



## DIPLOMARBEIT Master Thesis

# Prüftechnische Ansprache von Asphaltmastix

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

unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald Blab**

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

**Univ.Ass. Dipl.-Ing. Markus Hospodka**

am

Institut für Verkehrswissenschaften  
Forschungsbereich für Straßenwesen

E 230-3

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Madeleine Jordan, BSc**

00727160

Gassergasse 38  
1050 Wien

Wien, am 7.11.2017

Anmerkung des betreuenden Instituts:

Frau Madeleine Jordan hat im Zuge ihrer Diplomarbeit als Studierende am Forschungsprojekt „Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix – Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriteriums“ im Straßenbaulabor des Instituts für Verkehrswissenschaften mitgearbeitet. Aus diesem Grund sind Teile der Diplomarbeit als auch die gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls im Endbericht des o. g. Forschungsprojekts enthalten.

## I. Kurzfassung

Ausgangsbasis dieser Arbeit ist das vermehrte Auftreten von frühzeitigen Schäden an bituminösen Deckschichten, die weder einer außergewöhnlichen klimatischen noch einer verkehrlichen Belastung zugeordnet werden können. Als mögliche Schadensursache wird ein mangelndes Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix vermutet. Derzeit gibt es noch kein geeignetes Prüfkriterium, das gezielt die Qualität der Mastix hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit beschreibt. Aus diesem Grund soll eine Prüfmethode zur Bewertung der Mastixqualität entwickelt und standardisiert werden. Die Ergebnisse sollen in weiterer Folge dem Aufbau eines Qualitätskriteriums mit geeigneten Anforderungswerten dienen.

Als Prüfgerät wurde das Dynamische Scherrheometer gewählt. Es kann oszillierende Scherbeanspruchungen unter hoher Frequenz aufbringen und benötigt nur geringe Probemengen. Die Mastixproben aus Bitumen und Füller/Feinanteil werden in einem Mischungsverhältnis von B : F = 1 : 1,5 hergestellt. Die drei Millimeter hohen Probekörper haben die Form eines Hyperboloids, um sicherzustellen, dass der gewünschte Ermüdungsbruch in der Mitte des Probekörpers eintritt. Die Ermüdungsversuche finden bei einer Prüftemperatur von 10°C und einer Frequenz von 30 Hz statt.

Um einen Einfluss des Bindemittels zu vermeiden, wurde zur Herstellung aller Mastixproben einheitlich ein Bitumen der Sorte 70/100 (PG 64-22) verwendet.

Für die Herstellung der Mastixproben wurden 13 verschiedene Füller/Feinanteile unterschiedlicher Herkunft und Mineralogie verwendet. Um den Einfluss einzelner Faktoren auf die Ermüdungsbeständigkeit der Mastix zu untersuchen, wurden vorab folgende Parameter ermittelt: Mineralienbestand, Rohdichte, Trockenverdichtbarkeit und Korngrößenverteilung. Es stellte sich heraus, dass sieblinienbezogene Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben. Die bisher übliche Annahme, dass die Mineralogie des Füllers einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Mastix hat, konnte nicht bestätigt werden.

Die Reihenuntersuchung zur Präzision der entwickelten Prüfmethode zeigt eine gute Wiederholbarkeit.

## II. Abstract

The motivation for this work is the increased occurrence of premature damage to bituminous wearing course, which cannot be attributed either to an extraordinary climatic or a traffic load. As a possible cause of damage, a poor performance of the asphalt mastic is suspected. At present, there is no suitable test procedure which specifically describes the quality of the mastic regarding its durability. For this reason, a test methodology for assessing mastic quality has been developed and standardized. The results are used to establish a quality criterion with appropriate requirements.

The dynamic shear rheometer was chosen as the device. It can apply oscillating shear stresses at high frequency and requires only small amounts of sample quantity. The mastic samples from bitumen and filler/fine fraction are produced in a mixing ratio of  $B : F = 1 : 1.5$ . The three-millimetre-high specimens have the form of a hyperboloid to ensure that the desired fatigue fracture occurs in the centre of the specimen. The fatigue tests are carried out at a test temperature of 10°C and a frequency of 30 Hz.

In order to avoid the influence of the binder, a bitumen of the type 70/100 (PG 64-22) was used uniformly for the production of all mastic samples.

To produce mastic samples, 13 different fillers/fine parts of different origin and mineralogy were used. In order to investigate the influence of individual factors on the fatigue resistance of the mastic, the following parameters were determined in advance: mineral stock, bulk density, dry compressibility and grain size distribution. It turned out that factors related to sieve curve of the filler have a significant influence on the fatigue strength. The previously accepted assumption that the mineralogy has a significant influence on the durability of the mastic could not be confirmed.

The series examination for the precision of the developed test method shows a good repeatability.

## III. Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzfassung.....	i
II.	Abstract .....	ii
III.	Inhaltsverzeichnis .....	iii
1	Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
2	Stand der Technik.....	2
2.1	Asphalt.....	2
2.1.1	Grundlagen .....	2
2.1.2	Funktionen und Anforderungen.....	2
2.1.3	Mischgutarten.....	3
2.1.4	Eigenschaften.....	5
2.2	Gesteinskörnungen .....	6
2.2.1	Grundlagen .....	6
2.2.2	Begriffe .....	7
2.3	Bitumen .....	7
2.3.1	Grundlagen .....	7
2.3.2	Herstellung.....	8
2.3.3	Arten .....	9
2.3.4	Eigenschaften.....	11
2.3.5	Alterung von Bitumen.....	14
2.4	Materialermüdung.....	16
2.4.1	Ermüdungsversuch an Asphaltmischgut.....	17
3	Entwicklung und Standardisierung der Prüfmethodik .....	19
3.1	Prüfgerät .....	19
3.1.1	Anforderungen und Wahl des Prüfgerätes .....	19
3.1.2	Herausforderungen.....	20
3.1.3	Funktionsweise eines Dynamischen Scherrheometers.....	20
3.2	Mastixproben .....	22
3.2.1	Mischungsverhältnis der Mastixproben.....	22
3.2.2	Herstellung einer Mastixprobe .....	23
3.3	Versuchsrandbedingungen .....	23
3.3.1	Prüftemperatur und -frequenz.....	23

3.3.2	Probekörpergeometrie .....	23
3.4	Versuchsdurchführung.....	25
3.4.1	Probekörpervorbereitung.....	25
3.4.2	Versuchsablauf .....	26
4	Materialien und untersuchte Parameter.....	28
4.1	Bitumen .....	28
4.2	Füller.....	28
4.2.1	Gesamtmineralienbestand mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) .....	29
4.2.2	Rohdichte mittels Pyknometer-Verfahren .....	34
4.2.3	Trockenverdichtbarkeit (Rigden) .....	36
4.2.4	Korngrößenverteilung mittels Nasssiebung und Sedigraphie.....	37
5	Mastix-Prüfprogramm.....	40
5.1	Reihenuntersuchung zur Wiederholpräzision .....	40
5.2	Ermüdungsprüfungen.....	40
6	Ergebnisse und Interpretation.....	42
6.1	Ergebnis der Untersuchung zur Wiederholpräzision.....	42
6.2	Ergebnis der Ermüdungsprüfungen.....	43
6.2.1	Ermüdungskurve.....	43
6.2.2	Wöhlerkurve.....	44
6.2.3	Korrelation zwischen Schubmodul und Lastwechsel bis zum Versagen .....	45
6.2.4	Einfluss der Sieblinie .....	46
6.2.5	Einfluss der Mineralogie .....	48
6.2.6	Lineare Korrelationsanalyse und multiple Regressionsanalyse.....	48
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	51
7.1	Zusammenfassung.....	51
7.2	Ausblick.....	52
7.3	Fazit .....	52
	Literaturverzeichnis .....	I
	Abbildungsverzeichnis .....	IV
	Tabellenverzeichnis.....	V
	Anhang.....	VI

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Rund 95 % des österreichischen Straßennetzes wurden in Asphaltbauweise ausgeführt. Die Anforderungen an eine Straßenkonstruktion umfassen neben einer hohen Verkehrssicherheit und dem Befahrbarkeitskomfort auch die Wirtschaftlichkeit und eine lange Nutzungsdauer. Diese hängt vor allem von den Eigenschaften des eingebauten Mischgutes, der Einbauqualität und der Bemessung der Oberbaukonstruktion ab. [1]

Durch das vermehrte Auftreten von Schäden an Deckschichten, wie Korn- oder Schollen- ausbrüchen, nach kurzen Liegedauern (2 bis 3 Jahre) ergab sich die Notwendigkeit einer Ursachenforschung. Es konnte kein systematischer Zusammenhang der Schäden mit verkehrlichen oder klimatischen Belastungen gefunden werden. Als mögliche Schadensursache ließ sich ein mangelndes Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix (= Bitumen + mineralischer Feinanteil) feststellen. Vorausgehende Arbeiten zu diesem Thema legen die Vermutung nahe, dass insbesondere die mineralogische Zusammensetzung der Feinanteile die Mastixqualität und damit die Haftung am Gestein bzw. die Festigkeit beeinflusst. [2]

Zur Beschreibung der Qualität von Mastix gibt es derzeit noch kein Prüfkriterium. Daher soll eine geeignete Prüfmethode entwickelt und standardisiert werden, die der Bewertung der Mastixqualität in Abhängigkeit von der mineralischen Zusammensetzung und dem Gehalt an Feinanteilen dient. In weiterer Folge sollen die Ergebnisse dem Aufbau eines Qualitätskriteriums mit geeigneten Anforderungswerten dienen. Eine am Institut für Verkehrswissenschaften der TU Wien entwickelte Prüfmethode hat sich hierfür als erfolgsversprechend erwiesen. Zum Einsatz kommt dabei ein Dynamisches Scherrheometer (DSR), das oszillierende Scherbeanspruchungen unter hoher Frequenz aufbringen kann. Es sind nur geringe Probenmengen erforderlich, sodass sich diese Methode auch für Feldproben gut eignet. [2]

Im 2. Kapitel – Stand der Technik – sind die Ergebnisse der Literaturrecherche zu den Themen straßenbautechnische Grundlagen, Straßenbaustoffe sowie Materialermüdung zu finden. Die Entwicklung und Standardisierung der Prüfmethode hinsichtlich Prüfgerät, Probekörper, Versuchsparameter und die dabei aufgetretenen Herausforderungen werden im Kapitel 3 dieser Arbeit ausführlich beschrieben. Die für die Ermüdungsprüfungen verwendeten Materialien und deren Kennwerte werden im Kapitel 4 definiert. Das Kapitel 5 gibt einen schematischen Überblick über das durchgeführte Prüfprogramm. Die Ergebnisse der Versuchsreihe sowie deren Interpretation werden in Kapitel 6 dargestellt. Das letzte Kapitel beinhaltet eine kurze Zusammenfassung und einen Ausblick.

## 2 Stand der Technik

Der Vorläufer der heutigen Asphaltstraße ist die Teerstraße. Ihr Ziel war es, die Schwächen der Schotterstraßen (Staubentwicklung, schnelle Erosion der Deckschicht) durch den Einsatz eines Bindemittels zu beseitigen. Als Bindemittel kam damals Teer zum Einsatz, das aus organischen Stoffen durch zersetzende thermische Behandlung (z. B. Verkokung von Steinkohle) gewonnen wird. Durch das Mischen von Pechen und Ölen, die durch die Destillation von Steinkohlenteer gewonnen werden, wird das Bindemittel Pech (Straßenpech) erzeugt. Aufgrund seiner gesundheitsschädlichen (kanzerogenen) Wirkung ist seine Verwendung im Straßenbau auch in Österreich seit etwa 40 Jahren verboten. [3] [4]

Im Folgenden wird auf die wichtigsten Materialien und Prüfmethode in der Asphalttechnologie genauer eingegangen.

### 2.1 Asphalt

#### 2.1.1 Grundlagen

Gemische aus Bitumen oder bitumenhaltigen Bindemitteln und Gesteins- bzw. Mineralstoffen werden Asphalte genannt. Naturasphalte sind in natürlichen Lagerstätten vorkommende Gemische aus Bitumen und sehr feinkörnigen Mineralstoffen. Hierzu zählt der Trinidad-Asphalt, der auf der Insel Trinidad in einem „Asphaltsee“ vorkommt und auch heute noch als einziger Naturasphalt eingesetzt wird. Technische Asphalte für Trag- und Deckschichten im Straßenbau bestehen aus etwa 93 - 96 M.-% Gesteinskörnungen und 4 - 7 M.-% Bitumen. [1] Sie lassen sich je nach Anteil und Auswahl der Komponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen. [3]

#### 2.1.2 Funktionen und Anforderungen

Um die Anforderungen an eine Straßenkonstruktion – hohe Verkehrssicherheit, hoher Befahrbarkeitskomfort, lange Nutzungsdauer und Wirtschaftlichkeit – optimal zu erfüllen, erfolgt der Aufbau schichtenweise. Hierbei werden Baustoffe, Zusammensetzung (Größtkorn, Hohlraumgehalt, Bindemittelgehalt) und Konstruktionsdicken so gewählt, dass keine unzulässigen Spannungen und Verformungen in dem Asphalt oder den ungebundenen Schichten auftreten. [1]

Nach ihren Funktionen werden folgende Schichten unterschieden [4]:

- Tragschicht,
- Binderschicht,
- Deckschicht,
- Tragdeckschicht.

Die Tragschicht dient dazu, die Lasten des Verkehrs gleichmäßig zu verteilen und in den Untergrund abzutragen. In der Tragschicht treten die größten Zugspannungen auf, der Asphalt muss daher ermüdungsresistent konzipiert werden. Die Mineralstoffzusammensetzung soll möglichst hohlraumarm aufgebaut sein. Eine Binderschicht kommt bei hochbelasteten Aufbauten zur weiteren Lastverteilung zum Einsatz. Aufgrund der großen Scherspannungen in ihrem Bereich, ist sie entsprechend stabil aufzubauen. Die Deckschicht der Straßenkonstruktion dient der direkten Aufnahme der Verkehrslasten und dem Schutz der gesamten Konstruktion. Es werden besondere Ansprüche an ihre Verformungsbeständigkeit sowie ihre Polierbarkeit/Griffigkeit gestellt. Tragdeckschichten kommen im untergeordneten Straßennetz zum Einsatz. Sie vereinen die Funktionen der Trag- und der Deckschicht. [3] [4]

### **2.1.3 Mischgutarten**

Es werden Mischgüter mit Hohlräumen (Walzasphalt) und solche ohne Hohlräume (Gussasphalt, Asphaltmastix) unterschieden. Ein Mischgut mit Hohlräumen ist ein kornabgestuftes Mineralgemisch, bei dem bei höchstmöglicher Lagerungsdichte noch ein mit Luft ausgefüllter Resthohlraumgehalt verbleibt. Es verlässt die Mischanlage relativ locker und muss nach dem Einbau verdichtet werden. Zu den Walzasphalten gehören u. a. Asphaltbeton (AC), Splittmastixasphalt (SMA) und Offenporiger Asphalt (PA). Mischgüter ohne Hohlräume sind kornabgestufte Mineralgemische, deren Hohlräume vollständig mit Bindemittel ausgefüllt sind. Sie sind von Anfang an hohlraumfrei und bedürfen keiner Verdichtung. [3]

#### **Asphaltbeton (AC)**

Die meisten Deckschichten von Asphaltstraßen bestehen aus Asphaltbeton. Seine Sieblinie entspricht im optimalen Fall einer Parabel, wodurch die dichteste Packung der Körner entsteht. Die wichtigsten Anforderungen an Deckschichten sind Verformungsstabilität und Griffigkeit. Außerdem müssen sie verschleißfest und dicht gegen eindringendes Wasser sowie Tausalz sein. Asphaltbeton hat einen Hohlraumgehalt von 2,5 % (Deckschichten) bis 6 % (Tragschichten) und einen geringen Bindemittelgehalt von etwa 3,5 - 4,0 M.-%. [3] [4]

### **Splittmastixasphalt (SMA)**

Splittmastixasphalt besteht aus einem grobkörnigen Splittgerüst, dessen Hohlräume weitgehend durch Mastix ausgefüllt werden (Stützgerüst-Konzept). Seine Sieblinie weist eine diskontinuierliche Korngrößenverteilung (Ausfallkörnung) und einen hohen Anteil an groben gebrochenen Gesteinskörnungen auf. Der hohe Bindemittelgehalt ( $\geq 6,5$  M.-%) macht den Einsatz von stabilisierenden Zusätzen notwendig, um ein Abfließen des Bindemittels während der Herstellung, des Transports und des Einbaus zu verhindern. SMA bietet eine hohe Tragfähigkeit sowie eine gute Makrotextur und eignet sich daher besonders für stark belastete Straßen im hochrangigen Straßennetz. [3] [4]

### **Offenporiger Asphalt (PA)**

Offenporiger Asphalt weist eine ausgeprägte Ausfallkörnung mit verformungsresistentem Monokorngerüst vor. Der große Hohlraumgehalt (17 - 25 Vol.-%), bei dem die Hohlräume miteinander verbunden und von außen zugänglich sind, erleichtern die Oberflächenentwässerung unter Fahrzeugreifen. Außerdem kommt es zu einer Verringerung der Sprühhahnenbildung sowie der Vermeidung von Aquaplaning. Ein weiterer Vorteil von Offenporigem Asphalt ist die Schallabsorption; es kann eine Lärminderung von ca. 3 bis 6 dB erreicht werden. Durch Verunreinigungen der Deckschicht kann die lärmindernde Wirkung und Drainagewirkung teilweise oder ganz aufgehoben werden, daher erfolgen regelmäßig Reinigungsarbeiten mit speziellen Geräten. Ein Nachteil von PA ist, dass im Winterdienst kein präventives Splitt- bzw. Salzstreuen aufgrund des großen Hohlraumgehalts möglich ist. Außerdem ist die Instandsetzung von Teilflächen schwierig und es ist häufiger eine Erneuerung notwendig. Für die Herstellung von PA sind ein polymermodifiziertes Bindemittel (PmB) mit hoher Viskosität und Alterungsbeständigkeit sowie stabilisierende Zusätze notwendig. Aufgrund seiner hohen Tragfähigkeit und guten Makrotextur wird offenporiger Asphalt als Deckschicht eingesetzt. [3] [4]

### **Gussasphalt (MA)**

Die Verwendung von Gussasphalt eignet sich besonders bei hochbeanspruchten Verkehrsflächen im Hoch- und Tiefbau sowie zu Abdichtungszwecken. Er besitzt einen hohen Bitumen- (7,5 - 10 M.-%) und Füllergehalt (20 - 32 M.-%) und keine technisch relevanten Hohlräume. Um eine ausreichende Verformungsstabilität zu gewährleisten, wird für Gussasphalt ein relativ hartes Bindemittel verwendet. Gussasphalt wird im Heißeinbau bei einer Einbautemperatur bis maximal 230°C eingebaut und bedarf keiner Verdichtung. [3] [4]

### **2.1.4 Eigenschaften**

Die Eigenschaften technischer Asphalte sind abhängig von den einzelnen Bestandteilen und deren Mischungsverhältnis. Sie können durch die Härte und Menge des Bindemittels sowie die Art und Zusammensetzung der Mineralstoffe wesentlich beeinflusst werden. [3]

#### **Verarbeitbarkeit**

Die Verarbeitbarkeit ist die wichtigste Eigenschaft des einzubauenden Mischgutes. Sie ist abhängig von der Mischgutzusammensetzung und der Temperatur und beschreibt, ob sich ein Mischgut bei der jeweiligen Einbaudicke und der Art des Einbaus (maschinell oder von Hand) einwandfrei verteilen und verdichten bzw. verstreichen lässt. [3]

#### **Verdichtbarkeit**

Eine Eigenschaft von Walzasphalt ist die Verdichtungswilligkeit, die sich an der zunehmenden Dichte bei steigender Verdichtungsarbeit erkennen lässt. Verdichtungswilliges Mischgut kommt bevorzugt zum Einsatz, wenn trotz geringer Einbaudicke eine hohe Dichtigkeit erreicht werden soll, jedoch keine sehr hohe Standfestigkeit erreicht werden muss. Es handelt sich um Mischgüter mit geringer innerer Reibung und/oder weichem Bitumen. Verdichtungsunwilliges Mischgut benötigt eine intensivere Verdichtungsarbeit und eine längere Verdichtungszeit. Es besteht aus härterem Bitumen, hat eine höhere innere Reibung und wird für hoch beanspruchte Straßen verwendet. [3]

#### **Standfestigkeit**

Unter Standfestigkeit versteht man den Verformungswiderstand, den der Asphalt äußeren Einwirkungen entgegensetzt. Eine ausreichende Standfestigkeit ist notwendig, um auf Dauer die Ebenheit der Fahrbahnoberfläche zu gewähren und somit Spurrinnen vorzubeugen. Eine hohe Standfestigkeit lässt sich durch gute Verzahnung des Korngerüsts sowie der Adhäsion und Steifigkeit des Bitumens erreichen. [3]

#### **Thermische Rissbildung**

Die Rissbildung spielt besonders in der kalten Jahreszeit eine wichtige Rolle. In höheren Temperaturbereichen können die durch äußere Belastungen erzeugten inneren Spannungen im Asphalt durch Relaxation, d. h. durch viskose Verformung des Materials, allmählich abgebaut werden. In tiefen Temperaturbereichen reicht die Viskosität früher oder später nicht mehr aus, um die Spannungen abzubauen, und es kommt zur Rissbildung. [3]

### **Hohlraumgehalt**

Um das Eindringen von Schmutz, Luftsauerstoff und Wasser zu verhindern, sollte Asphalt grundsätzlich möglichst dicht gelagert sein. Aufgrund der starken Volumenvergrößerung von Bitumen bei Erwärmung ist bei Walzasphalt jedoch ein Resthohlraumgehalt notwendig, damit es sich ohne Verringerung der Asphaltfestigkeit ausdehnen kann. Dieser liegt bei drei bis fünf Vol.-%. [3]

### **Verschleißfestigkeit**

Der Widerstand gegen Substanzverlust aufgrund von Verkehrsbeanspruchung wird als Verschleißfestigkeit bezeichnet. Eine hohe Verschleißfestigkeit wird durch die Verwendung von witterungs- und frostbeständigem Gestein mit viel Grobkorn und gedrungener Kornform in möglichst steifem, dichtem Mörtel (= Bitumen + Füller + Sand) erreicht. [3]

### **Griffigkeit**

Eine ausreichende Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche trägt maßgeblich zur Verkehrssicherheit bei. Besonders griffig ist eine Deckschicht, wenn scharfkantige Splittkörner – vor allem der Korngruppe 5/8 oder 8/11 – aus dem Mörtelbett herausragen. [3]

## **2.2 Gesteinskörnungen**

### **2.2.1 Grundlagen**

Die Gesteinskörnung übernimmt die Tragfunktion im Asphalt. Sie soll in jedem Fall witterungs- und frostbeständig sein, eine hohe Druckfestigkeit und in Deckschichten einen ausreichenden Widerstand gegen Polieren und Abrieb besitzen. Die maßgebenden Anforderungen sind im Allgemeinen vom Verwendungszweck abhängig. Die Anforderungen an Gesteinskörnungen für Asphalt können der ÖNORM EN 13043 [5] entnommen werden. [6]

Neben natürlichen Gesteinskörnungen in Form von Sanden, Kiesen oder gebrochenem Gestein, können auch rezyklierte und industriell hergestellte Gesteinskörnungen (z. B. Hochofenschlacke) zum Einsatz kommen. Die Art und Zusammensetzung der Gesteinskörnung kann die Eigenschaften des Asphaltmischgutes wesentlich beeinflussen. Eine höhere Lagerungsdichte oder/und ein hoher Anteil an gebrochenem Korn oder Grobkorn wirkt sich zum Beispiel positiv auf die Verformungsbeständigkeit aus. Der Füller (siehe Abschnitt 2.2.2) hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Mischguteigenschaften.

Bei steigendem Füller-Bitumen-Verhältnis nimmt die Viskosität des gebildeten Mörtels zu, wodurch die Festigkeit als auch der Verformungswiderstand erhöht werden. [6]

### 2.2.2 Begriffe

Gesteinskörnungen können durch Angabe der unteren (d) und oberen (D) Siebgröße in Korngruppen eingeteilt werden. Je nach Siebgröße werden folgende Bezeichnungen verwendet. [5] [6]

#### Grobe und feine Gesteinskörnung

Im Anwendungsbereich für Asