits RTFOT-gealterte Mastix verwendet wurde. Dies bestätigt jedoch die Wirksamkeit aller angewendeten Alterungsmethoden.

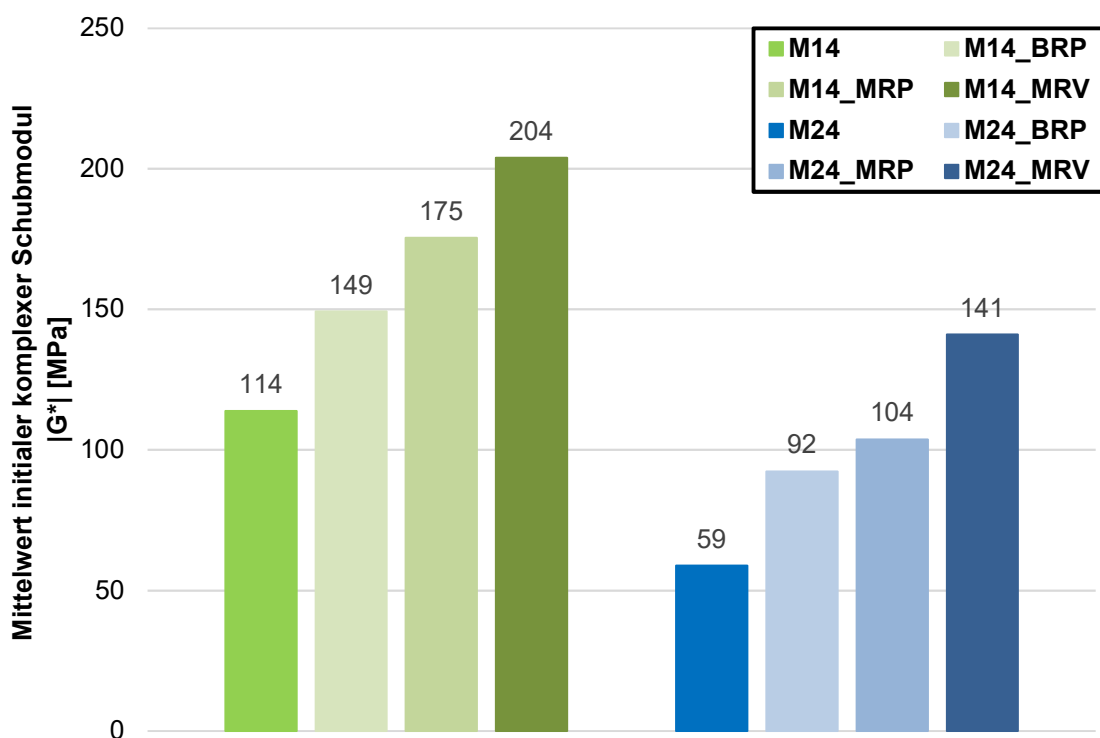


Abbildung 37: Auswirkung der Alterungsverfahren auf die Schubsteifigkeit von Asphaltmastix

#### 7.4 Korrelationsanalysen zur Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit auf Asphaltebene zuzufolge Prüfungen auf Mastix- und Füllerebene

Ein wesentlicher Teil dieser Forschungsarbeit hat das Ziel, aus den Erkenntnissen der vorherigen Kapitel einen Rückschluss auf die Asphaltebene zu ermöglichen. Dazu wurden

Ergebnisse der Mastixebene mit den Ergebnissen auf Asphaltenebene korreliert. Als erstes wurde die Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  auf Asphaltenebene mit den Daten auf Mastix bzw. Füllerebene korreliert. Dafür wurde zunächst ein einfaches lineares Regressionsmodell gewählt. In Tabelle 36 sind die Ergebnisse zusammengefasst, ausgedrückt durch das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ .

**Tabelle 36: Ergebnisse der einfachen linearen Regressionsanalyse zwischen Füller- und Mastixkennwerten in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit des Asphalts**

	$T_6$	$ G^* _{\text{initial}}$	$\delta_{\text{initial}}$	k	$\rho$	R.-V%	BET
$\epsilon_6$	0,13	0,17	0,51	0,31	0,56	0,17	0,34

	0,002	0,016	0,063	d10	d30	d60	Cc	Cu
$\epsilon_6$	0,44	0,33	0,05	0,70	0,49	0,31	0,53	0,02

	ECAD	ECPD	L	W	FA	C	E	R
$\epsilon_6$	0,52	0,59	0,33	0,62	0,36	0,43	0,37	0,30

Zufolge der kleinen Stichprobe von nur 6 unterschiedlichen Mastix- bzw. Asphaltmischungen, die im Rahmen des Projekts hergestellt wurden, kann kein direkter Zusammenhang abgeleitet werden, da alle Bestimmtheitsmaße  $R^2$  relativ klein sind. Um dennoch einen Zusammenhang zwischen Asphaltenebene und Mastixebene zu identifizieren, wurde in Folge ein multiples lineares Regressionsmodell verwendet, um eine Abhängigkeit feststellen zu können, welche die Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  beschreibt. Dafür wurden jedoch nur noch mastixspezifische Werte für die Analysen herangezogen. In Tabelle 37 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

**Tabelle 37: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zwischen Mastix- und Asphaltkennwerten in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit des Asphalts**

	$T_6$	$ G^* _{\text{initial}}$	$\delta_{\text{initial}}$	k
$T_6$	0,13	0,18	0,84	0,72
$ G^* _{\text{initial}}$	-	0,18	0,58	0,67
$\delta_{\text{initial}}$	-	-	0,51	0,88
k	-	-	-	0,31

Zufolge der multiplen Regressionsanalyse lassen sich einige Parameterpaare identifizieren, mit welchen die Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  des Asphalts abgeschätzt werden kann. Wie auch schon in den Analysen zuvor, sind vor allem Paare interessant, welche nicht nur aus

Initialwerten bestehen. Demnach sind vor allem Paare mit dem Ermüdungsfestigkeitswert  $\tau_6$  der Asphaltmastix gut geeignet, um die Asphaltermüdung  $\varepsilon_6$  abzuschätzen. Daraus würde sich ableiten, dass vor allem der Wert  $\tau_6$  mit dem Mittelwert des Initialwertes des Phasenwinkels  $\delta_{\text{initial}}$  mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,84$  gut korrelieren. Die daraus abgeleitete Formel lautet:

$$\varepsilon_6 = -1285,23 + 0,7 \cdot \tau_6 + 34,88 \cdot \delta \quad (8)$$

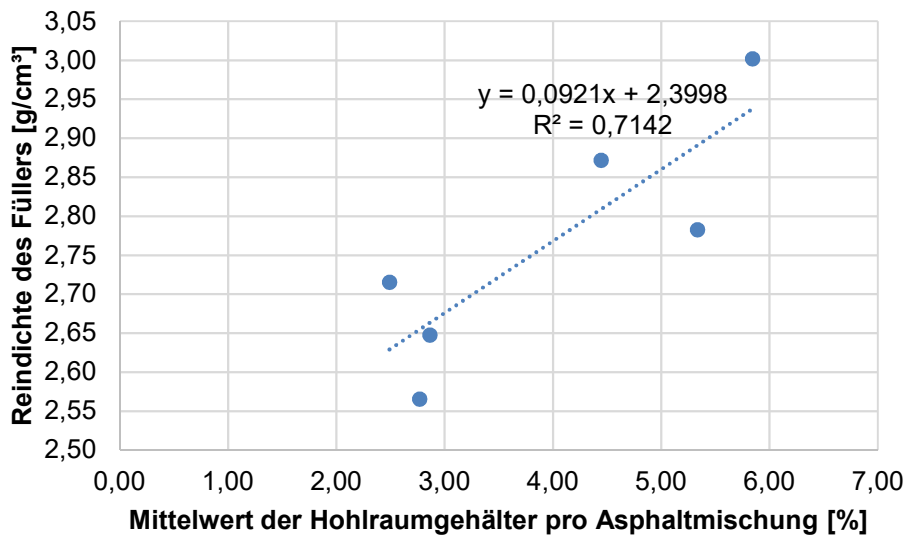
Wertet man nun die Formel 8 mit den gemessenen Ergebnissen der Mastixermüdungsversuche aus, so kommt man auf die in Tabelle 38 zusammengefassten Ergebnisse. Die Ergebnisse sind gut geeignet, um die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmischung zu prognostizieren, auch wenn zum Teil die Ermüdungsbeständigkeit mit mehr als 10% überschätzt wird.

**Tabelle 38: Auswertung der Prognoseformel für die Ermüdungsfestigkeit  $\varepsilon_6$**

	Prognose	Gemessen	Abweichung
<b>A11</b>	106	104	1,84%
<b>A12</b>	130	140	-7,05%
<b>A13</b>	128	115	11,28%
<b>A14</b>	165	159	3,81%
<b>A15</b>	138	142	-2,80%
<b>A16</b>	144	151	-4,66%

Da der Stichprobenumfang von 6 Proben jedoch gering ist, kann nur durch zusätzliche Prüfungen die Genauigkeit der Formel bestätigt bzw. verbessert werden. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse der Asphaltermüdungsprüfungen aus Kapitel 6.3.1, so lässt sich erkennen, dass die Ermüdungsfestigkeit in Zusammenhang mit dem Hohlraumgehalt der Probekörper steht. Die unterschiedlichen Hohlraumgehalte ergeben sich durch die massebezogene Einwaage für die Asphaltprobekörper. Die unterschiedlichen Asphaltmischungen unterscheiden sich nur durch den zugesetzten Füller, welcher aufgrund seiner Reindichte jeweils ein unterschiedliches Volumen bei selber Masse einnimmt. In Abbildung 38 wird dieser Zusammenhang graphisch verdeutlicht. Somit hat die Reindichte einen Einfluss auf den Hohlraumgehalt der Probekörper, und dieser hat wiederum einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit.





**Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Reindichte und Hohlraumgehalt**

Auch in der Literatur [36–38] wird das Phänomen der Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit bzw. Ermüdungsfunktion des Asphalts zufolge des Hohlraumgehalts bzw. des Verdichtungsgrades beschrieben. Deshalb wurde versucht, auch die Reindichte des Füllers in das Regressionsmodell aufzunehmen, da es die unterschiedlichen Hohlraumgehalte, welche auf Mastixebene nicht vorhanden sind, und somit dessen Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit kompensieren soll. Mittels multipler linearer Regressionsanalyse wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen der Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  auf Asphaltenebene und der Ermüdungsfestigkeit  $\tau_6$  auf Mastixebene, der Reindichte des Füllers und einem weiteren unabhängigen Mastixparameter zu finden. In Tabelle 39 sind die verwendeten Variablen und das Bestimmtheitsmaß einer jeden Analyse zusammengefasst.

**Tabelle 39: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse mit 3 unabhängigen Variablen**

Variable Y	$\epsilon_6$	$\epsilon_6$	$\epsilon_6$
Variable X1	$\tau_6$	$\tau_6$	$\tau_6$
Variable X2	$\rho$	$\rho$	$\rho$
Variable X3	$ G^* _{\text{initial}}$	$\delta_{\text{initial}}$	k
R <sup>2</sup>	0,9998	0,9754	0,8607

Demnach eignen sich besonders die Mittelwerte des Initialwertes des komplexen Schubmoduls  $|G^*|_{\text{initial}}$  bzw. des Phasenwinkels  $\delta_{\text{initial}}$  in Kombination mit der Reindichte  $\rho$  und der Festigkeit  $\tau_6$  um die Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  auf Asphaltenebene zu prognostizieren.

Die Formel zur Prognose mit  $\tau_6$ ,  $\rho$  und  $|G^*|$  lautet wie folgt:

$$\varepsilon_6 = 597,91 - 0,1 \cdot \tau_6 - 128,53 \cdot \rho - 0,57 \cdot |G^*|_{initial} \quad (9)$$

Wertet man nun die Formel 9 mit den gemessenen Ergebnissen der Mastixermüdungsversuche aus, zusammengefasst in Tabelle 40, so stellt man fest, dass mit einer sehr hohen Genauigkeit die Ermüdungsbeständigkeit prognostiziert werden kann. Nachteil dieser Formel ist, dass sie von sehr konkret vorgegebenen Randbedingungen ausgeht, die nicht auf jedes Mischgut zutreffen (z.B. Sieblinie, Bitumensorte). In Kapitel 7.6 werden beide aufgestellten Prognoseformel für andere Mischgüter/Mastixsorten aus anderen Projekten mit abweichenden Parametern untersucht.

**Tabelle 40: Auswertung der Prognoseformel für die Ermüdungsfestigkeit  $\varepsilon_6$**

	Prognose $\varepsilon_6$	Gemessen $\varepsilon_6$	Abweichung
<b>A11</b>	105	104	0,86%
<b>A12</b>	141	140	0,81%
<b>A13</b>	116	115	0,89%
<b>A14</b>	159	159	0,25%
<b>A15</b>	143	142	0,72%
<b>A16</b>	152	151	0,89%

Im Rahmen dieser Studie wurden auch Mastixproben gealtert. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 7.3.4 zusammengefasst. Aufgrund der Erhöhung der Steifigkeiten zufolge der Alterungsverfahren, konnte keine Aussage über das Ermüdungsverhalten  $\tau_6$  der Asphaltmastix getroffen werden. Da jedoch die Schubsteifigkeit  $|G^*|$  als negativer Faktor in die oben genannte Prognoseformel eingeht, kann damit auch ein Rückschluss auf die Asphaltenebene getroffen werden. In Tabelle 41 sind die theoretischen Ermüdungsfestigkeiten  $\varepsilon_6$  auf Asphaltenebene zufolge der Werte aus Kapitel 7.3.4 berechnet.

**Tabelle 41: Auswertung der Prognoseformel für gealterte Mastixsorten**

Mastix	$\tau_6$	$\rho$	$ G^* _{initial}$	Asphalt	$\varepsilon_6$
<b>M14</b>	249,3	2,72	113,86	<b>A14</b>	159
<b>M14_BRP</b>	408,1	2,72	149,24	<b>A14_BRP</b>	123
<b>M14_MRP</b>	476,0	2,72	175,48	<b>A14_MRP</b>	101
<b>M14_MRVS</b>	604,9	2,72	203,87	<b>A14_MRVS</b>	72

Die Ergebnisse für die Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  aus Tabelle 41 würden der Annahme entsprechen, dass durch Alterung die Ermüdungsfestigkeit abnimmt. Da zu diesen Prognosen keine Daten auf Asphaltenebene vorliegen, ist es von Besonderem Interesse, in Zukunft Versuche auf Asphaltenebene mit gealterten Probekörpern durchzuführen.

## **7.5 Einfluss eines feuchten Füllers auf die Ermüdungsfestigkeit auf Asphaltenebene**

Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 7.2.3 besteht die Vermutung, dass ein feuchter Füller einen negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Deshalb wurden über das Angebot hinaus auch Asphaltprobekörper mit feuchtem Füller hergestellt. Dazu wurde wie bei allen Probekörpern die Einwaage gemäß Rezeptur vorbereitet. Der Füller wurde jedoch dann mit destilliertem Wasser in einem runden Behälter bei konstanter Rotation solange befeuchtet, bis ein Wassergehalt von 10 Masseprozent erreicht wurde. Es wurden eine Feuchtigkeit von 10 M.% im Füller gewählt, da durch die Verdunstung beim Mischen dieser Wert sinkt. Im anschließenden Herstellungsverfahren für die Probekörper wurde der Füller jedoch nicht wie normal vorgewärmt und getrocknet, sondern wurde erst direkt beim Mischen der restlichen Einwaage beigemischt. Wie auf Mastixebene entstanden auch beim Mischen auf Asphaltenebene viele kleine Bläschen zufolge des verdampfenden Wassers aus dem Füller (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39: Bläschenbildung beim Mischen des Asphalts zufolge des feuchten Füllers**

Dies dürfte zu kleinen Luftenlagerungen in der Asphaltmastix führen, welche sich negativ auf die Festigkeit auswirken. Auch die Ergebnisse in Abbildung 40 zeigen eine deutliche Verschlechterung der Ermüdungsfestigkeit, nahezu äquivalent zu den Ergebnissen auf Mastixebene. Demnach ist es von hoher Priorität, dass nur vollständig getrocknete Gesteine und Füller zur Herstellung von Asphalt verwendet werden sollten.

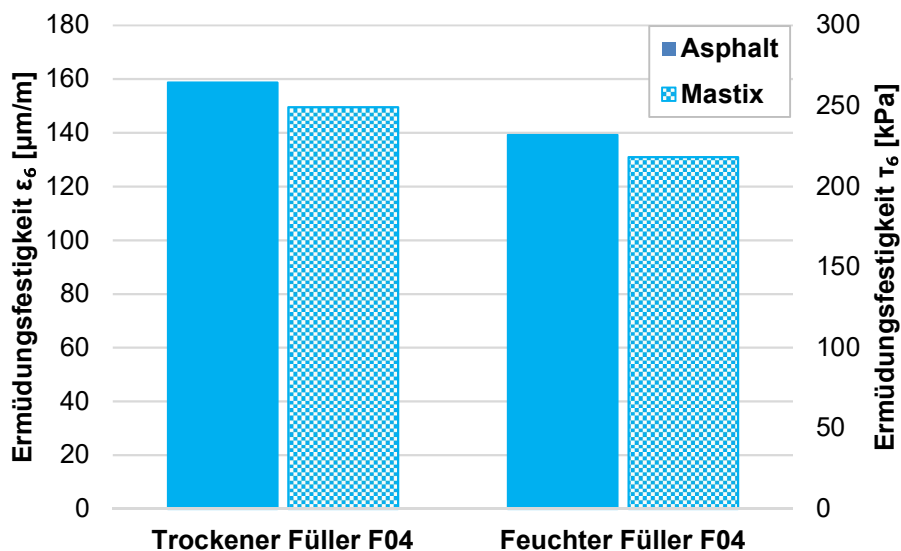


Abbildung 40: Vergleich der Ermüdungsfestigkeiten Auf Asphalt- und Mastixebene zufolge feuchten Füllers

## 7.6 Anwendung des Prognoseverfahren auf Prüfergebnisse aus vorangegangenen Projekten

In Kapitel 7.4 wurden die beiden Prognoseformeln 8 und 9 hergeleitet, die eine Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  auf Asphaltenebene zufolge Prüfungen auf Mastixebene aus diesem Projekt ermöglichen. Im Rahmen des durch die FFG geförderten Projektes „Vereinfachung der prüftechnischen Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Asphalt (VEGAS)“ konnten bereits Ergebnisse auf Mastix- und Asphaltenebene gesammelt werden. In Tabelle 42 sind die relevanten Ergebnisse (gleiche Mischgutanforderungen gemäß Asphalt AC 11 deck und selbe Bitumensorte 70/100) der Mastixprüfungen von damals zusammengefasst. Die dafür benötigten Ausgangsmaterialien kamen aus der DACH-Region.

Tabelle 42: Ergebnisse der damaligen Prüfungen aus dem Projekt VEGAS

Gestein / Füller	Bitumen	$\tau_6$ [kPa]	$ G^* _{\text{initial}}$ [MPa]	$\delta_{\text{initial}}$ [°]	$\rho$ [g/cm³]
Gabbro / Kalkstein	70/100	262,6	99,44	35,88	2,89
Porphyry / Kalkstein	70/100	239,1	88,18	36,32	2,77
Silikat / Kalstein	70/100	279,5	107,9	34,54	2,7

Anhand dieser Ergebnisse kann geprüft werden, wie Aussagekräftig die aufgestellten Prognoseformeln in Kapitel 7.4 sind. In Tabelle 43 und Tabelle 44 sind die Ergebnisse zufolge der Prognoseformeln 8 und 9 zusammengefasst.

**Tabelle 43: Ermüdungsprognose nach Formel 8 für die Ergebnisse aus dem Projekt VEGAS**

Geistein/Füller	Bitumen	Prognose $\epsilon_6$	Gemessen $\epsilon_6$	Abweichung
Gabbro / Kalkstein	70/100	151	196	-23,17%
Porphy / Kalkstein	70/100	150	185	-18,99%
Silikat / Kalstein	70/100	116	189	-38,53%

**Tabelle 44: Ermüdungsprognose nach Formel 9 für die Ergebnisse aus dem Projekt VEGAS**

Geistein/Füller	Bitumen	Prognose $\epsilon_6$	Gemessen $\epsilon_6$	Abweichung
Gabbro / Kalkstein	70/100	144	196	-26,92%
Porphy / Kalkstein	70/100	168	185	-9,14%
Silikat / Kalstein	70/100	161	189	-14,50%

Es lässt sich festhalten, dass sich durch Formel 8 die Ermüdungsfestigkeit dieser Mischgüter nicht ausreichend genau beschreiben lässt. Betrachtet man die Ergebnisse zufolge Formel 9 (Tabelle 44), so lässt sich bei 2 Mischgütern die die Ermüdungsfestigkeit auf Asphaltenebene abschätzen, während bei dem dritten Mischgut die Abweichung mit 26,92% zu groß für eine nutzbare Prognose ist. Jedoch sind deutlich größere Unsicherheiten in Kauf zu nehmen, da nicht das idente Bitumen und Gestein verwendet wurde und auch die Asphaltrezeptur geringfügig abweicht. Im Rahmen des FFG-Projektes VEGAS wurden 14 verschiedene Asphaltmischungen und die dazugehörigen Mastixmischungen geprüft, jedoch überwiegend mit unterschiedlichen Bitumensorten. Dies führt zu der Überlegung, einen vierten unabhängigen Parameter in die Prognoseformel einzufügen, der die unterschiedlichen Bitumensorten charakterisiert und somit selbe Asphaltrezepturen mit unterschiedlichen Bitumen mit derselben Formel zu prognostizieren. Dafür hat sich in den Untersuchungen gezeigt, dass sich hierfür vor allem der Penetrationswert des Bitumens eignet. In Tabelle 45 sind alle erforderlichen Werte aus beiden Projekten zusammengefasst, um eine Korrelation herstellen zu können. Daraus lässt sich anhand der multiplen linearen Regressionsanalyse eine Prognoseformel ableiten, mit welcher anhand der vier Eingangsparameter ( $\tau_6$ ,  $\rho$ ,  $|G^*|_{\text{initial}}$  und Penetrationswert) die Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  auf Asphaltenebenen abgeschätzt werden kann.

**Tabelle 45: Ergebnisse der Asphalt- und Mastixprüfungen aus dem Projekt VEGAS und BEDA**

Bitumen	Gestein/ Füller	Mastixebene				Asphaltebene
		T <sub>6</sub> [kPa]	ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	G*  <sub>initial</sub> [Mpa]	Pene [0,1mm]	ε <sub>6</sub> [kPa]
Hersteller 1 - 50/70	Gabbro/ Kalkstein	345,42	2,89	132,76	64	194
Hersteller 1 - PmB 25/55-55	Gabbro/ Kalkstein	500,62	2,89	146,09	46	233
Hersteller 2 - 50/70	Gabbro/ Kalkstein	359,77	2,89	190,09	67	88
Hersteller 2 - PmB 25/55-55	Gabbro/ Kalkstein	531,66	2,89	127,19	39	238
Hersteller 3 - 50/70	Gabbro/ Kalkstein	292,80	2,89	177,14	56	130
Hersteller 3 - PmB 25/55-55	Gabbro/ Kalkstein	432,31	2,89	174,75	40	176
Hersteller 4 - 50/70	Gabbro/ Kalkstein	334,54	2,89	136,37	64	164
Hersteller 4 - PmB 25/55-55	Gabbro/ Kalkstein	412,98	2,89	81,67	43	298
Hersteller 4 - 70/100	Gabbro/ Kalkstein	262,64	2,89	99,44	85	196
Hersteller 4 - PmB 45/80-65	Gabbro/ Kalkstein	355,65	2,89	63,87	58	297
Hersteller 4 - 70/100	Porphy/ Kalkstein	239,06	2,77	88,18	85	185
Hersteller 4 - PmB 45/80-65	Porphy/ /Kalkstein	353,45	2,77	52,33	58	358
Hersteller 4 - 70/100	Silikat/ Kalkstein	279,52	2,70	107,93	85	189
Hersteller 4 - PmB 45/80-65	Silikat/ Kalkstein	419,47	2,70	64,02	58	336
B1 - 70/100	Granitporphyr/ Granit	239,87	2,78	131,36	85	140
B1 - 70/100	Granitporphyr/ Kalkstein	249,30	2,72	113,86	85	159
B1 - 70/100	Granitporphyr/ Basalt	289,36	3,00	118,25	85	115
B1 - 70/100	Granitporphyr/ Quarz	309,09	2,65	131,04	85	151
B1 - 70/100	Granitporphyr/ Granitporphyr	315,55	2,87	162,54	85	104
B1 - 70/100	Granitporphyr/ Kalkhydrat	329,20	2,57	161,03	85	142

Anhand der in Tabelle 45 zusammengefassten Werte lässt sich Formel 10 herleiten. Diese ermöglicht eine Prognose auch bei unterschiedlichen Bitumensorten.

$$\varepsilon_6 = 906,3 + 0,1 \cdot \tau_6 - 144,8 \cdot \rho - 1,49 \cdot |G^*|_{initial} - 2,26 \cdot Pene \quad (10)$$

Um das Ergebnis zu veranschaulichen, sind in Abbildung 41 die tatsächlich gemessenen Ermüdungsfestigkeiten  $\varepsilon_6$  der Asphaltmischungen den prognostizierten Werten zufolge der Prüfungen gegenübergestellt. Datenpunkte, welche näher bei der schwarzen Linie liegen, sind durch Formel 10 besser vorhergesagt, als weiter entfernte Punkte. Somit widerspiegelt die schwarze Linie eine fehlerlose Prognose.

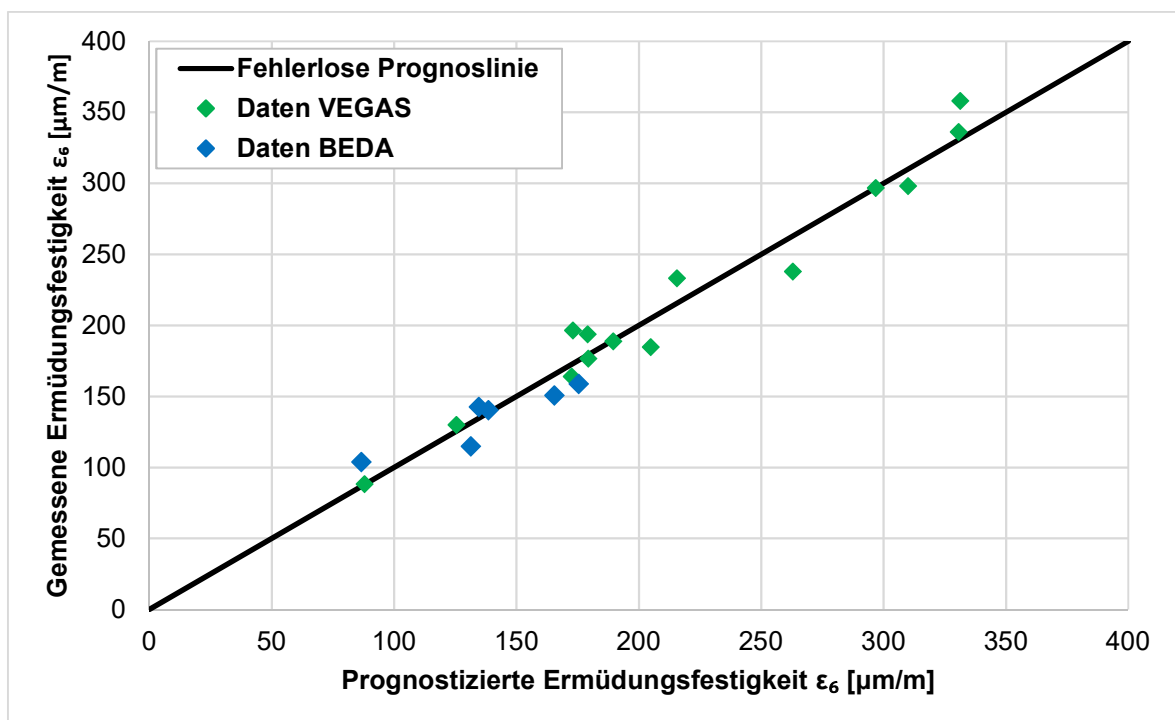
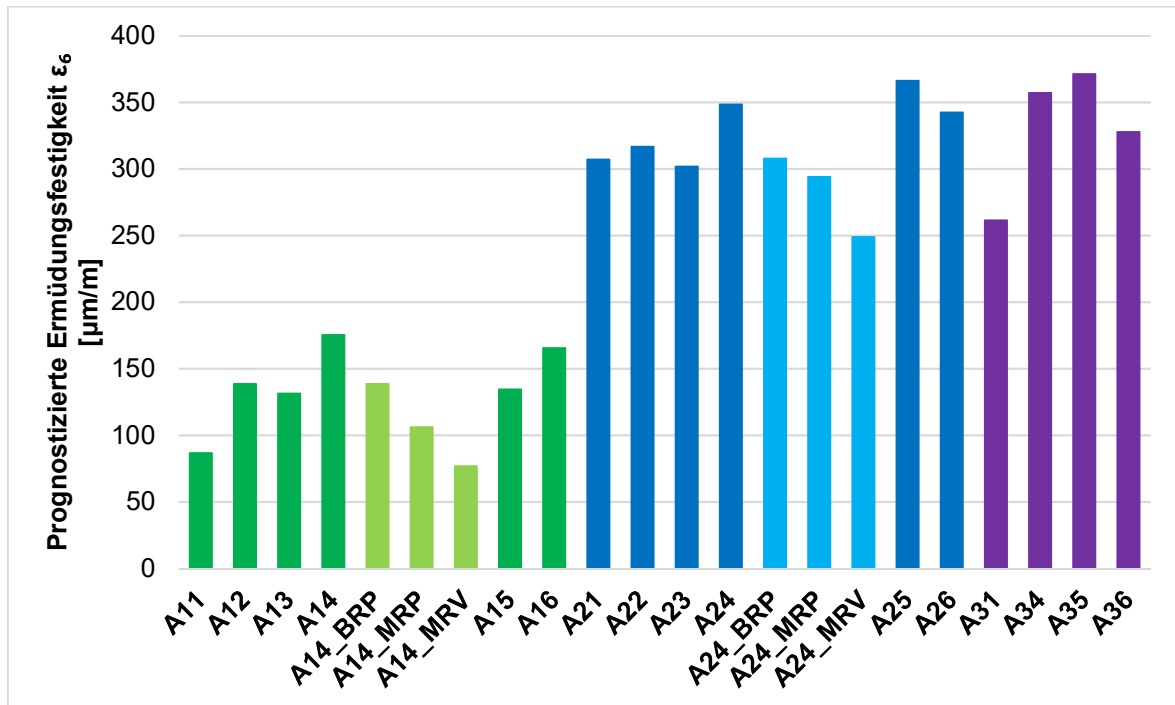


Abbildung 41: Vergleich der gemessenen und den prognostizierten Ermüdungsfestigkeitswerte  $\varepsilon_6$  auf Asphaltenebene

Zufolge der abgeleiteten Prognoselinie lassen sich somit auch die in diesem Projekt gemessenen Mastixproben auswerten, zu denen es keine Ergebnisse auf Asphaltenebene gibt. In Abbildung 42 sind alle prognostizierten Ermüdungsfestigkeitswerte  $\varepsilon_6$  zufolge den Ergebnissen aus den Prüfungen an Mastix, Bitumen und Füller gegenübergestellt. Die Bezeichnung der Asphaltarten richtet sich nach der zugrundeliegenden Mastixsorte. Es ist deutlich zu erkennen, dass zufolge der Prognoseformel 10 und den zugrundeliegenden Prüfwerten die polymermodifizierten Mischungen (blaue und violette Säulen) eine deutlich bessere Ermüdungsfestigkeit aufweisen als jene mit unmodifiziertem Bitumen (grüne

Säulen). Außerdem lässt sich erkennen, dass bei Mischungen mit dem Bitumen 70/100 Kalkstein als Füller die besten Ergebnisse erzielt, wobei bei den beiden polymermodifizierten Mischungen Kalkhydrat als Füller die bessere Wahl ist. Auch lässt sich der Einfluss der Alterung, hochgerechnet auf die Asphaltebene, erkennen (A14, A14\_BRP, A14\_MRP, A14\_MRV und A24, A24\_BRP, A24\_MR, A24\_MRV). Zuzufolge der unterschiedlichen Alterungsvarianten wird die Ermüdungsfestigkeit deutlich geringer.



**Abbildung 42: Vergleich der prognostizierten Ermüdungsfestigkeitswerte  $\epsilon_6$  auf Asphaltebene zufolge Prüfungen aus dem Projekt BEDA**

Jene Mastix- und Asphaltproben, welche den Einfluss von Wasser repräsentieren, können nicht anhand dieses Modells ausgewertet werden. Grund dafür dürften die Lufteinschlüsse in den Mischungen sein, die das Materialverhalten auf eine Art und Weise beeinträchtigen, welche mit der oben abgeleiteten Formel 10 nicht beschreibbar ist.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Auf den österreichischen Straßen gab es in den vergangenen Jahren vermehrt vorzeitige Schäden wie Korn- und Schollenausbrüche bei bituminösen Deckschichten. Da diese Schäden weder einer klimatischen noch einer verkehrstechnischen Belastung zugeordnet werden kann, geht man derzeit von einer mangelnden Dauerhaftigkeit der Asphaltmastix (Bitumen + Feinanteile) aus. Jedoch geben Regelwerke und Normen keine Grenz- oder Anforderungswerte für den Nachweis der Dauerhaftigkeit beziehungsweise der



Ermüdungsbeständigkeit bzw. entsprechende Prüfverfahren vor. Deshalb war es von besonderem Interesse, die Ermüdungsbeständigkeit und deren Ursachen zu erforschen, um sie in weiterer Folge in existierende Asphaltregelwerke implementieren zu können. Dadurch soll die Lebensdauer von Straßeninfrastruktur langfristig verbessert werden, was wiederum Ressourcenschonung und effizienter Einsatz von öffentlichen Geldern bedeutet.

Die Vorgehensweise im Forschungsprojekt BEDA (Beurteilung der Asphaltmastixqualität in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Asphaltdecken) zielte darauf ab,

- zum einen die Auswirkungen der Ausgangsstoffe auf die Ermüdungsbeständigkeit der Asphaltmastix zu analysieren
- und zum anderen einen Zusammenhang zwischen dem Ermüdungsverhalten auf Mastix- und Asphaltebene zu finden.

Im Rahmen der Studie wurden 6 verschiedene Füller sowie 3 verschiedene Bitumen als Ausgangsmaterial für die Asphaltmastix verwendet. Daraus wurden 16 verschiedene Mastixproben hergestellt, die alle einer Ermüdungsprüfung am dynamischen Scher-Rheometer unterzogen wurden. Ein Teil der Proben wurde auch gealtert oder den Auswirkungen von Feuchtigkeit ausgesetzt. Aus 7 Mastixmischungen wurde in Kombination mit vorbehandelten Gesteinsfraktionen Asphaltprobekörper hergestellt, welche einer Ermüdungsprüfung mittels 4PB unterzogen wurden. Dies ermöglichte die Betrachtung der Ermüdungseigenschaften auf beiden Ebenen.

## 8.1 Füllereigenschaften und Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix

Um die Auswirkungen des Füllers als Ausgangsmaterial auf die Ermüdungsfestigkeit der Asphaltmastix zu untersuchen, wurden Prüfungen zur Bestimmung der Reindichte, der sieblinienverwandten Kennwerte, der kornformverwandten Kennwerte, der spezifischen Oberfläche sowie des Hohlraumgehalts des trocken verdichteten Füllers durchgeführt. Zuzufolge der Ermüdungsfestigkeiten aus den Mastixversuchen und den oben genannten Füllerparametern wurden diverse Regressionsanalysen durchgeführt, um einflussreiche Parameter identifizieren zu können. Vor allem der **Hohlraumgehalt des trocken verdichteten Füllers (Hohlraumgehalt nach Rigden) hat einen deutlichen Zusammenhang mit der Ermüdungsbeständigkeit der Asphaltmastix**. Demnach wäre es sinnvoll, durch Erweiterung der Eingangsdaten, einen geeigneten Grenzwert zu definieren, welcher in Zukunft als Qualitätskriterium für den Füller herangezogen werden kann. Dazu wird empfohlen, eine **Reihenuntersuchung an einer größeren Stichprobe**

von gängigen Füllern durchzuführen, bei der der Hohlraumgehalt nach Ridgen bestimmt wird, sowie die Ermüdungsbeständigkeit der Mastix am DSR. Wird diese Prüfkampagne zum Teil als **Ringversuch** durchgeführt, können auch statistische Kennwerte zur Wiederhol- und Vergleichbarkeit ermittelt werden. Anschließend können Grenzwerte für Füller in Bezug auf Hohlraumgehalt nach Ridgen und dies auch **normativ im Rahmen einer RVS festgelegt** werden.

## 8.2 Zusammenhang Ermüdung auf Mastix- und Asphaltebene

Des Weiteren wurde auch der Zusammenhang der Ermüdungsprüfungen auf beiden Ebenen analysiert und Abhängigkeiten identifiziert. So lassen sich anhand von **Prüfergebnissen auf Mastixebene Prognosen zur Ermüdungsfestigkeit** der zugehörigen Asphaltebene abgeben. Die Korrelation basiert auf 20 untersuchten Mischgütern aus den FFG-Projekten BEDA und VEGAS. Dem zugrunde liegen 9 unterschiedliche zugesetzte Füller, 13 unterschiedliche Bitumensorten und 3 unterschiedliche grobe Gesteinsfraktionen die im Rahmen der beiden Projekte verwendet wurden. Positiv in die Prognoseformel geht der Ermüdungskennwert  $\tau_6$  der Asphaltmastix ein, wobei der Mittelwert des komplexen initialen Schubmoduls der Mastix, die Reindichte des Füllers und der Penetrationswert des Bitumens negativ in die Formel eingeht. Außerdem konnte durch die Prüfungen der **negative Einfluss der Alterung als auch eines feuchten Füllers** bestätigt werden. Da jedoch aufgrund der geringen Projektlaufzeit zu wenig Asphaltmischungen geprüft werden konnten, sollte in Zukunft die **Datenlage weiter verstärkt** werden, indem auch andere Mischgutkonzepte, wie AC 22 bin auf Asphalt- und Mastixebene geprüft werden. So kann die breite Anwendbarkeit geprüft und durch den zusätzlichen Pool an gewonnenen Daten die Prognosegenauigkeit verbessert werden. Auch hier ist im Anschluss eine **Festlegung von Grenzwerten** möglich, die, wenn sie erreicht werden, eine **Prognose der Asphaltermüdung auf Basis einfacher Ermüdungsversuche an der Mastix** erlauben.

Abschließend kann man festhalten, dass durch einfache Prüfungen am Füller die Ermüdungseigenschaften der Asphaltmastix mit hoher Zuverlässigkeit abschätzbar sind. Auch konnte ein Zusammenhang zwischen den Ermüdungsfestigkeiten der beiden Prüfebene abgeleitet werden, wodurch zeit- und materialaufwendige Prüfungen am 4PB in Zukunft durch ressourcenschonende Versuche am DSR vorvalidiert werden können.

## LITERATUR

1. Blab, R. and B. Hofko, *Anti-Aging Anforderungen an Asphalt*. GESTRATA Journal, 2012(135): p. 26-29.
2. Hospodka, M., B. Hofko, and R. Blab, *Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix - Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriteriums*. 2017, Technische Universität Wien. p. 100.
3. Schrader, J., L. Eberhardsteiner, and M. Arrigada, *Vereinfachung der prüftechnischen Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Asphalt, Angebot FFG Projekt 863063*. 2017. p. 47.
4. FSV, *RVS 08.97.05: Anforderungen an Asphaltmischgut*. 2015, Forschungsgesellschaft Straße-Schien-Verkehr: Vienna, Austria.
5. Wistuba, M. and J. Schrader, *Abschätzung der Performance von Asphalt anhand von Bitumenprüfungen*. 2019. **70**: p. 479-489.
6. FSV, *RVS 08.97.06: Anforderungen an Asphaltmischgut - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz*. 2013, Forschungsgesellschaft Straße-Schien-Verkehr: Vienna, Austria.
7. Hospodka, M., B. Hofko, and R. Blab, *Introducing a new specimen shape to assess the fatigue performance of asphalt mastic by dynamic shear rheometer testing*. Materials and Structures, 2018. **51**(2).
8. Johnson, C., H. Bahia, and A. Coenen. *Comparison of bitumen fatigue testing procedures measured in shear and correlations with four-point bending mixture fatigue*. in *Proceedings of the 2nd Workshop on Four Point Bending, Pais*. 2009. University of Minho.
9. Liao, M.-C., J.-S. Chen, and K.-W. Tsou, *Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012. **24**: p. 916-923.
10. Perez Jimenez, F., et al. *Relation between the fatigue behaviour of asphalt binders and bituminous mixtures*. in *Proceedings of the 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress*. 2008. Copenhagen, Denmark.
11. Shen, S., H.-M. Chiu, and H. Huang, *Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010. **22**(9): p. 846-852.
12. Soenen, H., C. De La Roche, and P. Redelius. *Predict mix fatigue tests from binder fatigue properties, measured with a DSR*. in *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress*. 2004. Vienna, Austria.
13. Hase, M., *Bindemittel und die Gebrauchseigenschaften von Asphalt, in Straße und Autobahn*. 2011. p. 612-617.
14. Poulidakos, L.D., et al., *Report Nr. 1434: Performance oriented requirements for bituminous mixtures*, V. 2006/503, Editor., Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen: Ittigen, Switzerland.
15. Schrader, J., *Einfluss der Bitumenqualität auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt (Masterarbeit)*, in *Institut für Straßenwesen*. 2016, Technische Universität Braunschweig: Braunschweig, Deutschland.
16. Schrader, J. *Von der Bitumen- zur Asphaltperformance*. in *Vortragsveranstaltung Straßenbau Aktuell: Asphalt-Performance bei Einsatz von Recycling-Baustoffen*. 2017. Braunschweig, Germany: Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen.
17. CEN, *EN 933-10: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen – Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung)*. 2009, Europäisches Komitee für Normung: Brüssel.

18. Little, D. and J. Petersen, *Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance-Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited*. Journal of Materials in Civil Engineering - J MATER CIVIL ENG, 2005. **17**.
19. Kim, Y.-R. and D. Little, *Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt Mastics*. Journal of Materials in Civil Engineering - J MATER CIVIL ENG, 2004. **16**.
20. Lesueur, D., et al., *On the impact of the filler on the complex modulus of asphalt mixtures*. Road Materials and Pavement Design, 2017: p. 1-15.
21. Lesueur, D. and D. Little, *Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture, and Aging of Bitumen*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1999. **1661**: p. 93-105.
22. Lesueur, D., J. Petit, and H.-J. Ritter, *The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: A state-of-the-art review*. Road Materials and Pavement Design, 2012. **14**: p. 1-16.
23. CEN, *EN12697-24: Asphalt - Prüfverfahren - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung*. 2015, Europäisches Komitee für Normung: Brussels.
24. CEN, *EN12697-26: Asphalt - Prüfverfahren - Teil 26: Steifigkeit*. 2015.
25. CEN, *EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration*. 2015, Europäisches Komitee für Normung: Brüssel.
26. CEN, *EN 12594: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Untersuchungsproben*. 2015, Europäisches Komitee für Normung: Brüssel.
27. DIN, *ISO 9277: Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption – BET-Verfahren*. 2014: Berlin, Germany.
28. CEN, *EN 1097-4: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller*. 2008, Europäisches Komitee für Normung: Brüssel.
29. AASHTO, *AASHTO TP 101-14: Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*. 2012, American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, D.C.
30. Hintz, C., et al., *Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification*. Transportation Research Record, 2011(2207): p. 99-106.
31. CEN, *EN12697-26: Asphalt - Prüfverfahren - Teil 26: Steifigkeit*. 2015, Europäisches Komitee für Normung: Brüssel.
32. CEN, *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren*. 2015, Europäisches Komitee für Normung: Brüssel.
33. Pfanner, M., *Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix - Auswirkungen des Füllers und der Alterung in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit*, in *Institute of Transportation*. 2020, TU Wien: Vienna, Austria. p. 67.
34. CEN, *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV)*. 2012, Europäisches Komitee für Normung: Brüssel.
35. Mirwald, J., et al., *Impact of Reactive Oxygen Species on Asphalt Binder Aging (Poster)*, in *TRB Annual Meeting 2020*. Washington.
36. Harvey, J. and B.-W. Tsai, *Effects of Asphalt Content and Air Void Content on Mix Fatigue and Stiffness*, in *Transport Research Record No. 1543*. 1996: Washington D. C., p. 38-45.
37. Leutner, R., P. Renken, and U. Lühje, *Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad (Schlussbericht)*, in *AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11239*. 2000: Braunschweig.

38. Lipke, S., et al., *Dimensionierungsrelevante Eingangsgrößen für Asphaltbefestigungen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1056. 2011, Bonn, Deutschland: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen.
39. Lackner, R., et al., *Multiscale modeling as the basis for reliable predictions of the behaviour of multi-composed materials*. Progress in Engineering Computational Technology, 2004. **8**: p. 153-187.
40. Blab, R. and J. Eberhardsteiner, *Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen*, in *Tätigkeitsbericht des Christian Doppler Labors 2006 bis 2007*. 2007, Technische Universität Wien, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung: Wien.
41. P., P. and E. F., *A Critical Analysis of Crack Propagation Laws*. Journal of Basic Engineering, 1963. **Vol. 85**(Issue 4): p. 528–533.
42. A., S.R., *Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media*. International Journal of Fracture, 1984. **Vol. 25**(Issue 3): p. 195–223.
43. Fussl, J. and R. Lackner, *Multiscale fatigue model for bituminous mixtures*. International Journal of Fatigue, 2011. **33**(11): p. 1435-1450.

## MEHRSKALENMODELLIERUNG

Durch ein mikromechanisches Mehrskalenmodell kann das Materialverhalten von Asphalt mittels volumetrischen Kenngrößen und mechanischen Eigenschaften des Bindemittels abgebildet werden. Ein makrohohogenes repräsentatives Volumenelement (RVE), das mit einem mikroheterogenen Körper gefüllt ist, beschreibt in der Kontinuums-Mikromechanik ein Material. Innerhalb des RVEs findet man eine komplizierte Mikrostruktur die mit Hilfe von Materialphasen mit bekannten physikalischen Eigenschaften, den quasi-homogenen Teilbereichen beschrieben werden kann. Durch das mechanische Verhalten, die volumetrischen Anteile sowie die charakteristische Form der Materialphasen und die Interaktion untereinander wird das homogenisierte mechanische Verhalten des gesamten Materials abgeschätzt. Die charakteristischen Abmessungen der einzelnen RVEs müssen jedoch wesentlich größer sein, als jene der Einschlüsse, und wesentlich kleiner sein als die Geometrie oder Belastung der aus dem Material aufgebauten Struktur.

Hat eine Materialphase wieder eine heterogene Mikrostruktur, so können wiederum repräsentative Volumenelemente in dieser Materialphase eingeführt werden, mit der das mechanische Verhalten abgeschätzt werden kann. Dadurch erhält man Homogenisierungsschemen mit mehreren Ebenen. Ein Homogenisierungsschema für Asphalt ist in Abbildung 43 dargestellt.

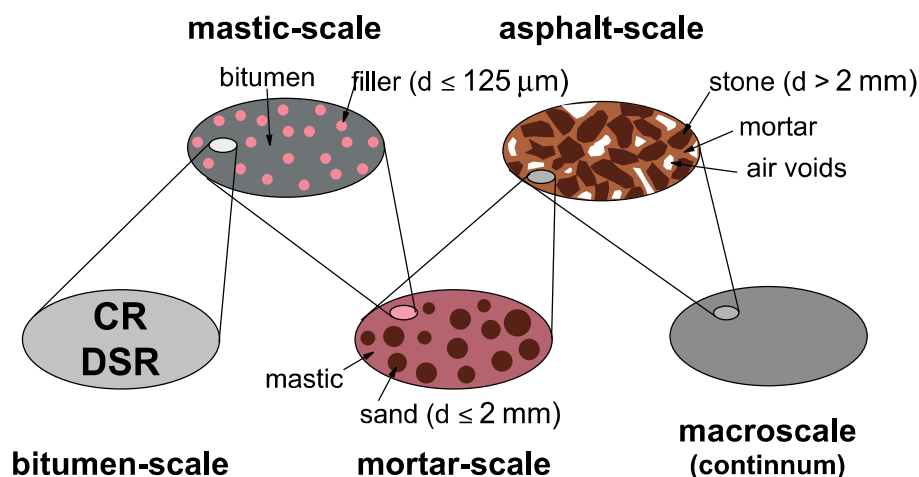
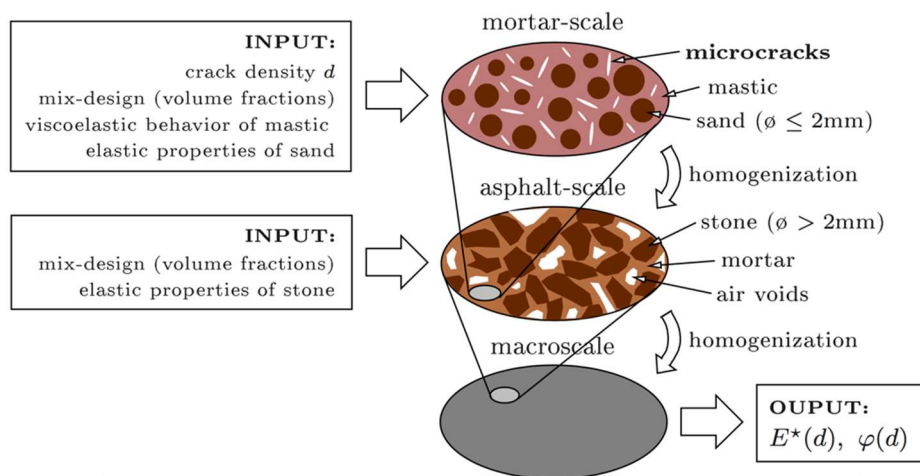


Abbildung 43: Mehrskalenmodell von Asphalt [39, 40]

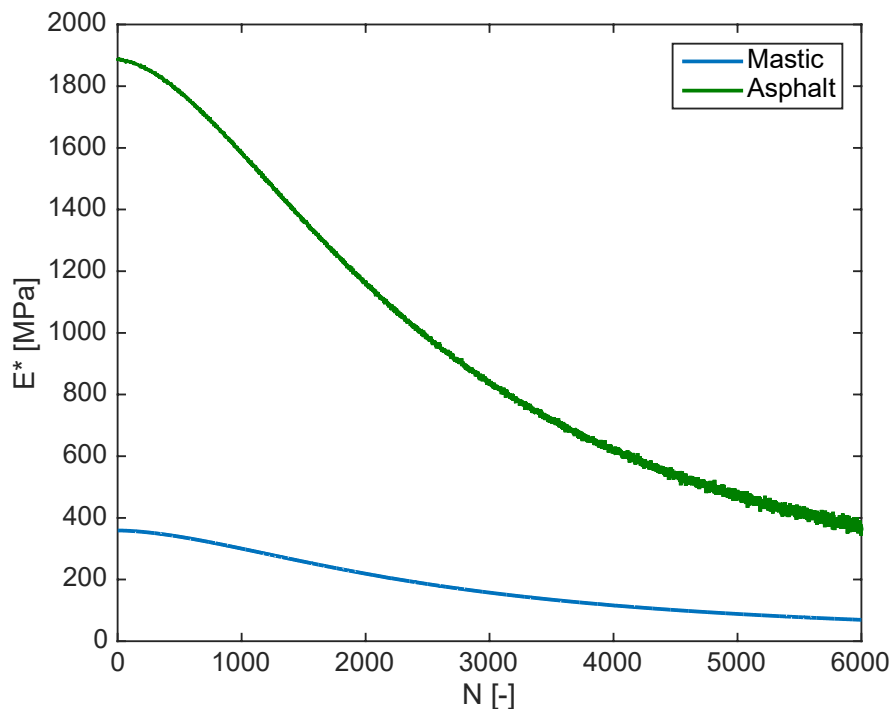
Für die Abbildung des Ermüdungsverhaltens mittels Homogenisierungsschemas wird von einer Mikrorissbildung auf Mastixebene ausgegangen. Durch zunehmende Anzahl an Lastwechsel führt dies zu einer Abnahme der Steifigkeit auf Asphaltenebene. Eine mögliche Umsetzung dieses Modellansatzes ist in Abbildung 44 dargestellt. Die Mikrorisse auf Mastixebene werden durch eine weitere Materialphase ohne Steifigkeit eingeführt. Bei der

Abbildung des Ermüdungsverhaltens im Sinne eines solchen, führt die zunehmende Anzahl an Lastwechsel zur Abnahme der Steifigkeit auf Asphaltenebene. Dabei werden Mikrorisse auf Mastixebene in Form einer weiteren Materialphase eingeführt, die keine Steifigkeit besitzt. Der volumenmäßige Zuwachs dieser Materialphase und somit der Mikrorisse wird durch ein auf den Ansätzen nach Paris [41, 42] basierendes Risswachstumsgesetz beschrieben. Mittels Kontinuumsmechanik kann über die Homogenisierung des Materialverhaltens von der Mastixebene zur Asphaltenebene der Abfall der Steifigkeit durch Ermüdung für jeden Lastwechsel beschrieben werden.



**Abbildung 44: Darstellung des Ermüdungsverhaltens im Mehrskalennmodell für Asphalt [43]**

Die viskoelastischen Kennwerte der Mastix als auch der Verlauf des komplexen Schubmoduls zufolge der wiederholenden Belastung durch die Ermüdungsprüfung am DSR (Ergebnisse aus rheologischen Prüfungen) dienen als Eingangsparameter für das Modell. Außerdem wird die volumetrische Zusammensetzung des Mischguts für das Modell verwendet. In Abbildung 45 ist der tatsächliche abnehmende Verlauf der Steifigkeit eines Ermüdungseinzelversuchs auf Mastixebene dargestellt. Dem gegenüber ist das Ergebnis der Homogenisierung des Ermüdungsverhaltens unter Zuhilfenahme der realen volumetrischen Zusammensetzung abgebildet. Man kann erkennen, dass mit zunehmender Lastwechselzahl die Steifigkeit des Asphalts deutlich abnimmt.



**Abbildung 45: Simuliertes Ermüdungsverhalten auf Asphaltebene zufolge Ergebnissen auf Mastixebene**

Abbildung 45 zeigt, dass die Simulation des Ermüdungsverhaltens auf Asphaltebene mittels Prüfungen auf Mastixebene möglich ist. Die Hochskalierung durch ein Mehrskalenmodell auf Basis der Kontinuumsmechanik ist somit möglich. Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Ermüdungsprüfungen auf Mastixebene konnten jedoch nicht für die Mehrskalenmodellierung herangezogen werden. Ursache dafür sind die unterschiedlichen Prüfparameter. Während Ermüdungsprüfungen am 4PB auf Asphaltebene dehnungsgesteuert bei einer Temperatur von +20°C erfolgen, werden Ermüdungsprüfungen auf Mastixebene spannungsgesteuert bei einer Temperatur von +10°C durchgeführt. Um den rechnerischen Brückenschlag zwischen den beiden Prüfmethoden herstellen zu können, Bedarf es noch weiterer Versuche auf Mastixebene. Diese Versuche konnten im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt werden, aber sind Ziel weiterer Forschung.



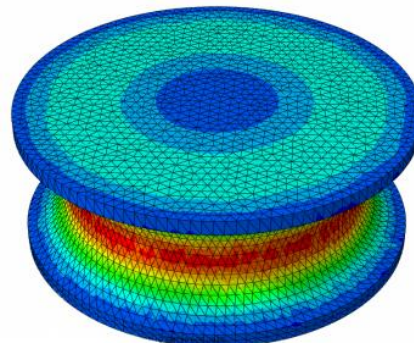
## ANHANG

<b>AA 314</b>	<b>GVO Asphaltprüfung</b> <b>Ermüdungsprüfung von Asphaltmastix</b>	Ausgabe 01.08.2018
		Seite 1 von 6

## AA 314 – GVO Asphaltprüfung Ermüdungsprüfung von Asphaltmastix

### Inhalt

1	Beschreibung.....	2
1.1	Normative Grundlage .....	2
1.2	Kurzbeschreibung.....	2
1.3	Begriffe .....	2
1.4	Prüfgeräte und Hilfsmittel .....	3
2	Vorbereitung der Asphaltmastixprobe .....	3
3	Vorbereitung des Mastixprobekörpers.....	3
3.1	Interne Probenvorbereitung.....	4
3.2	Externe Probenvorbereitung.....	4
4	DSR Prüfparameter .....	5
5	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse .....	6
6	Mitgeltende Unterlagen und Normen.....	6



SB	AGL	QMB	LL	Ausgabe	01.08.2018
				Datum	01.08.2018

## 1 BESCHREIBUNG

### 1.1 Normative Grundlage

Für diese Arbeitsanweisung ist noch keine normative Grundlage verfügbar.

### 1.2 Kurzbeschreibung

Das Prüfverfahren zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Asphaltmastix umfasst folgende Arbeitsschritte:

- (1) Ggfs. Extraktion des Feinanteils durch Herauslösen mit heißem Lösungsmittel (AA 401)
- (2) Herstellen einer Mastixmischung mit einem Referenzbitumen (dzt. nicht festgelegt)
- (3) Durchführung der Ermüdungsprüfungen am DSR

### 1.3 Begriffe

Füller: Der Füller ist jener Teil der Gesteinskörnung, dessen überwiegender Teil durch ein 0,063 mm Sieb hindurchgeht und ist damit als Korngruppe definiert. Füller wird in „Fremdfüller“ und „Mischfüller“ unterschieden. Beide sind mineralischen Ursprungs und werden getrennt von den anderen Gesteinskörnungen hergestellt. Mischfüller wird zusätzlich Kalkhydrat  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zur Verbesserung der Eigenschaften beigemischt.

Feinanteile: Als Feinanteile werden jene Bestandteile der groben und feinen Gesteinskörnung bezeichnet, die durch ein 0,125 mm Sieb hindurchgehen. Es handelt sich dabei einerseits um die Bestandteile der Korngruppe 0/2 und andererseits um die anhaftenden Feinanteile der gröberen Korngruppen (Unterkorn). Der Begriff „Eigenfüller“ ist eine nach wie vor gängige Bezeichnung, jedoch nicht mehr normgemäß.

Asphaltmastix: Als Asphaltmastix oder kurz „Mastix“, wird die Mischung aus Bitumen und Füller bzw. Feinanteile bezeichnet. Die Komponente Mastix wirkt als verbindendes Glied zwischen den groben Gesteinskörnern und ist daher maßgebend für den Zusammenhalt. Das Größtkorn ist für die Komponente Mastix nicht normativ festgelegt, hat jedoch einen maßgebenden Einfluss auf die Ermüdungsprüfung. Daher ist im Zuge dieser Arbeitsanweisung das Größtkorn mit 0,125 mm definiert.

## 1.4 Prüfgeräte und Hilfsmittel

- (1) Maschensieb 0,125 mm oder Luftstrahlsieb 0,125 mm
- (2) Trockenschrank
- (3) Präzisionswaage
- (4) Probenbehälter 150 ml
- (5) Glas-/Metallstab
- (6) Dynamisches Scherrheometer
- (7) Silikonform

## 2 VORBEREITUNG DER ASPHALTMASTIXPROBE

Mittels Maschen- oder Luftstrahlsieb ausgesiebte Feinanteile können direkt, ohne weiteren Vorbereitungsschritt zur Mischung von Asphaltmastix verwendet werden. Füllerproben (Korngruppe!) sind zuvor auf ein Größtkorn von 0,125 mm auszusieben.

- (1) Der zu mischende Füller ist für 1 h im Trockenschrank auf 180 °C zu erwärmen. Um rasches Auskühlen zu verhindern, ist es empfehlenswert, die benötigte Füllermenge bereits im Mischbehälter einzuwiegen und zu erwärmen. Mischungsverhältnis Bitumen:Füller = 1:1.5, insgesamt mindestens 25 g ( $10 \pm 0,1$  g Bitumen und  $15 \pm 0,1$  g Füller).
- (2) Bitumen auf 180 °C erhitzen (Trockenschrank oder Alternative). Vor Zugabe zum Füller durch Umrühren mit einem Glas-/Metallstab oder Thermometer homogenisieren.
- (3) Ohne weiterer Erwärmung das Bitumen mit Hilfe einer Waage dem Füller zudosieren (bzw. umgekehrt) und für  $5 \pm 0,5$  min händisch einrühren (2 U/s).

## 3 VORBEREITUNG DES MASTIXPROBEKÖRPERS

Es sind 2 Arten der Probekörpervorbereitung möglich:

- (1) externe und
- (2) interne Probekörpervorbereitung.

Die externe Probekörpervorbereitung wurde nur im Zuge von Vorversuchen getestet und diese ergaben die Gefahr von Lufteinschlüssen im Probekörper. Empfohlen wird daher die interne Probekörpervorbereitung.

### 3.1 Interne Probenvorbereitung

- (1) Die Silikonform ohne Versatz zusammenfügen, mit einem Gummiring sichern und in das Rheometer einlegen.
- (2) Die Messgeometrie (PP08) ist auf einen Spalt von 3 mm einzustellen. Die Temperierhaube ist abzusenken und das Rheometer für 10 min auf 120 °C vorzuwärmen.
- (3) Eine Mastixprobe von etwa 3 g ist aus dem erkalteten Probenbehälter zu entnehmen und für max. 15 min auf 180 °C zu erwärmen.
- (4) Die Mastixprobe ist zu homogenisieren und schmelzflüssig in die Silikonform einzubringen und dabei geringfügig zu überfüllen.
- (5) Die Messgeometrie ist auf einen Spalt von 3 mm einzustellen und die Temperierhaube abzusenken. Dieser Schritt ist möglichst schnell nach dem Eingießen durchzuführen.
- (6) Rheometer für 10 min auf 10 °C temperieren (10 min ab dem Zeitpunkt, sobald das Rheometer 10 °C anzeigt).
- (7) Überschüssige Mastix kann entfernt werden (Trimmen) – nicht zwingend notwendig, da der Überschuss keinen Einfluss auf die Ermüdungsprüfung hat – und die Silikonform entnehmen. Aufgrund der durchschnittlichen Silikonform entsteht ein geringfügiger Grat am Probekörper. Dieser hat auf die Prüfung keinen Einfluss.
- (8) Wiederrum die Temperierhaube absenken und für 15 min auf 10 °C temperieren.
- (9) Prüfung starten

### 3.2 Externe Probenvorbereitung

- (1) Die Silikonform ohne Versatz zusammenfügen, mit einem Draht oder Silikongummiring sichern und den Bodenteil aufstecken.
- (2) Für das Einbringen der Mastixprobe sind zwei Varianten möglich:
  - a. Etwa 3 g sind aus dem erkalteten Probenbehälter zu entnehmen und für max. 15 min auf 180 °C zu erwärmen, homogenisieren und einzubringen,  
oder
  - b. die benötigte Menge (vorläufig 0,15 g) ist aus dem erkalteten Probenbehälter zu entnehmen und kalt in die Silikonform einzubringen. Die Silikonform ist anschließend im Wärmeschrank bei 160 °C und für maximal 15 min zu temperieren. Wichtig: Der Mastixprobekörper muss luftblasenfrei hergestellt werden (kann durch vorsichtiges Klopfen beschleunigt werden)!

<b>AA 314</b>	<b>GVO Asphaltprüfung</b> <b>Ermüdungsprüfung von Asphaltmastix</b>	Ausgabe 01.08.2018
		Seite 5 von 6

Für beide Varianten gilt: Die, mit Mastix befüllten Silikonformen sind zunächst auf Raumtemperatur und anschließend im Kühlschrank bei etwa 5-7 °C bis zur Prüfung im DSR zu lagern (max. 72 h).

- (3) Das Bodenteil der Silikonformen ist zu entfernen und die Silikonform ist in das DSR bei Raumtemperatur einzulegen.
- (4) DSR auf 130 °C temperieren und den Rotor sorgfältig bis zur Berührung der Mastixoberfläche annähern. Der Rotor schmilzt dabei die Mastix an und dann ist in mehreren kleinen Schritten die Probenhöhe von 3 mm zu einzustellen und die Temperatur von 120 °C ist für weitere 30 s zu halten (sicherer Verbund mit den Platten).
- (5) Rheometer für 10 min auf 10 °C temperieren (10 min ab dem Zeitpunkt, sobald das Rheometer 10 °C anzeigt).
- (6) Überschüssige Mastix kann entfernt werden (Trimmen) – nicht zwingend notwendig, da der Überschuss keinen Einfluss auf die Ermüdungsprüfung hat – und die Silikonform entnehmen. Aufgrund der durchschnittlichen Silikonform entsteht ein geringfügiger Grat am Probekörper. Dieser hat auf die Prüfung keinen Einfluss.
- (7) Wiederrum die Temperierhaube absenken und für 15 min auf 10 °C temperieren.
- (8) Prüfung starten

#### 4 DSR PRÜFPARAMETER

- (1) Messpunkt: alle 10 s (8640 Messpunkte für 24 h Messdauer)
- (2) Abbruchkriterium empfohlen ( $|G^*| < 1$  kPa oder Alternative falls nicht möglich)
- (3) Normalspannung nicht vorgeben!
- (4) Frequenz: 30 Hz
- (5) Temperatur: 10 °C
- (6) Amplitude: 3 unterschiedliche Spannungen zur Erstellung einer Wöhlerkurve
- (7) Schubspannung: Die Schubspannung sollte im linear-viskoelastischen Bereich gewählt werden. Diese ist an einem Probekörper mittels Amplituden-Sweep mit dem Kriterium 95 %  $G'$  zu ermitteln.

## 5 AUSWERTUNG UND DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Das Ergebnis einer einzigen Ermüdungsprüfung ist beispielhaft in Abbildung 1 links dargestellt. Mittels Durchführung der Ermüdungsprüfung bei mehreren Schubspannungsniveaus, kann aus den gemessenen Ermüdungsfestigkeiten eine Wöhlerkurve erstellt werden. Mit Hilfe der Wöhlerkurve können unterschiedliche Feinanteile bzw. Mastixproben verglichen werden.

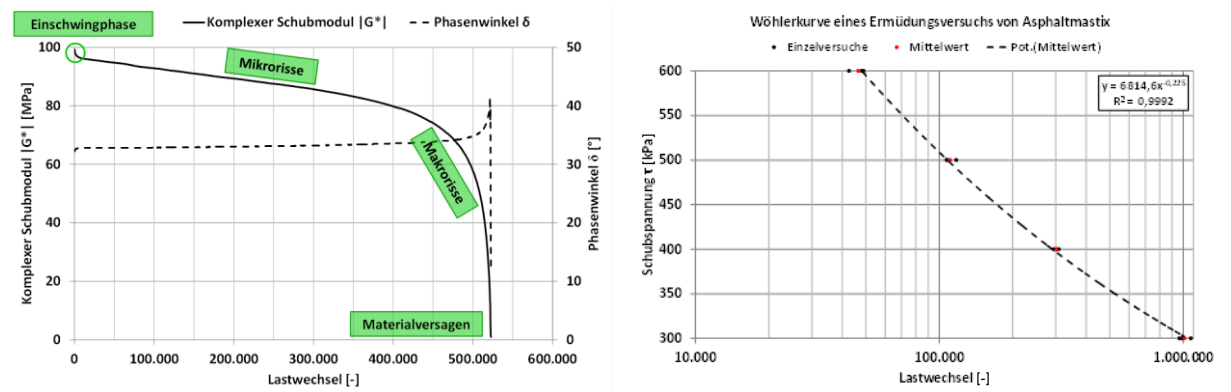


Abbildung 1: Ermüdungsprüfung links, Wöhlerkurve rechts

## 6 MITGELTENDE UNTERLAGEN UND NORMEN

Derzeit noch keine gültige Norm verfügbar.



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	13.11.2019
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M11 / MX0025	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F01
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

**Prüfergebnisse**

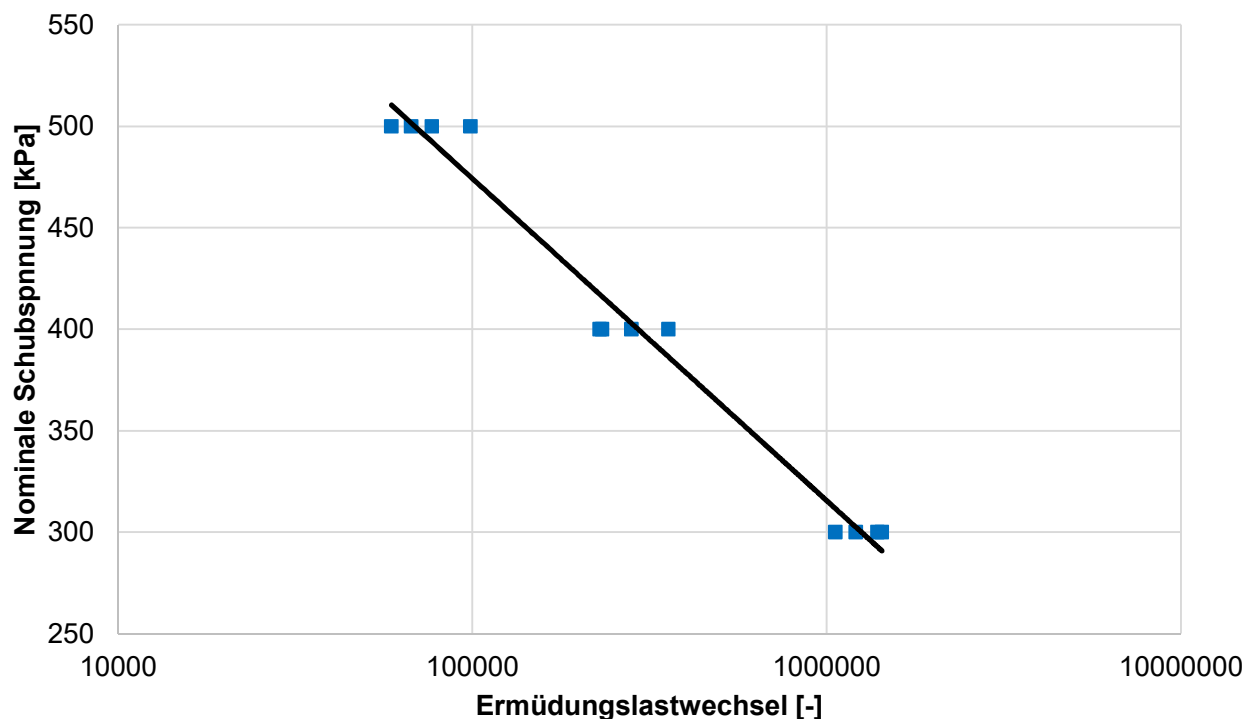
Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	182,98	32,35	1.390.800
2	300	177,63	32,74	1.432.800
3	300	188,71	31,31	1.209.000
4	300	161,43	32,58	1.059.000
5	400	166,88	33,44	357.300
6	400	155,72	33,50	280.800
7	400	146,08	33,68	232.200
8	400	152,15	33,56	228.900
9	500	157,05	34,82	67.200
10	500	163,19	34,88	98.700
11	500	153,94	34,31	76.800
12	500	144,74	35,08	59.100
13				
14				

Anmerkungen:



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -68,9 * \ln(x) + 1267,5$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,98
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	315,55
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	162,54
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	33,52
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	15.11.2019
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M12 / MX0026	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F02
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

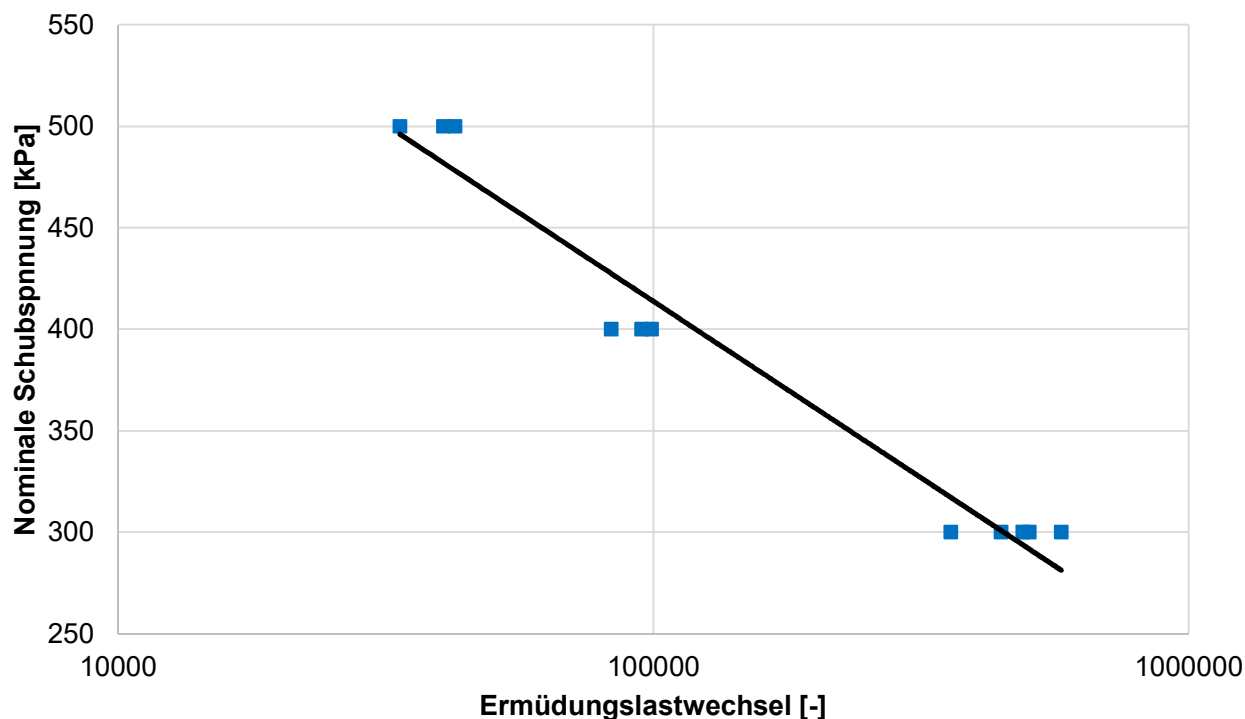
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	134,29	35,52	359.400
2	300	137,55	34,99	489.600
3	300	138,56	34,70	578.100
4	300	134,98	34,30	446.400
5	300	129,06	34,04	504.000
6	400	123,05	36,27	95.100
7	400	122,43	36,48	83.400
8	400	126,48	35,52	99.300
9	500	137,49	37,69	40.500
10	500	128,78	37,39	33.600
11	500	132,29	36,39	42.600
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -75,5 * \ln(x) + 1283$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	239,87
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	131,36
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	35,75
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	04.12.2019
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M13 / MX0027	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F03
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

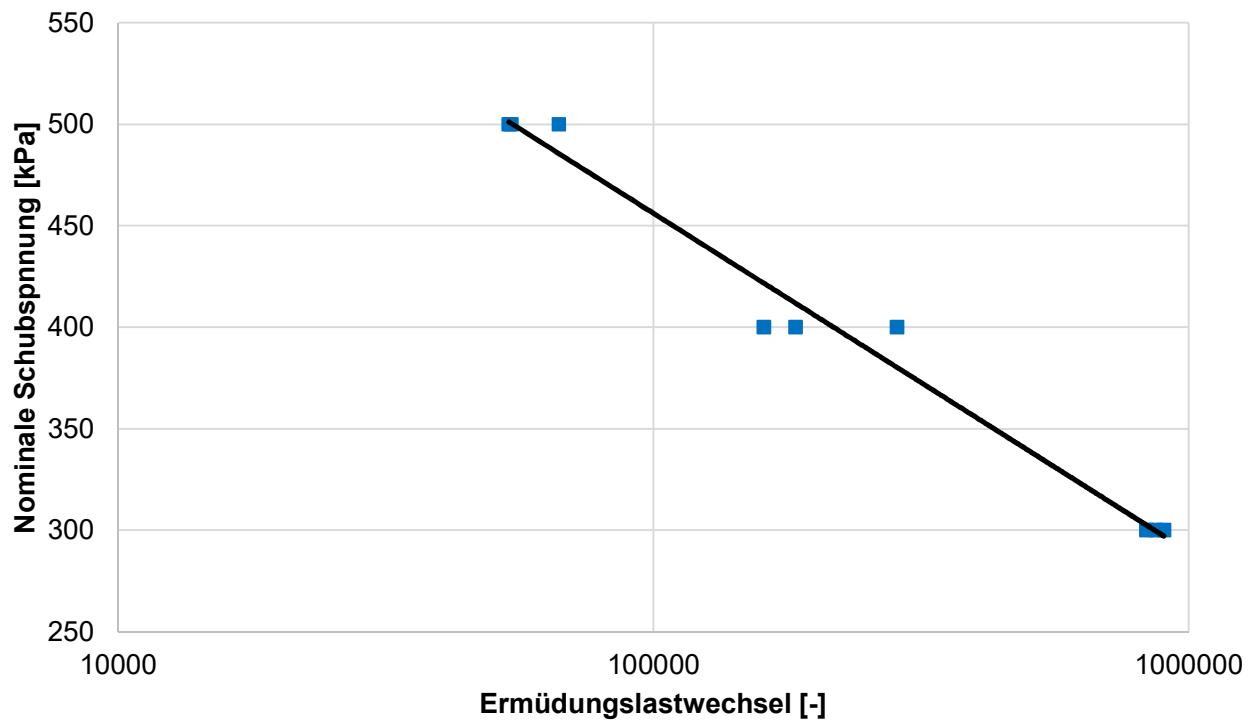
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	121,25	33,45	833.400
2	300	121,01	33,75	899.100
3	300	121,93	33,00	867.300
4	400	110,95	35,09	184.200
5	400	120,88	34,55	285.300
6	400	116,70	34,45	160.800
7	500	113,45	36,22	54.300
8	500	120,17	35,79	53.700
9	500	117,88	35,82	66.600
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -72,42 * \ln(x) + 1289,8$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,98
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	289,36
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	118,25
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	34,68
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	21.11.2019
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M14	/	MX0028	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100			Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273				

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

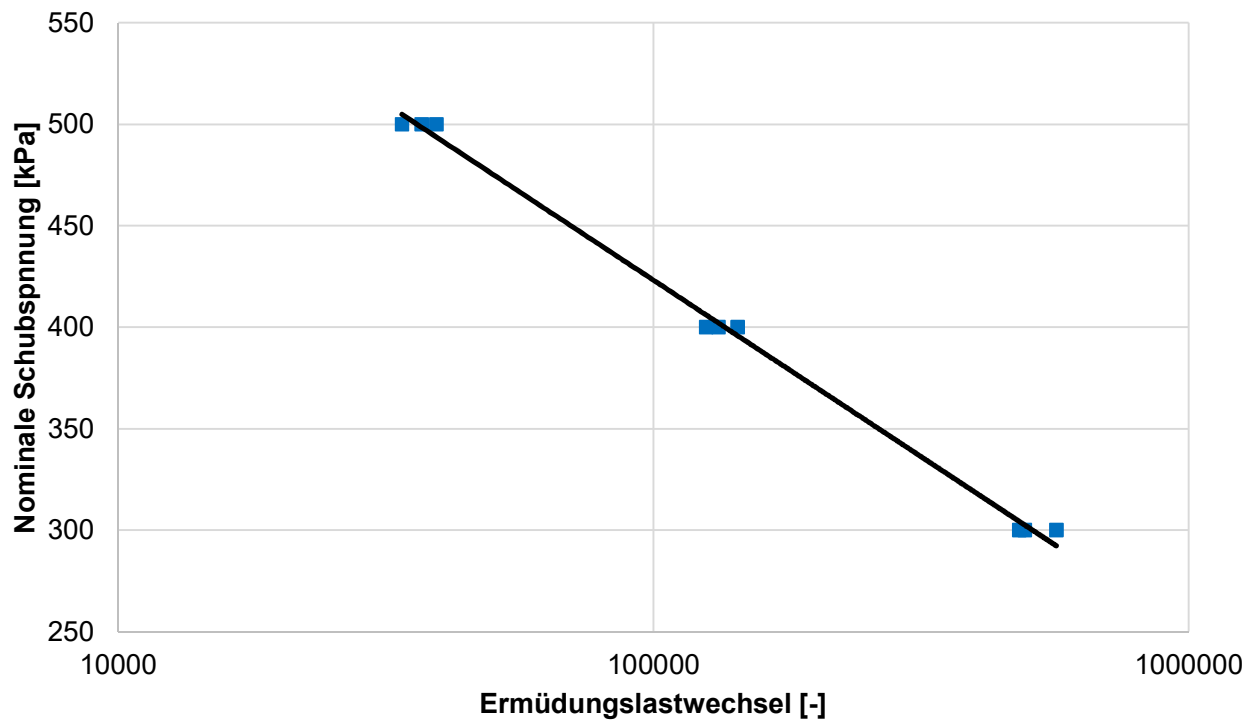
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	116,20	35,66	494.100
2	300	120,14	35,14	566.100
3	300	123,12	34,80	482.700
4	400	117,66	36,60	143.700
5	400	111,92	36,21	132.300
6	400	114,65	35,85	125.400
7	500	106,09	38,55	33.900
8	500	107,36	38,24	39.300
9	500	107,57	37,89	36.900
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -75,51 * \ln(x) + 1292,5$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	1,00
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	249,30
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	113,86
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	36,55
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	10.12.2019
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M15 / MX0029	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F05
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

**Prüfergebnisse**

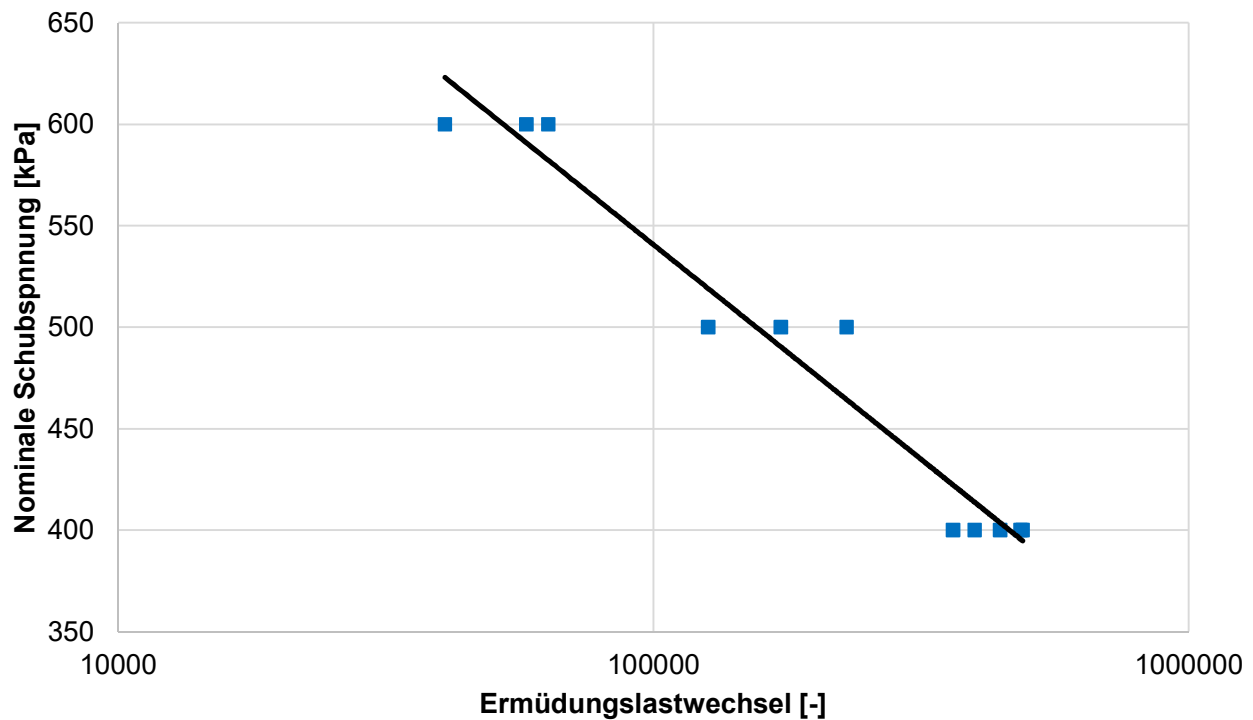
Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	178,15	32,64	489.900
2	400	149,83	33,52	362.700
3	400	159,33	33,11	398.100
4	400	167,51	32,85	444.300
5	400	172,58	32,39	485.400
6	500	174,09	34,56	173.100
7	500	183,56	34,07	229.500
8	500	145,72	35,76	126.600
9	600	153,60	35,03	63.600
10	600	134,59	36,35	40.800
11	600	152,40	35,78	57.900
12				
13				
14				

Anmerkungen:



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -91,85 * \ln(x) + 1598,1$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	329,20
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	161,03
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	34,19
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	18.03.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M16 / MX0030	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F06
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

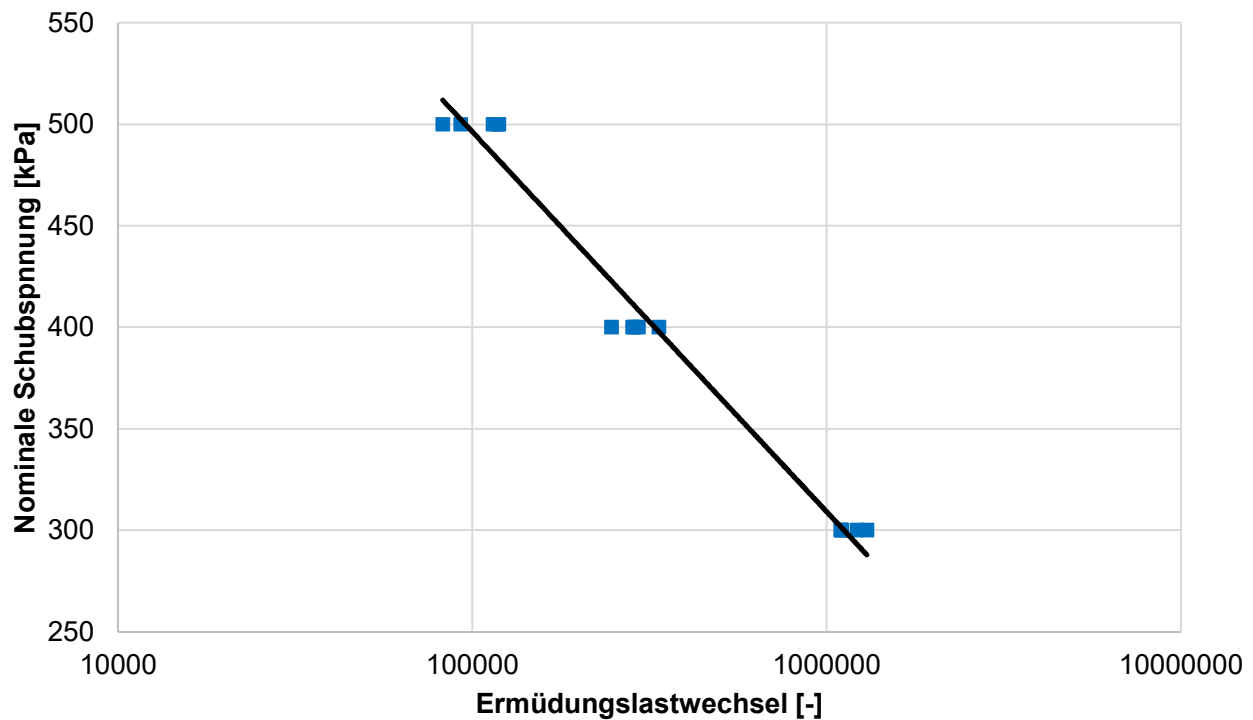
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	139,09	34,00	1.298.400
2	300	132,88	33,42	1.102.500
3	300	128,13	34,18	1.104.600
4	300	138,80	32,63	1.095.000
5	300	142,08	32,69	1.221.000
6	400	131,89	35,38	294.600
7	400	122,73	35,40	287.100
8	400	125,82	34,91	283.200
9	400	137,29	34,56	336.000
10	400	131,03	34,17	247.200
11	500	130,41	36,30	118.800
12	500	123,63	36,41	114.300
13	500	117,67	36,53	82.500
14	500	128,70	35,39	92.700

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -81,27 * \ln(x) + 1431,9$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,98
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	309,09
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	131,04
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	34,74
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	10.02.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M21 / MX0031	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F01
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

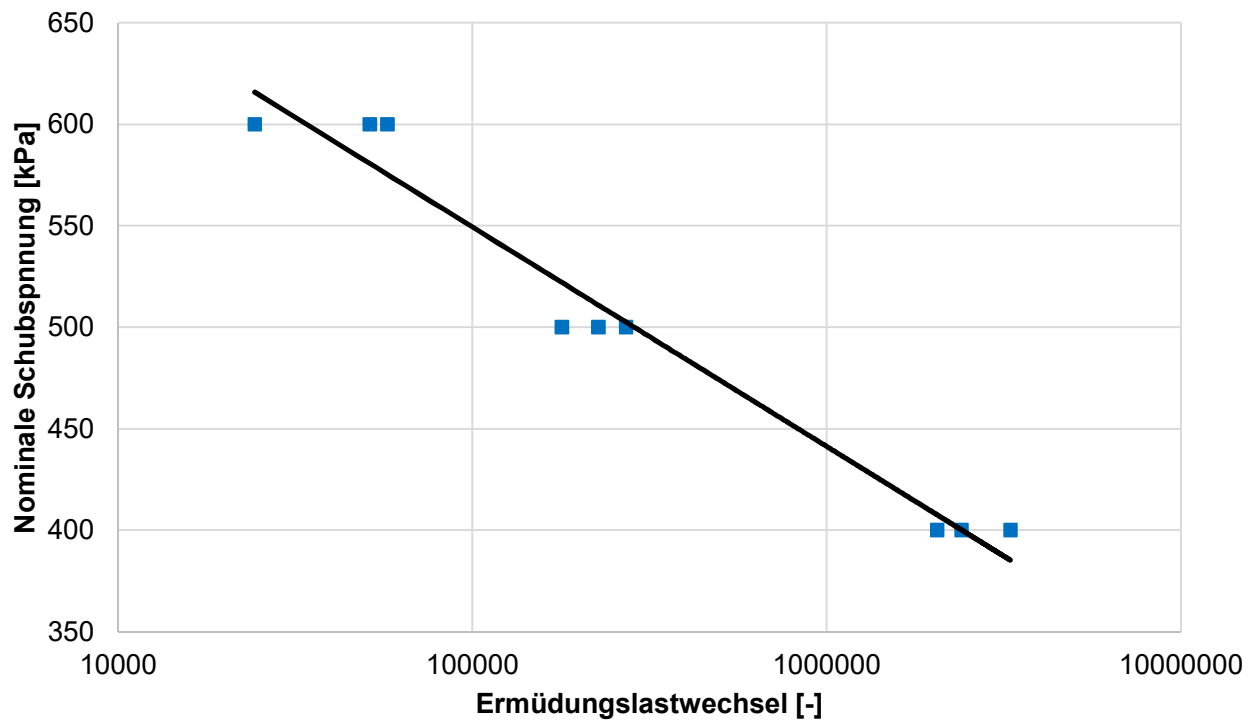
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	86,66	37,71	2.403.600
2	400	94,66	37,43	3.300.000
3	400	89,64	37,58	2.050.800
4	500	85,52	39,52	226.800
5	500	82,11	39,69	179.100
6	500	83,16	39,54	271.500
7	600	70,94	42,26	24.300
8	600	83,83	41,28	57.600
9	600	82,83	41,32	51.300
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -46,94 * \ln(x) + 1089,8$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	441,27
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	75,25
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	39,59
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	22.04.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M22 / MX0032	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F02
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

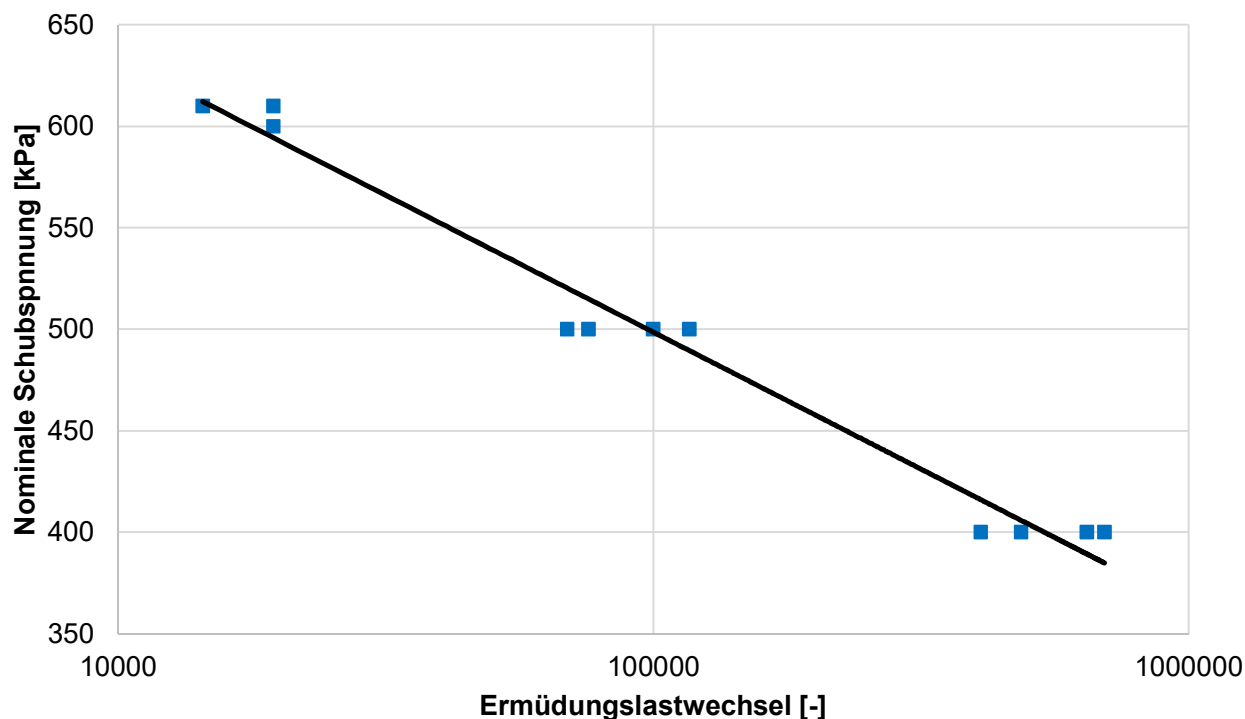
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	74,49	38,61	408.600
2	400	77,05	38,66	486.300
3	400	78,78	38,53	696.000
4	400	81,35	38,07	645.000
5	500	75,63	40,35	99.900
6	500	71,91	40,77	75.600
7	500	67,05	41,53	69.000
8	500	72,48	40,53	116.700
9	600	69,14	42,92	19.500
10	610	64,56	43,69	19.500
11	610	60,64	43,65	14.400
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -58,6 * \ln(x) + 1173,2$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,98
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	363,60
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	72,10
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	40,66
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	03.07.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M23 / MX0033	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F03
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

**Prüfergebnisse**

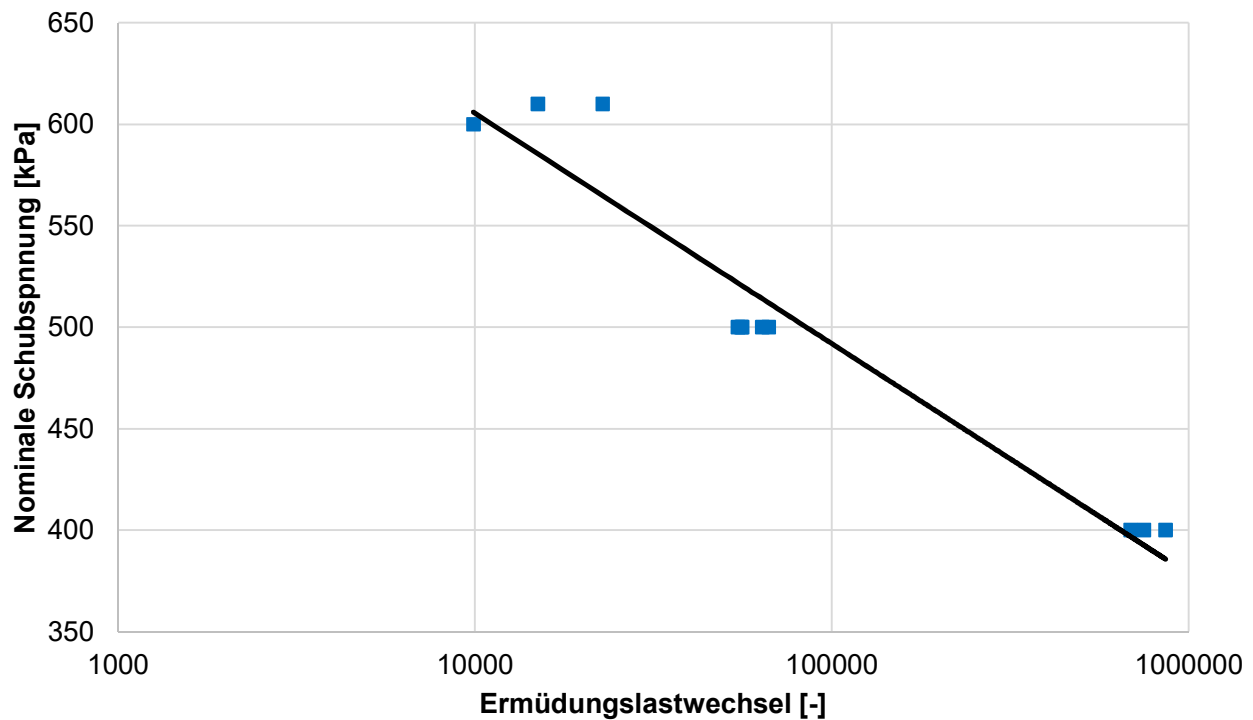
Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	74,15	38,62	861.300
2	400	70,60	38,98	750.000
3	400	69,32	38,84	687.000
4	500	59,58	41,97	56.100
5	500	61,62	41,95	63.900
6	500	58,26	42,47	55.800
7	500	60,77	41,96	66.600
8	500	57,61	42,23	54.600
9	610	60,37	44,06	22.800
10	610	57,05	43,85	15.000
11	600	50,45	45,56	9.900
12				
13				
14				

Anmerkungen:



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -49,3 * \ln(x) + 1059,5$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,93
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	378,38
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	61,80
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	41,86
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	22.11.2019
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M24 / MX0034	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

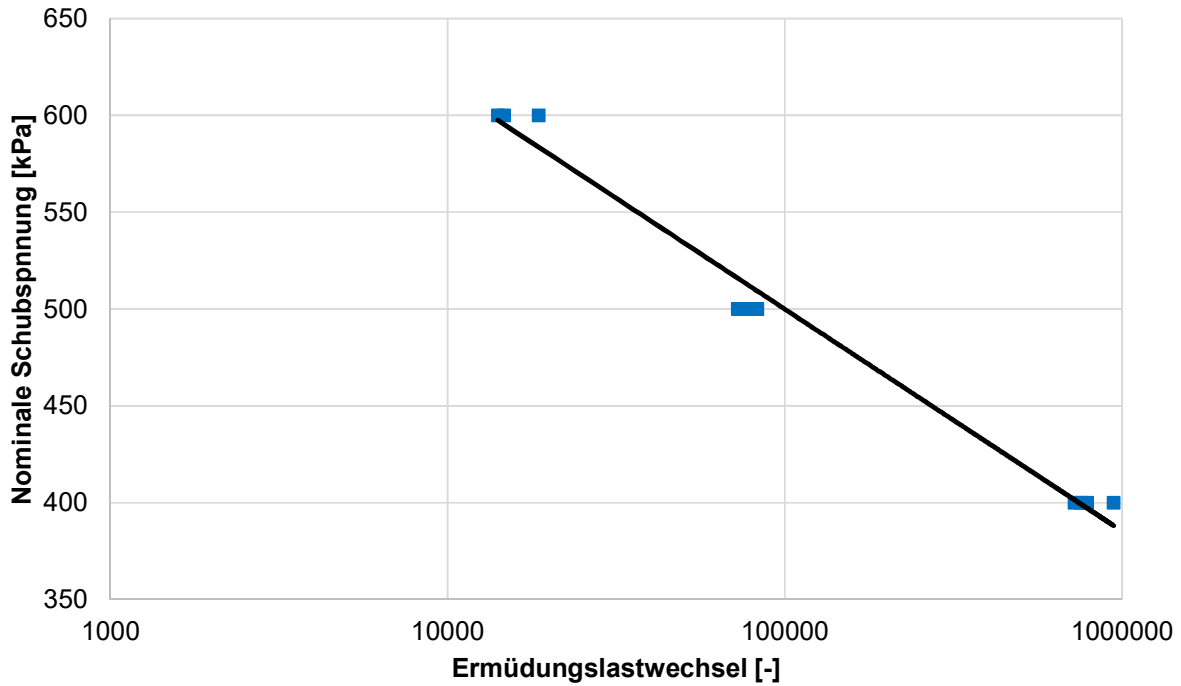
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	66,57	39,77	723.600
2	400	64,59	39,99	788.700
3	400	67,48	39,63	756.000
4	400	66,32	39,74	944.700
5	500	57,39	42,84	82.800
6	500	56,12	42,77	78.000
7	500	54,80	43,42	72.600
8	600	49,96	45,50	14.100
9	600	51,22	45,51	14.700
10	600	53,93	44,78	18.600
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:

Prüfergebnisse

Wöhlerkurve



Wöhlerkurve	$y = -49,79 * \ln(x) + 1073,1$
R <sup>2</sup> [-]	0,99
τ <sub>6</sub> [kPa]	385,31
G* <sub>initial</sub> [MPa]	58,84
δ <sub>initial</sub> [°]	42,40
F/B [-]	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	04.12.2019
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M25 / MX0035	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F05
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

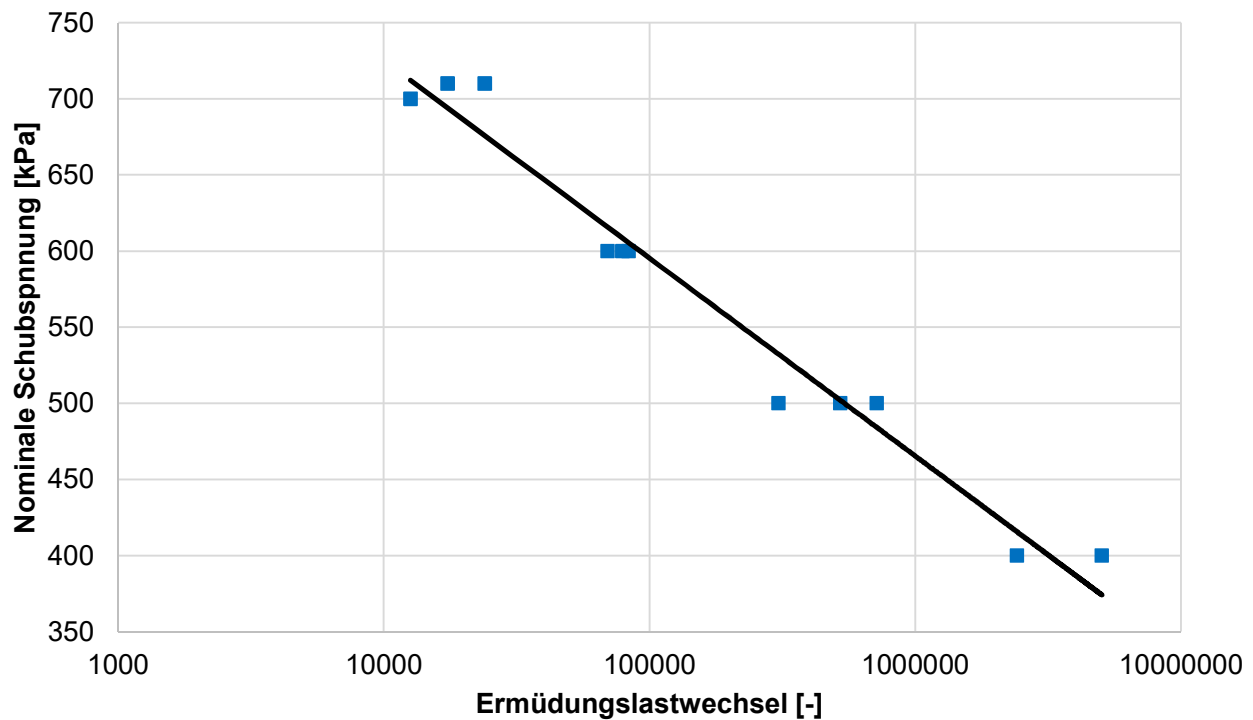
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	78,56	40,14	2.412.000
2	400	78,07	40,39	5.040.000
3	500	74,22	42,20	717.000
4	500	68,37	43,03	306.000
5	500	76,38	41,89	522.000
6	600	64,14	45,45	79.200
7	600	62,57	45,32	83.400
8	600	62,64	45,42	69.600
9	700	54,73	48,19	12.600
10	710	58,18	47,57	24.000
11	710	57,45	47,74	17.400
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -56,41 * \ln(x) + 1244,8$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,97
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	465,40
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	66,85
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	44,30
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	02.04.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M26 / MX0036	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F06
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

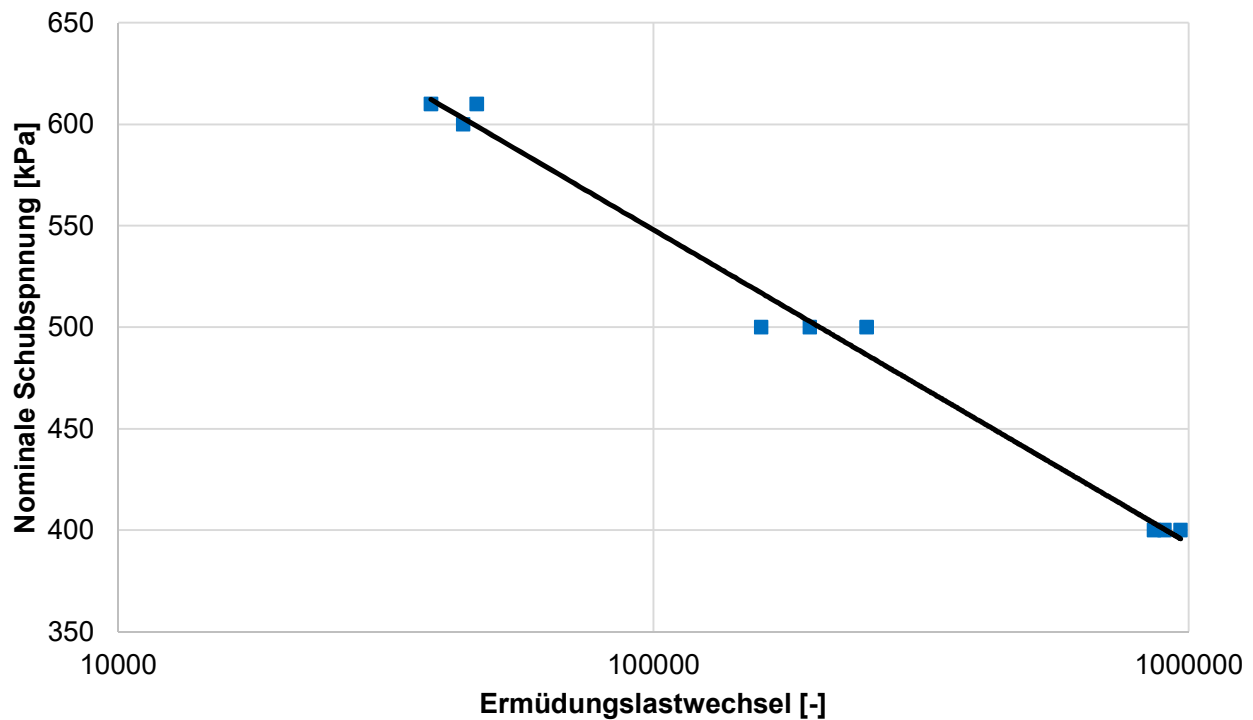
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	71,51	39,52	901.200
2	400	73,47	39,18	861.000
3	400	77,06	38,72	966.000
4	500	70,22	40,77	159.000
5	500	70,24	41,24	195.900
6	500	72,52	40,78	250.200
7	600	65,77	43,28	44.100
8	610	64,09	43,29	38.400
9	610	64,77	43,46	46.800
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



Wöhlerkurve	$y = -67,12 * \ln(x) + 1320,7$
R <sup>2</sup> [-]	0,99
τ <sub>6</sub> [kPa]	393,45
G*  <sub>initial</sub> [MPa]	69,96
δ <sub>initial</sub> [°]	41,14
F/B [-]	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	28.05.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M31 / MX0042	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-75	Füller	F01
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

**Prüfergebnisse**

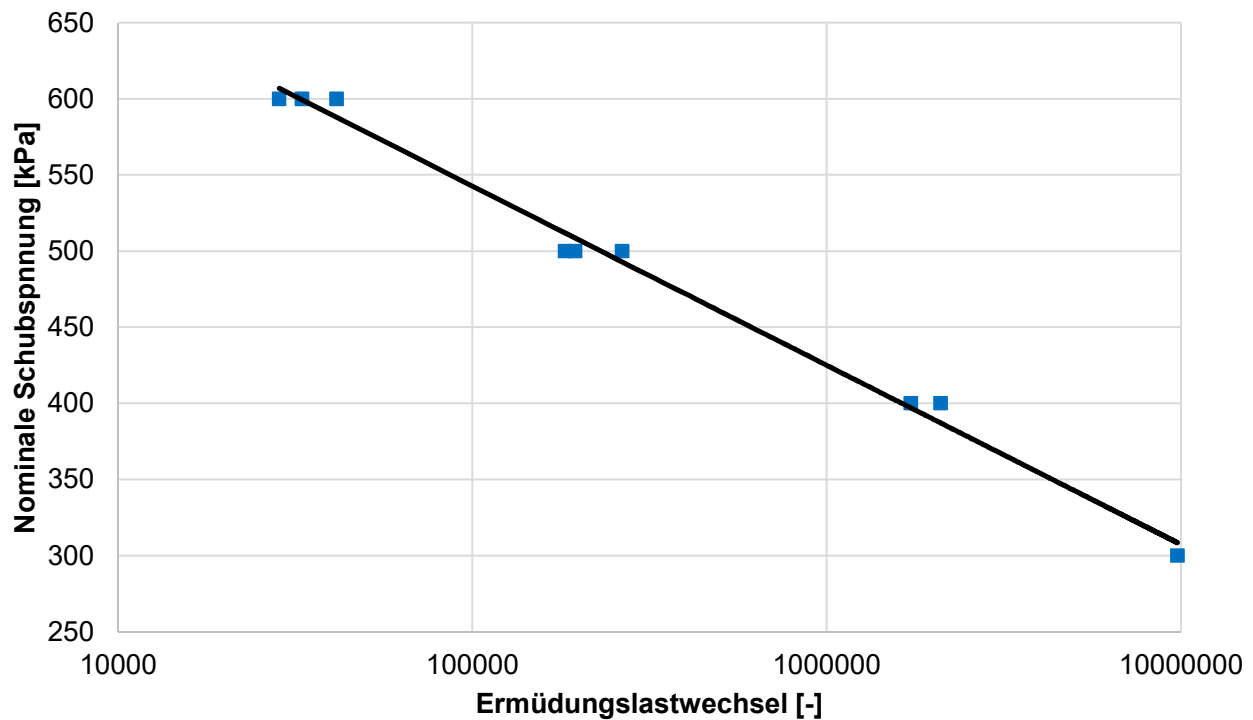
Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	120,78	32,88	9.777.000
2	400	103,42	34,55	1.726.500
3	400	111,34	34,54	2.096.700
4	500	99,35	36,25	195.000
5	500	106,95	36,02	264.600
6	500	98,84	36,41	182.400
7	600	83,22	39,50	28.500
8	600	91,07	38,36	41.400
9	600	85,31	39,08	33.000
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -51,12 * \ln(x) + 1131,2$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,99
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	424,97
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	100,03
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	36,40
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	19.05.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M34 / MX0041	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-75	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

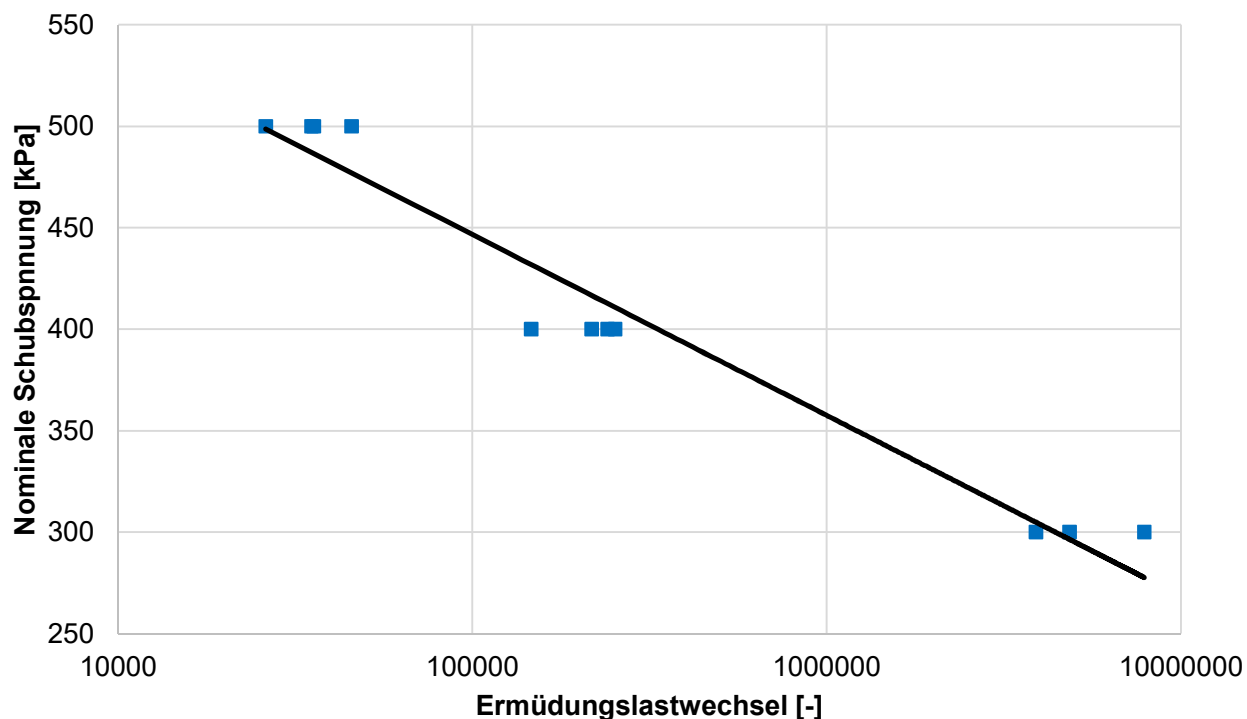
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	52,44	40,13	4.848.000
2	300	54,50	39,72	7.881.000
3	300	51,11	40,38	3.900.000
4	400	47,07	42,41	253.200
5	400	47,93	41,90	217.200
6	400	48,18	42,15	240.600
7	400	42,63	43,33	146.700
8	500	40,85	45,01	26.100
9	500	45,71	43,69	45.600
10	500	41,95	44,72	35.100
11	500	40,89	45,48	35.700
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -38,69 * \ln(x) + 892,1$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	357,54
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	46,66
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	42,63
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	03.07.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M35 / MX0043	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-75	Füller	F05
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

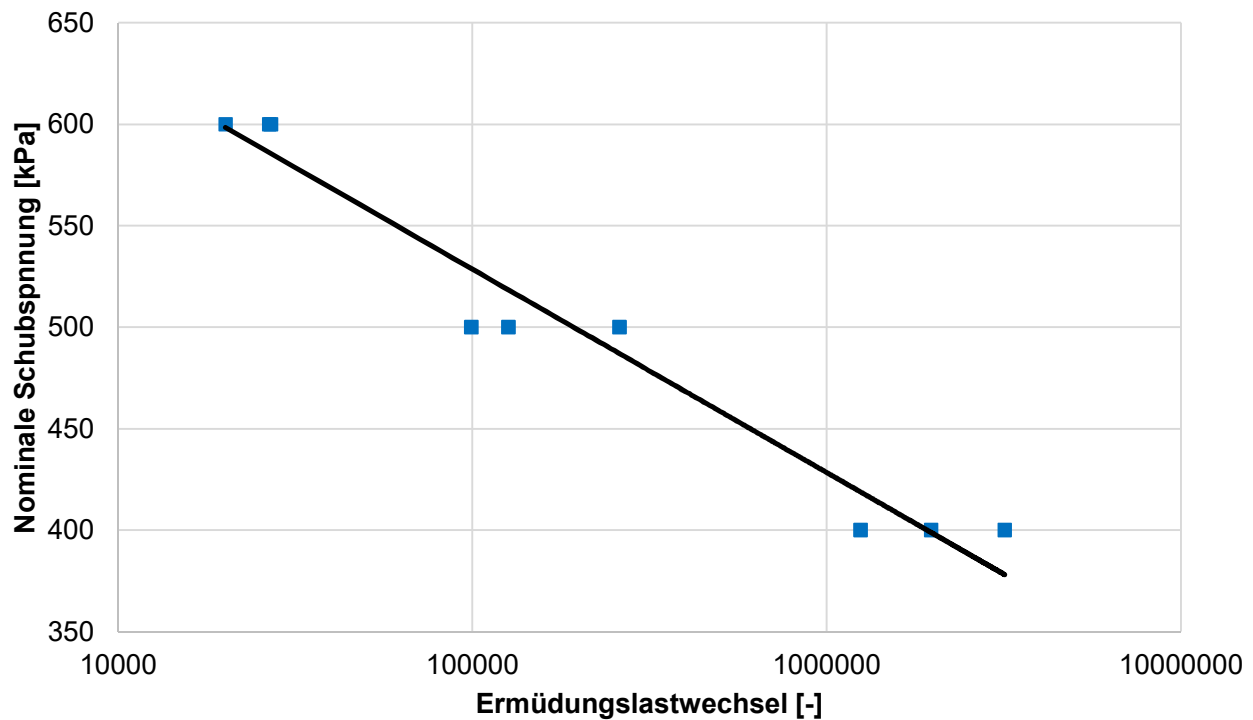
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	70,57	39,98	1.973.700
2	400	69,91	40,18	3.180.000
3	400	64,36	40,80	1.245.900
4	500	55,77	43,01	126.300
5	500	59,35	45,02	260.100
6	500	48,47	46,42	99.300
7	600	47,89	46,42	20.100
8	600	47,38	46,87	26.700
9	600	44,74	47,24	27.000
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -43,5 * \ln(x) + 1029,4$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	428,42
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	56,49
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	43,99
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	10.07.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M36 / MX0044	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-75	Füller	F06
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

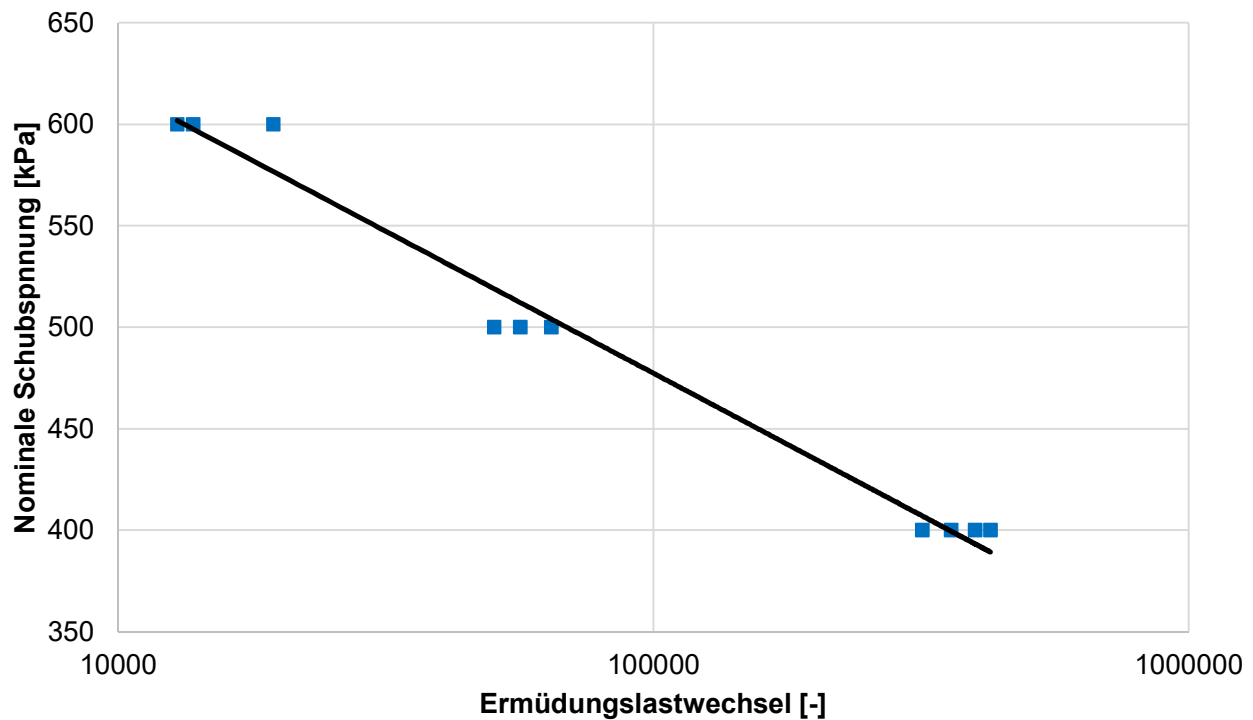
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	80,46	36,64	426.000
2	400	78,23	36,91	360.000
3	400	76,57	36,76	318.000
4	400	84,77	36,20	399.300
5	500	73,10	39,16	64.500
6	500	69,76	39,46	56.400
7	500	63,71	39,95	50.400
8	600	67,31	41,41	19.500
9	600	58,06	42,96	12.900
10	600	62,76	42,00	13.800
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen:

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -60,76 * \ln(x) + 1176,9$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,98
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	337,40
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	71,47
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	39,15
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:

<b>Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)</b>	<b>Seite 1 von 2</b>
---	----------------------

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	05.08.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

<b>Probedaten</b>			
-------------------	--	--	--

Mastix	M14_5%F / MX0047	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

<b>Maschinendaten</b>	
-----------------------	--

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

<b>Versuchsparameter</b>			
--------------------------	--	--	--

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

<b>Prüfergebnisse</b>				
-----------------------	--	--	--	--

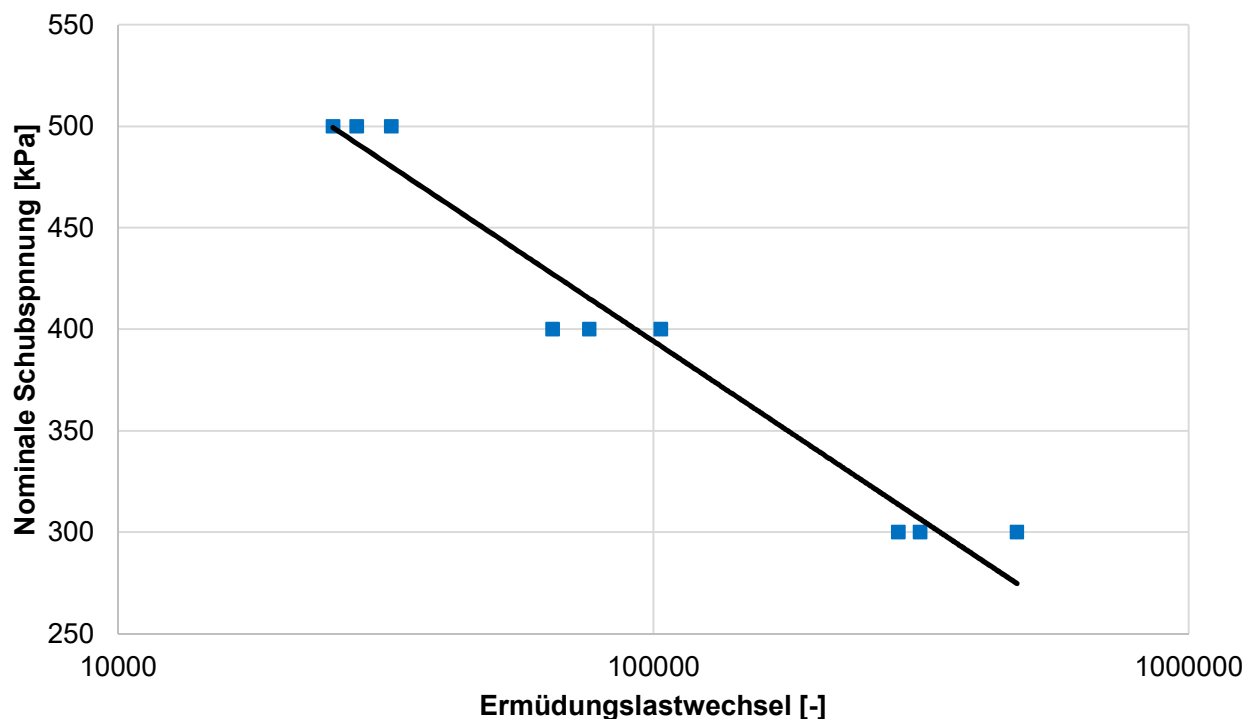
Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	G*  <sub>initial</sub> [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	108,30	36,37	477.900
2	300	90,02	37,25	286.800
3	300	101,80	35,48	315.000
4	400	91,25	38,28	103.200
5	400	87,35	38,13	64.800
6	400	88,60	38,08	75.900
7	500	87,43	39,62	27.900
8	500	83,76	39,97	32.400
9	500	81,87	40,11	25.200
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Wasserlagerung des Füllers, 5% Restfeuchtigkeit im Füller



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -76,35 * \ln(x) + 1273,1$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	218,30
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	91,15
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	38,14
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	28.07.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M15_5%F / MX0045	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F05
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

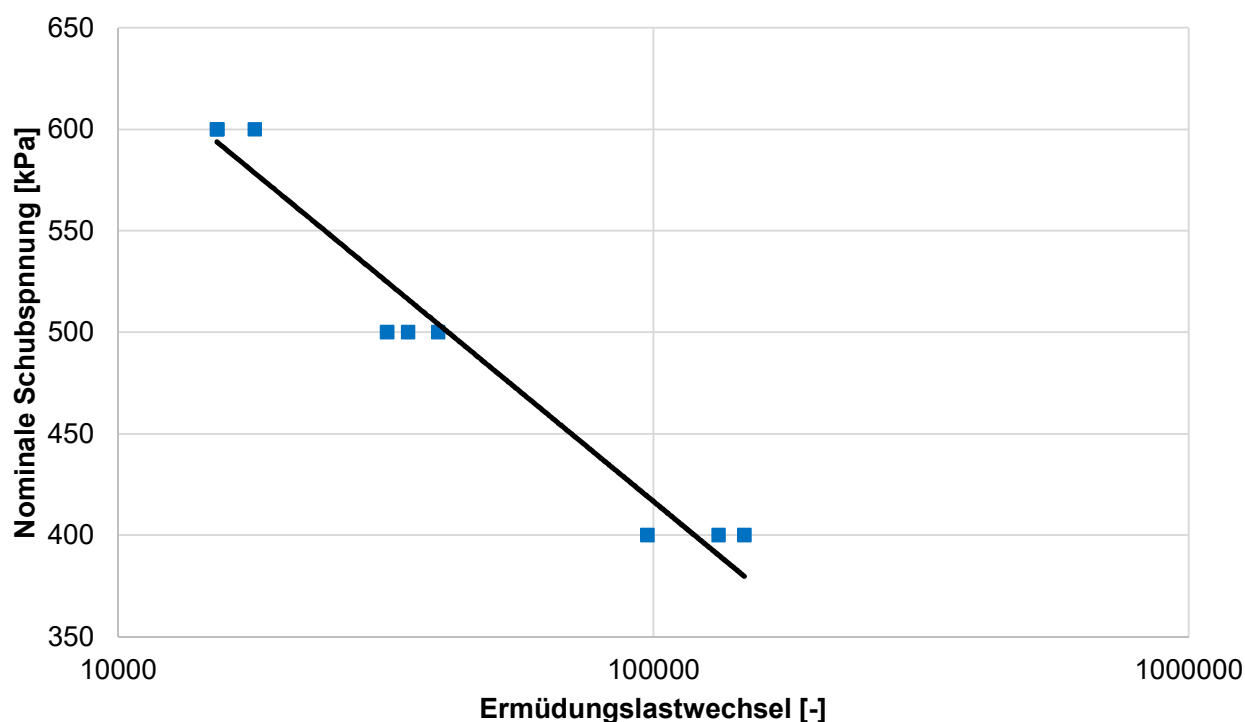
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	115,88	37,26	132.300
2	400	111,86	37,48	97.500
3	400	113,59	37,42	147.900
4	500	107,39	39,41	39.600
5	500	103,98	39,69	31.800
6	500	105,36	39,03	34.800
7	600	100,47	41,19	18.000
8	600	99,35	41,22	15.300
9	600	100,33	40,91	15.300
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Wasserlagerung des Füllers, 5% Restfeuchtigkeit im Füller

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -94,35 * \ln(x) + 1502,9$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	199,41
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	106,47
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	39,29
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	14.08.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M14_MW / MX0048	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

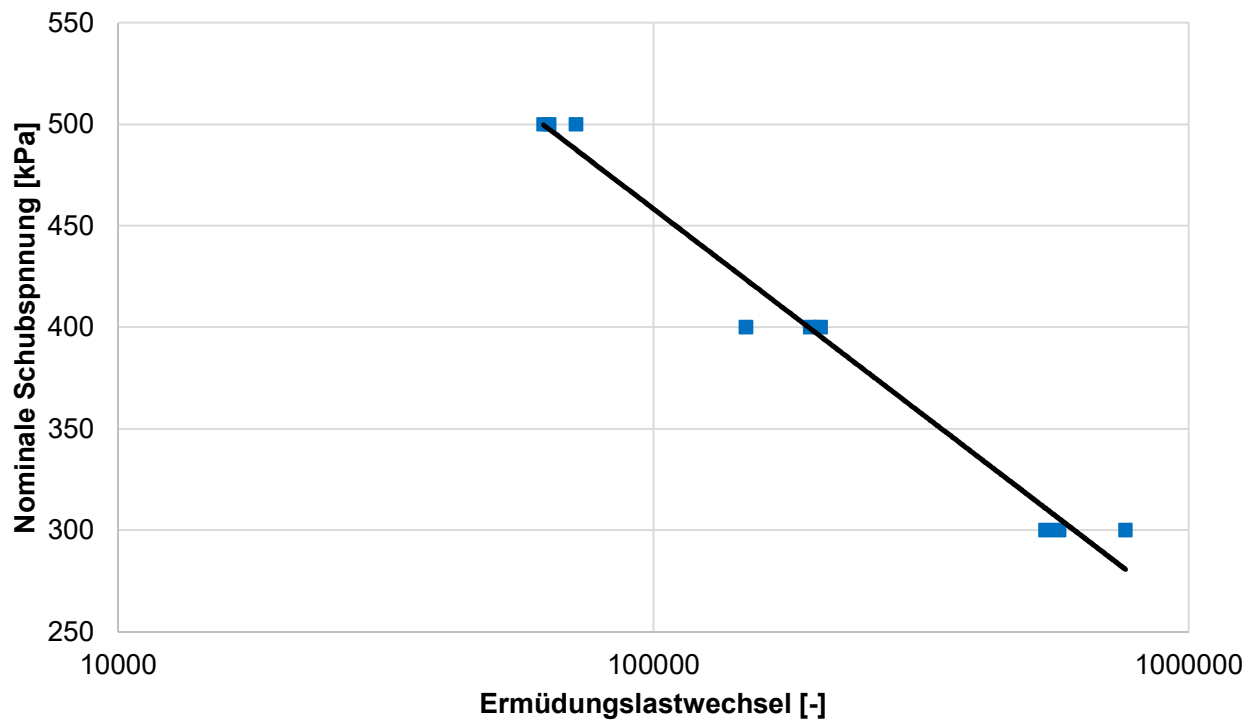
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	300	112,97	34,35	540.000
2	300	115,03	34,13	573.000
3	300	117,31	33,18	762.000
4	400	108,48	35,27	148.800
5	400	110,48	35,01	205.500
6	400	119,01	35,30	196.200
7	500	117,12	36,26	71.700
8	500	105,43	36,75	63.900
9	500	104,74	36,57	62.400
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Wasserlagerung der Mastix im Durckbehälter bei 60°C für 24h

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -87,47 * \ln(x) + 1465,4$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,98
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	256,93
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	112,29
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	35,20
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	31.07.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M15_MW / MX0046	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F05
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

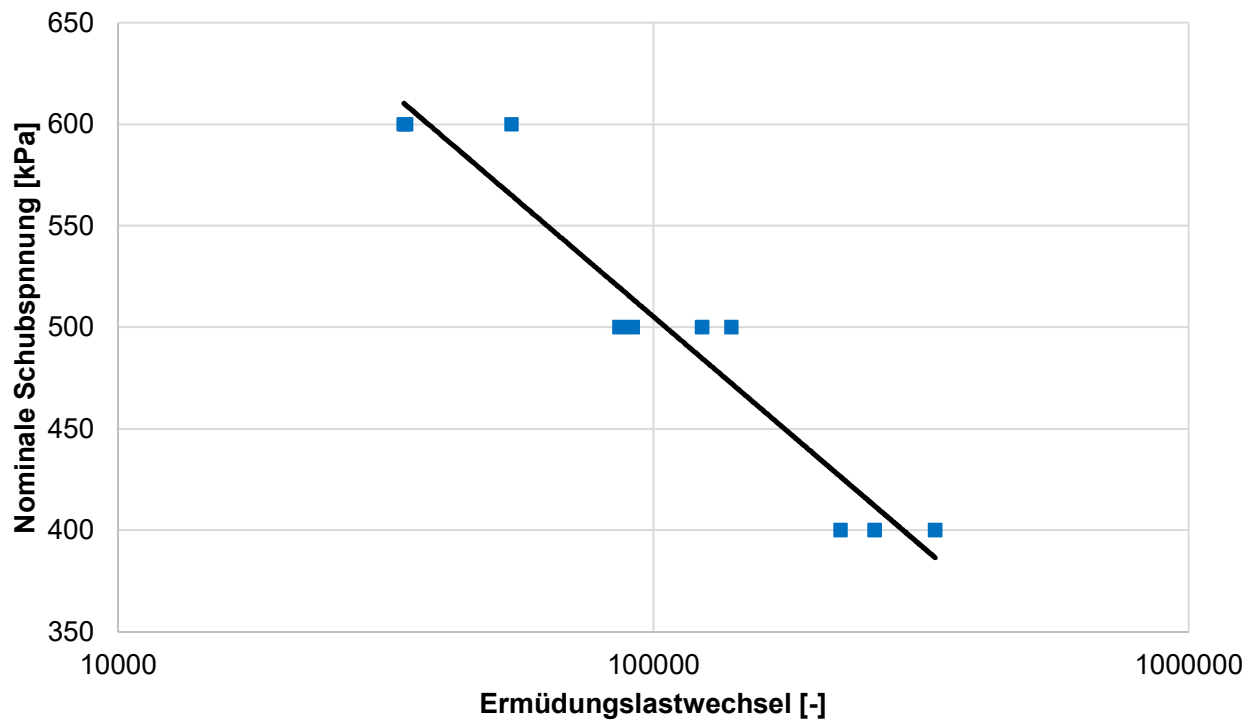
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	139,56	33,67	223.500
2	400	140,10	33,14	336.000
3	400	139,55	34,35	258.900
4	500	143,04	34,31	123.300
5	500	137,94	35,46	86.400
6	500	140,25	34,86	139.800
7	500	136,51	34,49	91.500
8	600	139,83	35,56	54.300
9	600	133,04	36,00	34.200
10	600	128,03	36,35	34.500
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Wasserlagerung der Mastix im Durckbehälter bei 60°C für 24h

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -97,96 * \ln(x) + 1632,9$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,93
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	279,63
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	137,79
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	34,82
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	11.09.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M14_BRP / MX0049	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

**Prüfergebnisse**

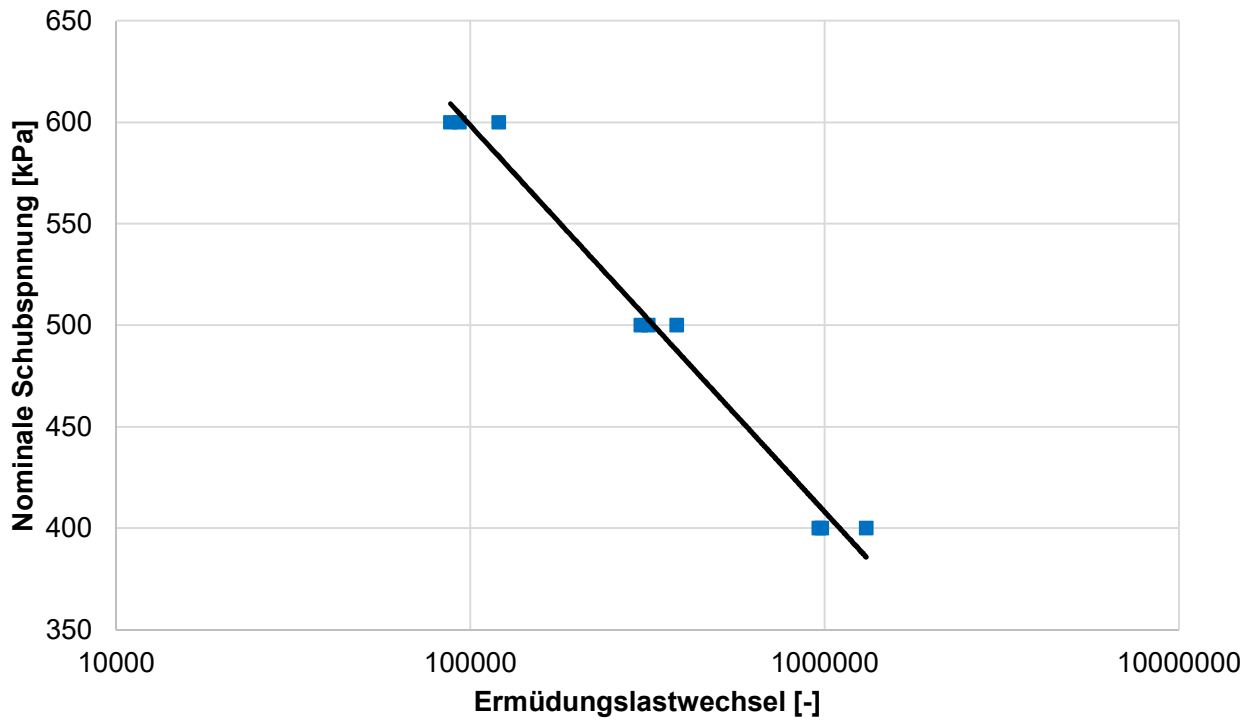
Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	400	160,70	27,09	1.310.100
2	400	148,98	26,94	963.000
3	400	154,96	26,80	981.000
4	500	151,68	28,38	382.200
5	500	146,44	28,04	303.000
6	500	151,63	27,94	318.300
7	600	150,73	29,12	120.300
8	600	136,70	29,44	87.900
9	600	141,32	28,88	93.000
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Bitumen gealtert mittel RTFOT- und PAV-Verfahren



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -82,64 * \ln(x) + 1549,8$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,98
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	408,07
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	149,24
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	28,07
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	09.09.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M14_MRP / MX0053	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

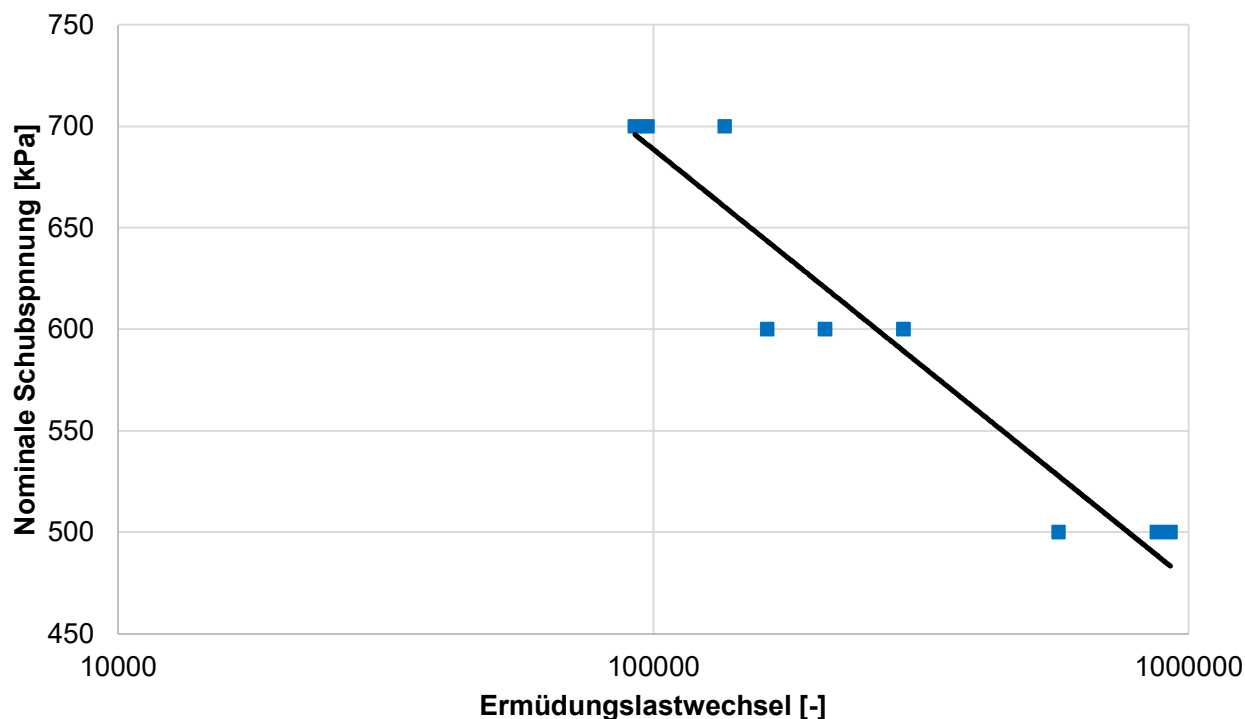
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	500	175,10	25,70	924.000
2	500	180,89	26,03	571.500
3	500	178,17	26,30	871.200
4	600	167,77	27,03	293.100
5	600	173,46	26,94	163.200
6	600	170,22	27,26	209.100
7	700	189,89	27,16	135.900
8	700	175,89	27,77	92.400
9	700	167,93	28,08	97.500
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Mastix gealtert mittel RTFOT- und PAV-Verfahren

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -92,32 * \ln(x) + 1751,5$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,91
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	476,02
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	175,48
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	26,92
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	09.09.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M14_MRV / MX0051	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	70/100	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

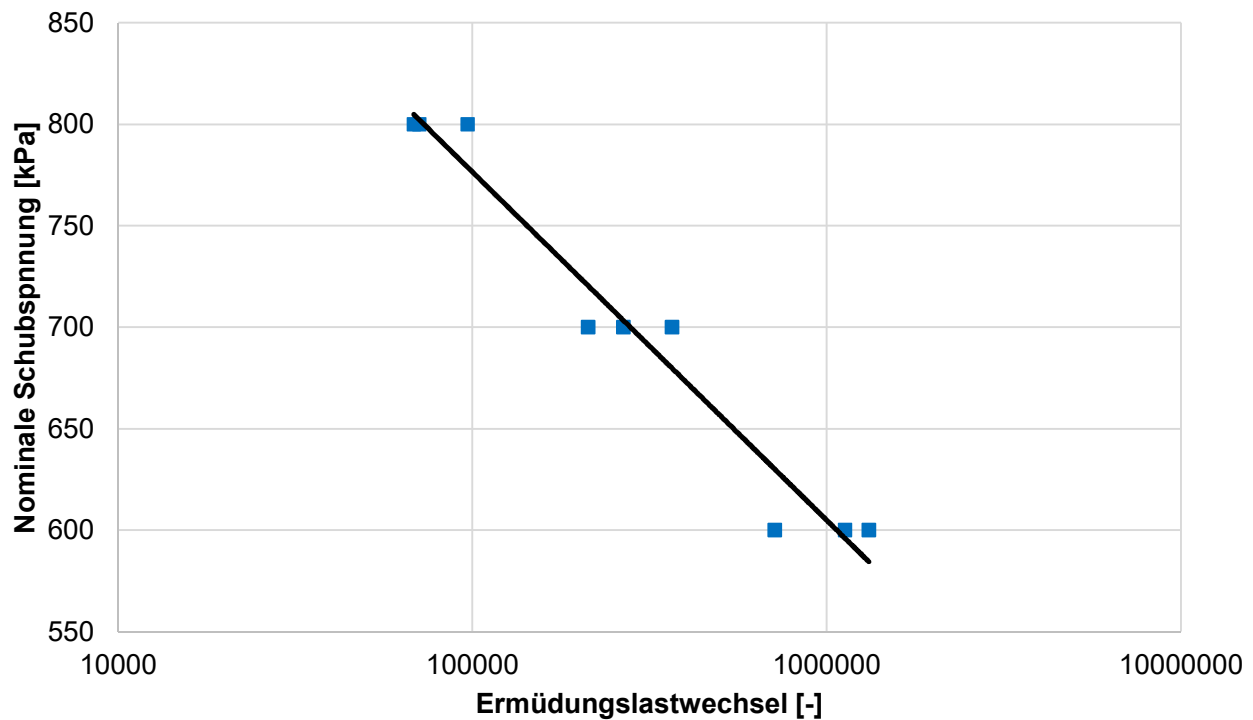
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	600	203,41	21,46	1.315.200
2	600	198,95	18,06	714.000
3	600	222,60	18,32	1.126.800
4	700	204,99	22,37	366.000
5	700	205,96	20,82	266.700
6	700	200,83	23,74	212.100
7	800	188,48	22,79	68.400
8	800	187,18	24,11	70.800
9	800	222,43	19,46	96.900
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Mastix gealtert mittel RTFOT- und VBA-Verfahren

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -74,51 * \ln(x) + 1634,3$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	604,91
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	203,87
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	21,24
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	18.09.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M24_BRP / MX0050	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

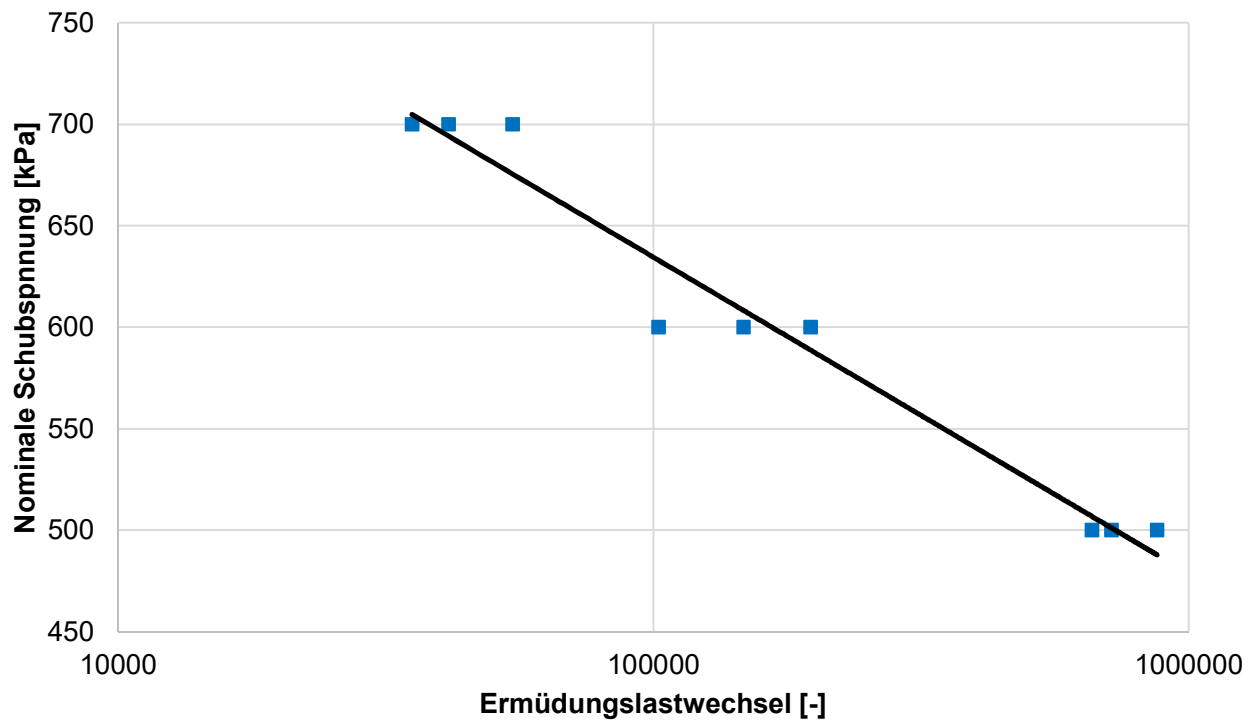
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	500	97,95	31,30	873.000
2	500	99,85	31,17	717.000
3	500	101,57	31,21	660.000
4	600	92,59	33,01	102.300
5	600	96,33	32,93	196.800
6	600	88,63	33,53	147.300
7	700	87,53	34,90	54.600
8	700	83,32	35,35	35.400
9	700	83,41	35,58	41.400
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Bitumen gealtert mittel RTFOT- und PAV-Verfahren

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -67,68 * \ln(x) + 1413,7$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	478,64
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	92,35
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	33,22
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	09.09.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M24_MRP / MX0054	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

**Prüfergebnisse**

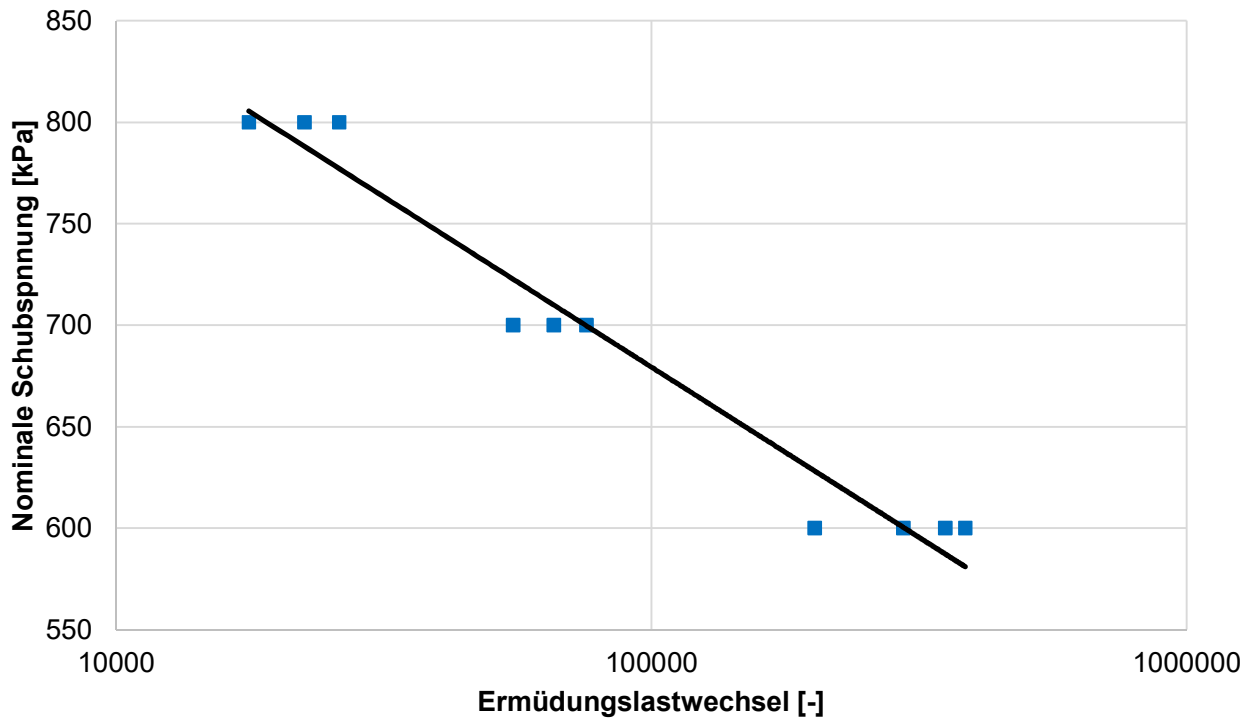
Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	600	109,60	31,48	354.000
2	600	115,10	31,34	385.800
3	600	107,32	31,65	295.500
4	600	109,64	31,62	201.900
5	700	98,41	33,35	55.200
6	700	97,73	33,34	65.700
7	700	99,67	33,36	75.600
8	800	95,01	35,38	17.700
9	800	104,72	34,55	26.100
10	800	100,31	34,85	22.500
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Mastix gealtert mittel RTFOT- und PAV-Verfahren



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -72,84 * \ln(x) + 1518$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b>τ<sub>6</sub> [kPa]</b>	511,65
<b> G* <sub>initial</sub> [MPa]</b>	103,75
<b>δ<sub>initial</sub> [°]</b>	33,09
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Asphaltmastixermüdung (DSR)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	09.09.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Michael Steineder

**Probedaten**

Mastix	M24_MRV / MX0052	Herstellung	Im Labor hergestellt
Bitumen	PmB 45/80-65	Füller	F04
F/B -Verhältnis	1,273		

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Anton Paar MCR 302
Software	RheoCompass

**Versuchsparameter**

Steuerung	spannungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	10 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	$\delta_{max}$	Geomertie	hyperbolisch

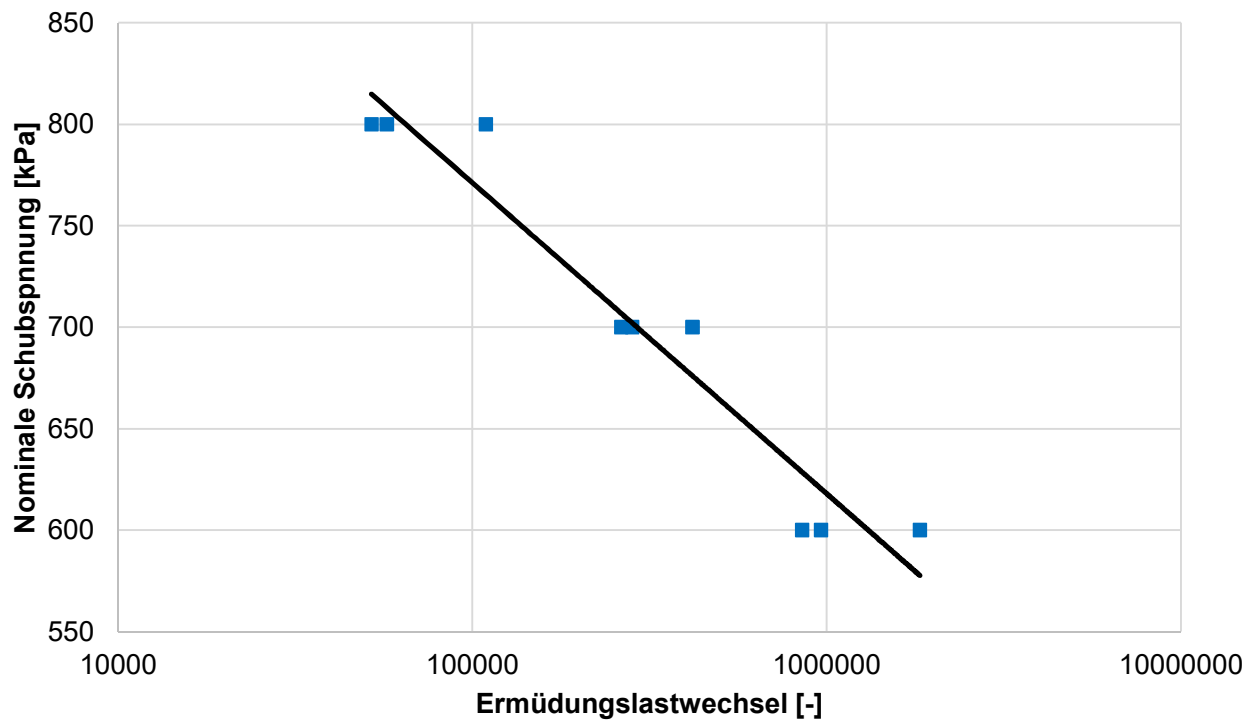
**Prüfergebnisse**

Versuchsnr. [-]	Nominale Schubspannung [kPa]	$ G^* _{initial}$ [Mpa]	$\delta_{initial}$ [°]	Ermüdungslastwechsel [-]
1	600	151,57	24,10	964.500
2	600	136,29	25,90	852.600
3	600	152,93	24,74	1.833.000
4	700	154,32	26,19	417.600
5	700	139,52	25,73	282.300
6	700	137,04	26,66	263.400
7	800	124,46	28,35	57.300
8	800	124,39	29,67	51.900
9	800	148,94	25,03	109.200
10				
11				
12				
13				
14				

Anmerkungen: Mastix gealtert mittel RTFOT- und VBA-Verfahren

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -66,51 * \ln(x) + 1536,9$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,94
<b><math>\tau_6</math> [kPa]</b>	618,01
<b><math> G^* _{\text{initial}}</math> [MPa]</b>	141,05
<b><math>\delta_{\text{initial}}</math> [°]</b>	26,26
<b>F/B [-]</b>	1,273

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Widerstand gegen Ermüdung (4-PB)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	10.09.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Bernhard Hadler
Norm	EN 12697-24 (2018)

**Probedaten**

Laborcode	A11	Herstellung	Im Labor hergestellt
Asphalt	AC 11 deck A1 - 70/100 - Füller F01		
Herstellungsverf.	EN 12697-35	Verdichtungsverf.	EN 12697-33
Raumdichte	2,48 Mg/m <sup>3</sup>	Hohlraumgehalt	4,44 V%

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Walter & Bai LFV 63/50 Ermüdung mit WILLE WDC 580 Regler
Software	GEOSys 8.7.8.2

**Versuchsparameter**

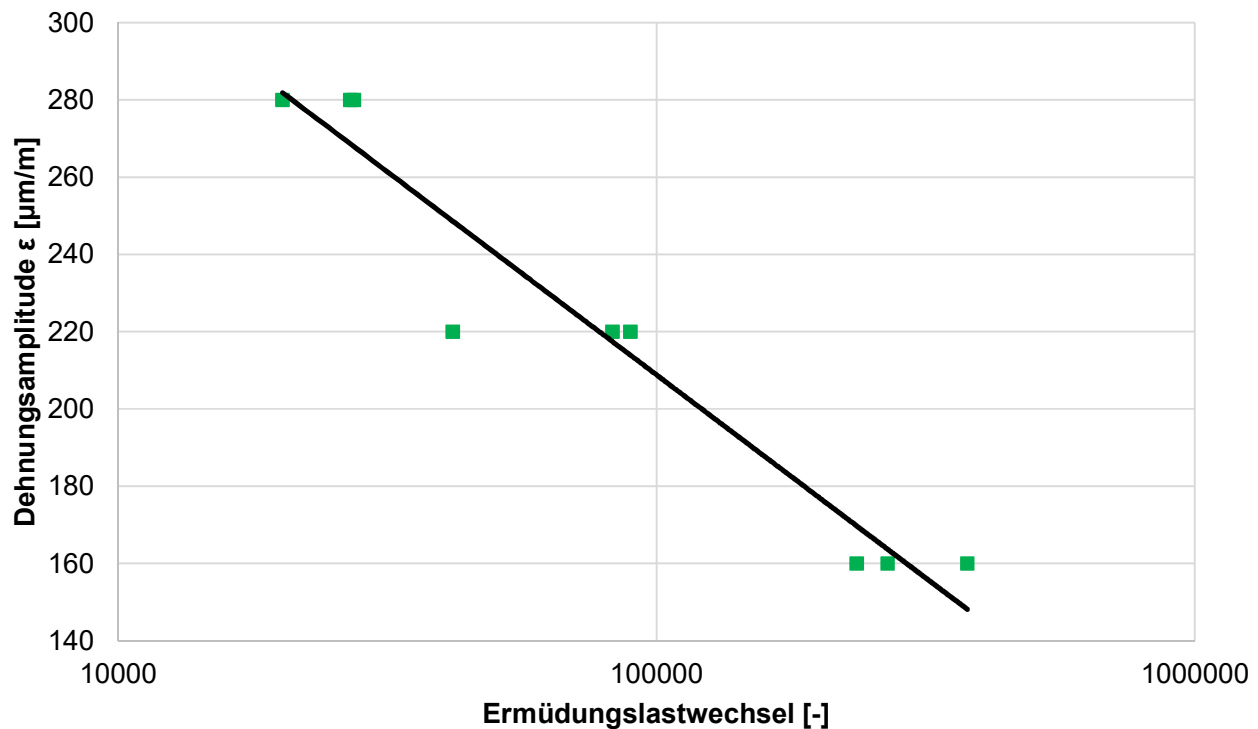
Prüfverfahren	Anhang D - Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR)		
Steuerung	verformungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	20 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	S <sub>100</sub> /2 konventionell		

**Prüfergebnisse**

Probe-körper	Amplitude ε [µm/m]	Ermüdungslast- wechsel [-]	S [MPa]	φ [°]	ρ <sub>raum</sub> [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1199A	280	20213	5644	30,20	2,50	3,70
E1199C	220	82876	6033	28,10	2,50	3,60
E1200B	160	268826	5431	31,20	2,46	4,90
E1200C	280	27004	5129	33,60	2,47	4,70
E1201A	160	235376	6465	27,80	2,49	4,10
E1201B	220	41863	5857	31,20	2,48	4,40
E1201C	220	89473	6189	28,30	2,48	4,30
E1202A	160	378022	6251	28,00	2,46	5,20
E1202B	280	27420	5716	30,50	2,46	5,10

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



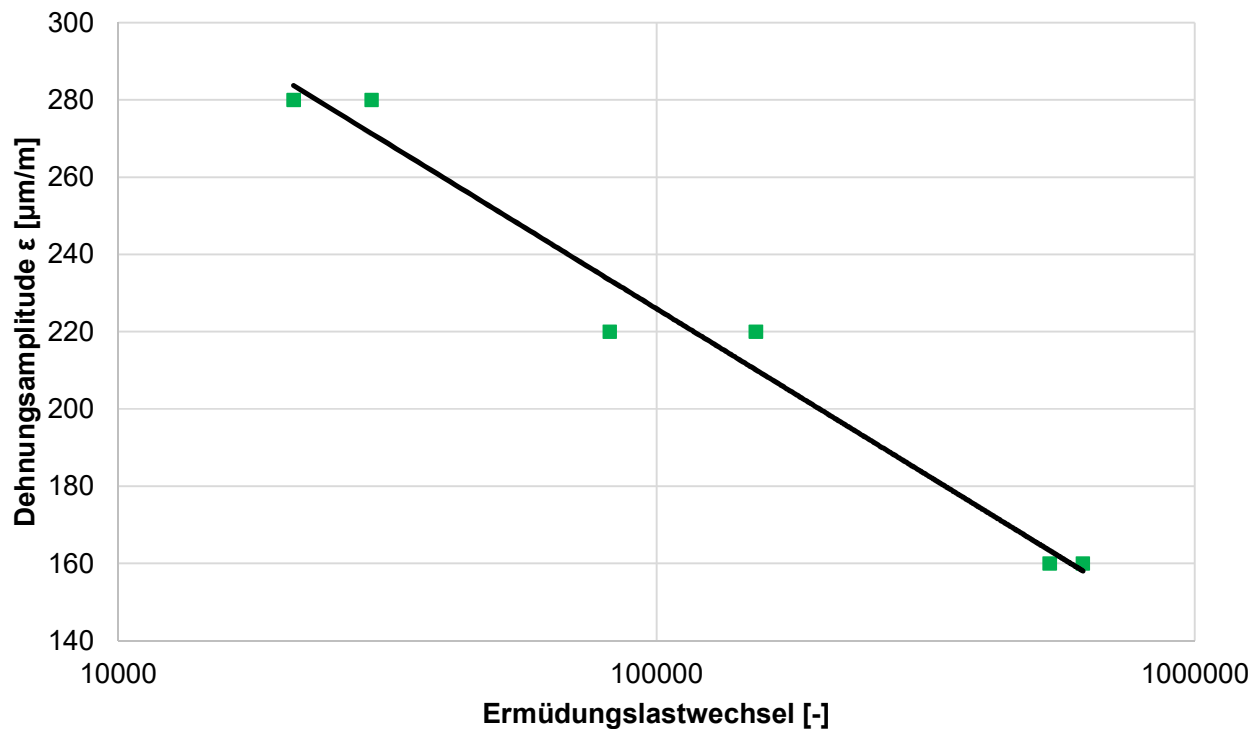
<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -45,66 * \ln(x) + 734,6$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,94
<b>ε<sub>6</sub> [µm/m] =</b>	103,71
<b>S<sub>mittel</sub> [MPa]</b>	5857,22
<b>φ<sub>mittel</sub> [°]</b>	29,88
<b>ρ<sub>mittel</sub> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	2,48
<b>gem. Hohl. [V%]</b>	4,44

Anmerkungen:



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -37,22 * \ln(x) + 654,5$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,97
<b>ε<sub>6</sub> [µm/m] =</b>	140,27
<b>S<sub>mittel</sub> [MPa]</b>	5167,00
<b>φ<sub>mittel</sub> [°]</b>	30,52
<b>ρ<sub>mittel</sub> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	2,46
<b>gem. Hohl. [V%]</b>	5,33

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Widerstand gegen Ermüdung (4-PB)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	12.10.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Bernhard Hadler
Norm	EN 12697-24 (2018)

**Probedaten**

Laborcode	A13	Herstellung	Im Labor hergestellt
Asphalt	AC 11 deck A1 - 70/100 - Füller F03		
Herstellungsverf.	EN 12697-35	Verdichtungsverf.	EN 12697-33
Raumdichte	2,47 Mg/m <sup>3</sup>	Hohlraumgehalt	5,84 V%

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Walter & Bai LFV 63/50 Ermüdung mit WILLE WDC 580 Regler
Software	GEOSys 8.7.8.2

**Versuchsparameter**

Prüfverfahren	Anhang D - Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR)		
Steuerung	verformungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	20 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	S <sub>100</sub> /2 konventionell		

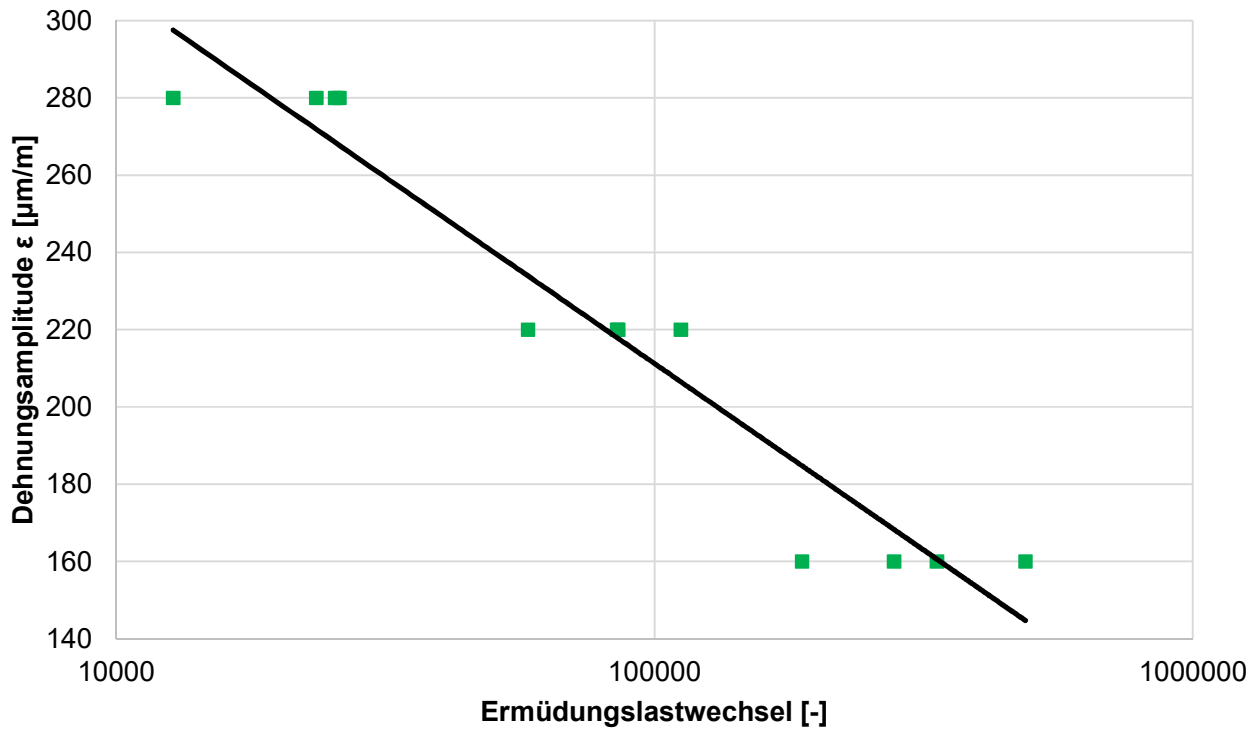
**Prüfergebnisse**

Probe-körper	Amplitude ε [µm/m]	Ermüdungslast- wechsel [-]	S [MPa]	φ [°]	ρ <sub>raum</sub> [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1203A	160	488995	5673	30,10	2,47	5,80
E1203B	220	85255	5997	29,60	2,48	5,60
E1203C	280	12760	5381	34,50	2,49	5,20
E1204A	280	26001	5025	33,40	2,45	6,40
E1204B	160	188003	5749	30,90	2,46	6,10
E1204C	160	278979	5774	30,30	2,46	6,10
E1205A	220	112028	5974	32,50	2,48	5,30
E1205B	220	58270	5785	33,90	2,49	5,10
E1205C	220	85747	5667	33,20	2,49	5,10
E1206A	160	335044	5625	30,40	2,45	6,50
E1206B	280	23552	5283	30,70	2,46	6,40
E1206C	280	25532	4942	32,60	2,45	6,50



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -41,92 * \ln(x) + 693,9$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,93
<b>ε<sub>6</sub> [µm/m] =</b>	114,72
<b>S<sub>mittel</sub> [MPa]</b>	5572,92
<b>φ<sub>mittel</sub> [°]</b>	31,84
<b>ρ<sub>mittel</sub> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	2,47
<b>gem. Hohl. [V%]</b>	5,84

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Widerstand gegen Ermüdung (4-PB)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	02.07.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Bernhard Hadler
Norm	EN 12697-24 (2018)

**Probedaten**

Laborcode	A14	Herstellung	Im Labor hergestellt
Asphalt	AC 11 deck A1 - 70/100 - Füller F04		
Herstellungsverf.	EN 12697-35	Verdichtungsverf.	EN 12697-33
Raumdicke	2,49 Mg/m <sup>3</sup>	Hohlraumgehalt	2,49 V%

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Walter & Bai LFV 63/50 Ermüdung mit WILLE WDC 580 Regler
Software	GEOSys 8.7.8.2

**Versuchsparameter**

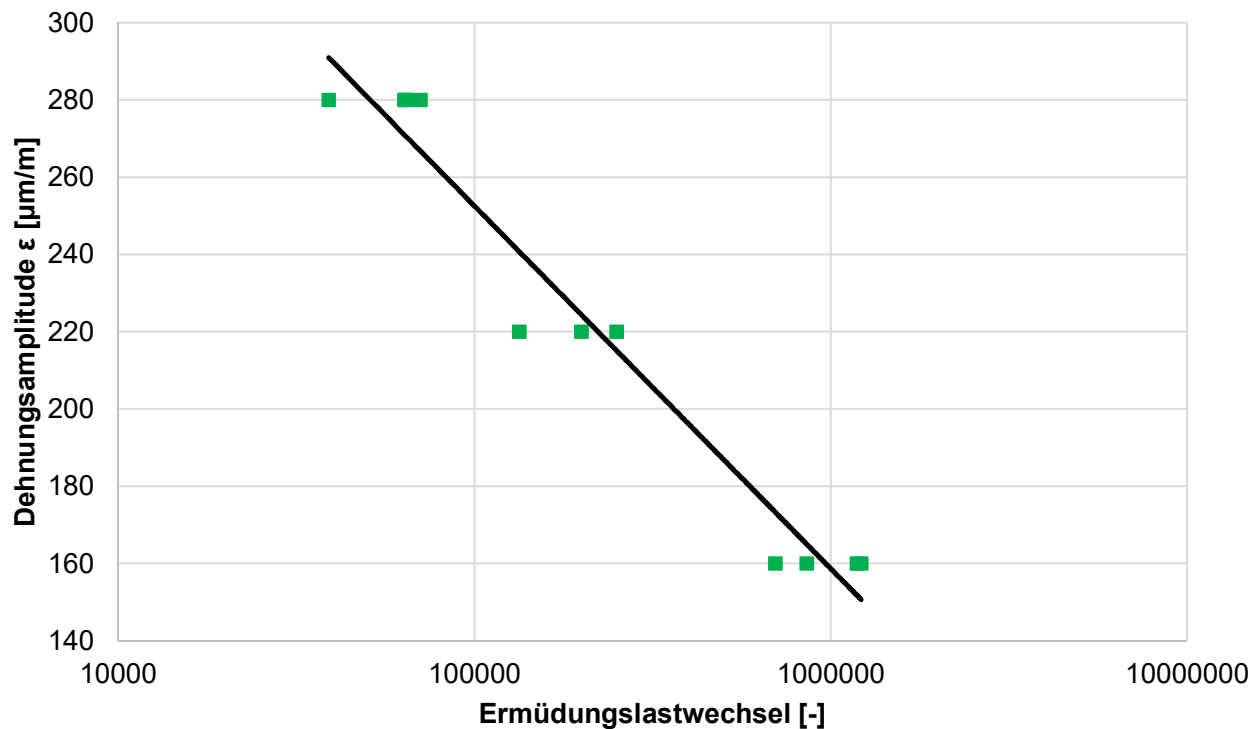
Prüfverfahren	Anhang D - Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR)		
Steuerung	verformungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	20 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	S <sub>100</sub> /2 konventionell		

**Prüfergebnisse**

Probe-körper	Amplitude ε [µm/m]	Ermüdungslast- wechsel [-]	S [MPa]	φ [°]	ρ <sub>raum</sub> [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1176A	280	70603	5087	31,60	2,45	4,00
E1176B	160	857020	5702	30,30	2,49	2,50
E1177A	160	1217036	6043	28,80	2,50	2,20
E1177B	280	64539	5986	28,80	2,50	2,20
E1177C	220	250982	4864	32,30	2,49	2,50
E1185A	280	39003	5263	34,80	2,50	2,20
E1185B	160	700023	5783	32,90	2,51	1,80
E1185C	220	199488	5975	29,90	2,51	1,70
E1186A	220	133838	5892	29,70	2,47	3,40
E1186B	160	1184459	6112	27,70	2,48	2,70
E1186C	280	63601	5065	32,90	2,50	2,20

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -40,77 * \ln(x) + 721,9$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,96
<b>ε<sub>6</sub> [µm/m] =</b>	158,70
<b>S<sub>mittel</sub> [MPa]</b>	5615,64
<b>φ<sub>mittel</sub> [°]</b>	30,88
<b>ρ<sub>mittel</sub> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	2,49
<b>gem. Hohl. [V%]</b>	2,49

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Widerstand gegen Ermüdung (4-PB)**

Seite 1 von 3

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	19.08.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Bernhard Hadler
Norm	EN 12697-24 (2018)

**Probedaten**

Laborcorde	A15	Herstellung	Im Labor hergestellt
Asphalt	AC 11 deck A1 - 70/100 - Füller F05		
Herstellungsverf.	EN 12697-35	Verdichtungsverf.	EN 12697-33
Raumdicke	2,50 Mg/m <sup>3</sup>	Hohlraumgehalt	2,77 V%

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Walter & Bai LFV 63/50 Ermüdung mit WILLE WDC 580 Regler
Software	GEOSys 8.7.8.2

**Versuchsparameter**

Prüfverfahren	Anhang D - Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR)		
Steuerung	verformungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	20 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	S <sub>100</sub> /2 konventionell		

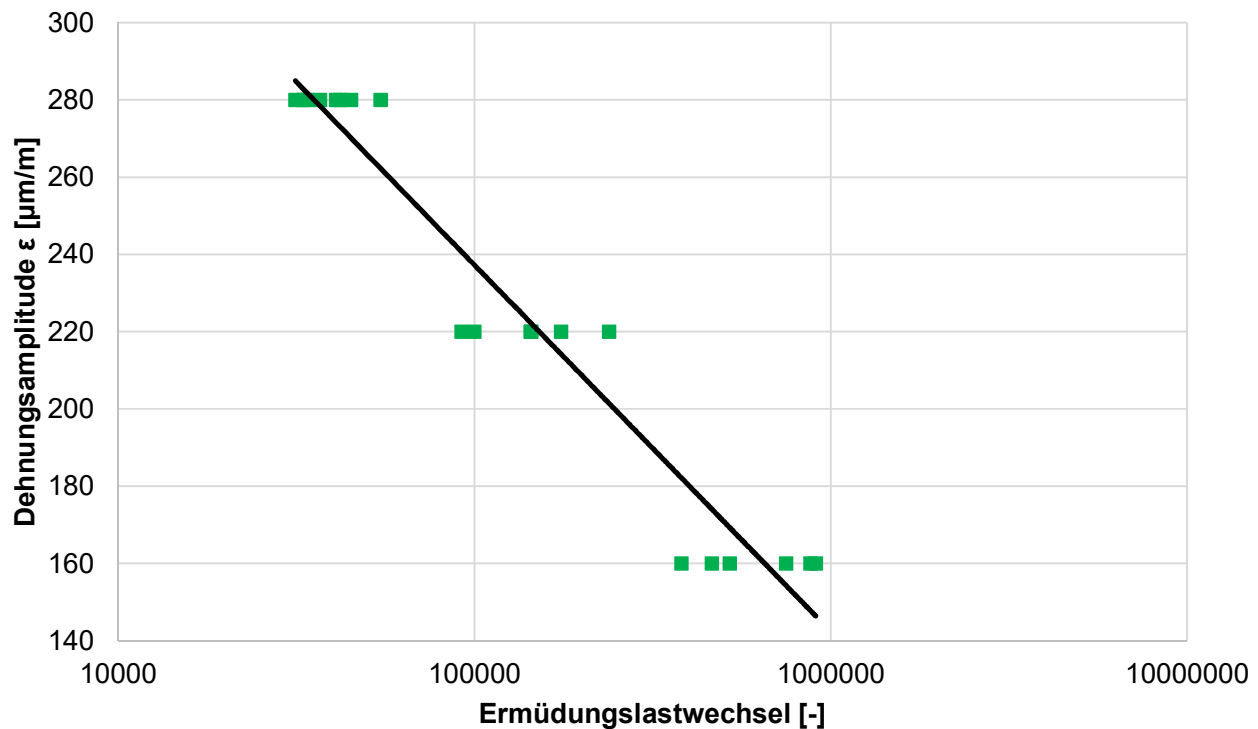
**Prüfergebnisse**

Probe-körper	Amplitude ε [µm/m]	Ermüdungslast- wechsel [-]	S [MPa]	φ [°]	ρ <sub>raum</sub> [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1192A	280	36870	5733	29,50	2,43	5,40
E1192C	160	520897	7013	26,70	2,48	3,70
E1193A	280	33993	5717	31,60	2,46	4,40
E1193B	220	144352	6712	25,30	2,46	4,30
E1193C	160	877003	7089	26,70	2,46	4,30
E1197A	160	464022	7481	28,60	2,52	2,10
E1197C	220	99882	6947	31,50	2,53	1,60
E1198B	280	40932	6452	30,90	2,51	2,50
E1198C	280	54553	6583	30,00	2,51	2,40
E1220A	220	175008	7660	27,20	2,53	1,60
E1220B	160	908023	8076	25,50	2,53	1,70
E1220C	280	33042	7201	29,10	2,53	1,70
E1221B	280	42003	7476	27,20	2,51	2,20



**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -41,2 * \ln(x) + 711,6$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,94
<b>ε<sub>6</sub> [µm/m] =</b>	142,43
<b>S<sub>mittel</sub> [MPa]</b>	7002,50
<b>φ<sub>mittel</sub> [°]</b>	28,57
<b>ρ<sub>mittel</sub> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	2,50
<b>gem. Hohl. [V%]</b>	2,77

Anmerkungen:

**Prüfbericht: Widerstand gegen Ermüdung (4-PB)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	02.07.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Bernhard Hadler
Norm	EN 12697-24 (2018)

**Probedaten**

Laborcode	A16	Herstellung	Im Labor hergestellt
Asphalt	AC 11 deck A1 - 70/100 - Füller F06		
Herstellungsverf.	EN 12697-35	Verdichtungsverf.	EN 12697-33
Raumdichte	2,51 Mg/m <sup>3</sup>	Hohlraumgehalt	2,86 V%

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Walter & Bai LFV 63/50 Ermüdung mit WILLE WDC 580 Regler
Software	GEOSys 8.7.8.2

**Versuchsparameter**

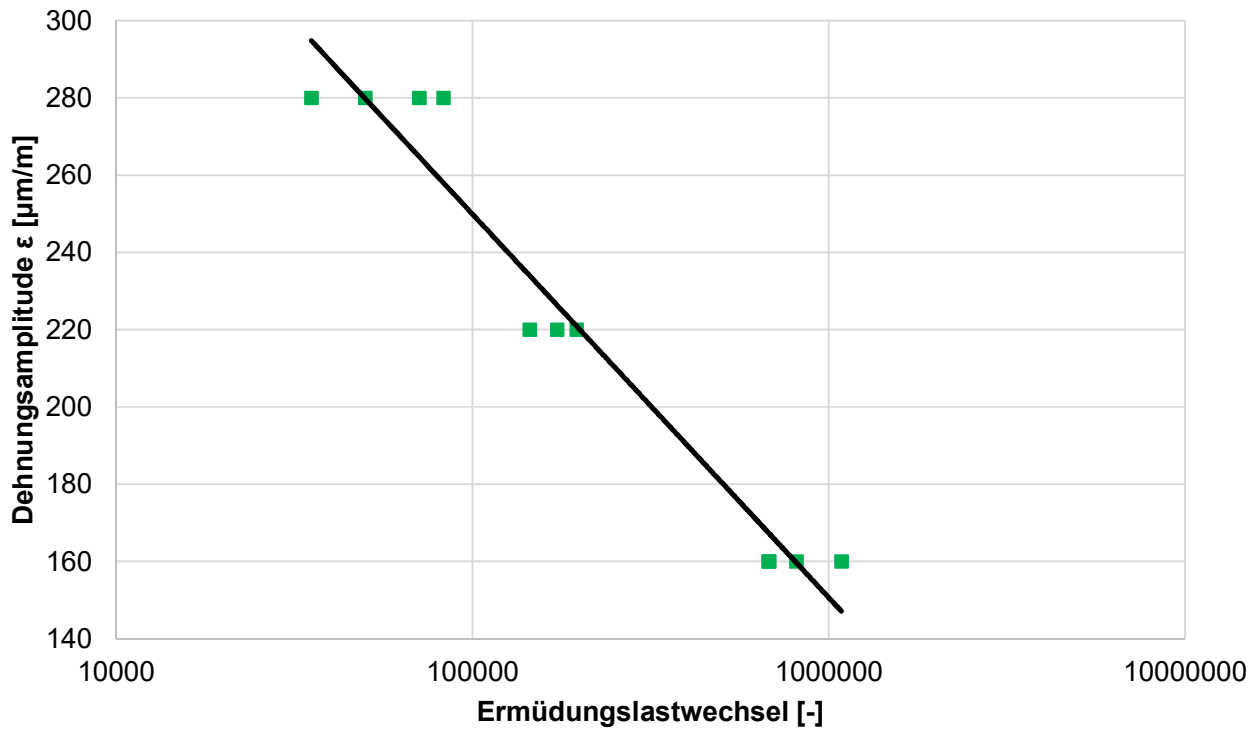
Prüfverfahren	Anhang D - Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR)		
Steuerung	verformungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	20 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	S <sub>100/2</sub> konventionell		

**Prüfergebnisse**

Probe-körper	Amplitude ε [µm/m]	Ermüdungslast- wechsel [-]	S [MPa]	φ [°]	ρ <sub>raum</sub> [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1172A	160	812040	6345	29,20	2,49	3,50
E1172B	280	35329	5501	33,90	2,50	2,90
E1172C	160	681032	6709	28,40	2,51	2,80
E1173A	160	678006	6457	27,00	2,47	4,20
E1173B	280	83007	5913	30,90	2,48	3,90
E1173C	160	1085612	6407	26,40	2,49	3,40
E1174A	280	50023	6178	31,30	2,53	2,10
E1174B	220	145040	6473	30,50	2,53	1,90
E1174C	280	71044	5766	33,00	2,53	1,80
E1175B	220	173007	5457	30,00	2,52	2,20
E1175C	220	196019	5463	32,40	2,51	2,80

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -43,12 * \ln(x) + 746,4$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,95
<b>ε<sub>6</sub> [µm/m] =</b>	150,68
<b>S<sub>mittel</sub> [MPa]</b>	6060,82
<b>φ<sub>mittel</sub> [°]</b>	30,27
<b>ρ<sub>mittel</sub> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	2,51
<b>gem. Hohl. [V%]</b>	2,86

Anmerkungen:



**Prüfbericht: Widerstand gegen Ermüdung (4-PB)**

Seite 1 von 2

AuftraggeberIn	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Datum	26.11.2020
Projekt	19408
ProjektleiterIn	Michael Steineder
PrüferIn	Bernhard Hadler
Norm	EN 12697-24 (2018)

**Probedaten**

Laborcode	A14_5%F	Herstellung	Im Labor hergestellt
Asphalt	AC 11 deck A1 - 70/100 - Füller F04 (Feuchter Füller)		
Herstellungsverf.	EN 12697-35	Verdichtungsverf.	EN 12697-33
Raumdichte	2,48 Mg/m <sup>3</sup>	Hohlraumgehalt	4,60 V%

**Maschinendaten**

Prüfgerät	Walter & Bai LFV 63/50 Ermüdung mit WILLE WDC 580 Regler
Software	GEOSys 8.7.8.2

**Versuchsparameter**

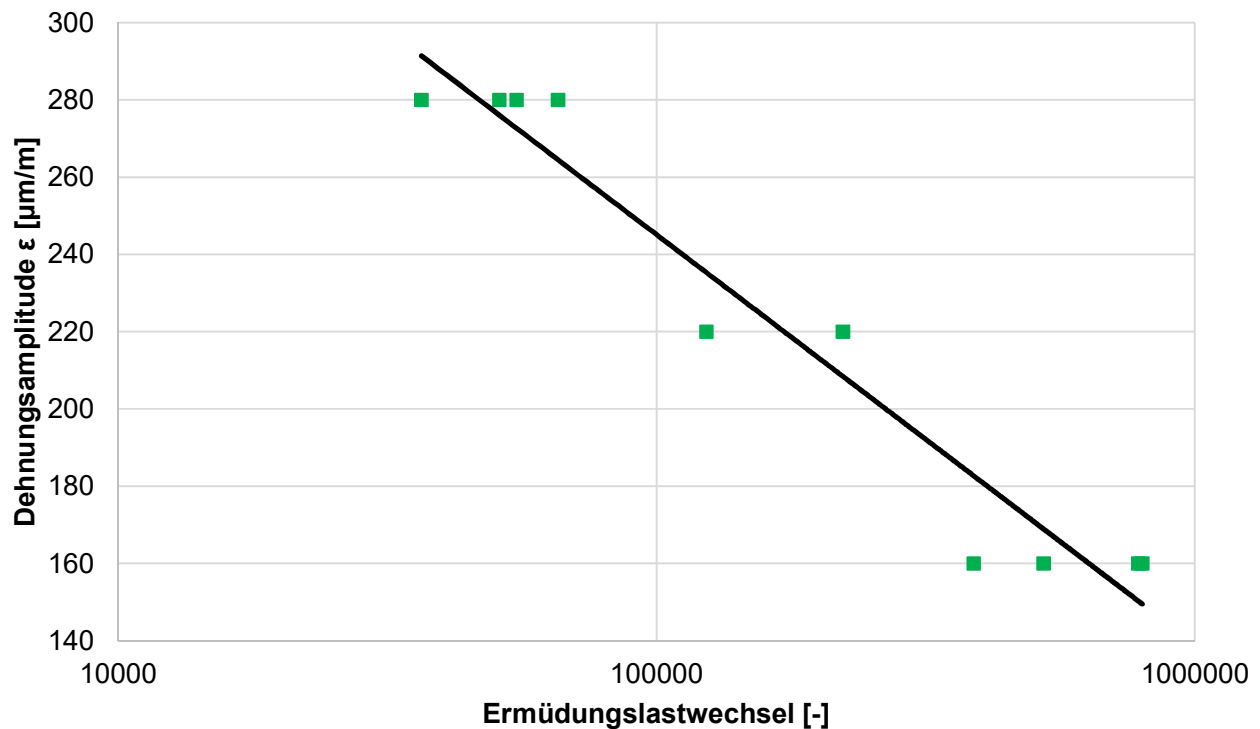
Prüfverfahren	Anhang D - Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR)		
Steuerung	verformungsgesteuert	Belastungsart	sinusförmig
Prüftemperatur	20 °C	Prüffrequenz	30 Hz
Ausfallkriterium	S <sub>100</sub> /2 konventionell		

**Prüfergebnisse**

Probe-körper	Amplitude ε [µm/m]	Ermüdungslast- wechsel [-]	S [MPa]	φ [°]	ρ <sub>raum</sub> [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1225A	280	36596	5113	34,20	2,47	5,11
E1225B	160	388539	5446	32,90	2,49	4,53
E1226A	160	524007	6142	29,20	2,49	4,51
E1226B	220	123840	5689	30,60	2,48	4,76
E1226C	280	55001	5728	31,00	2,48	4,82
E1227B	280	51039	5473	32,20	2,50	4,09
E1227C	160	785012	5981	27,30	2,49	4,55
E1228A	280	65600	5560	30,70	2,48	4,61
E1228B	160	799011	6146	28,20	2,49	4,51
E1228C	220	222039	5878	28,40	2,49	4,51

**Prüfergebnisse**

**Wöhlerkurve**



<b>Wöhlerkurve</b>	$y = -46,02 * \ln(x) + 775$
<b>R<sup>2</sup> [-]</b>	0,94
<b>ε<sub>6</sub> [µm/m] =</b>	139,19
<b>S<sub>mittel</sub> [MPa]</b>	5715,60
<b>φ<sub>mittel</sub> [°]</b>	30,47
<b>ρ<sub>mittel</sub> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	2,48
<b>gem. Hohl. [V%]</b>	4,60

Anmerkungen: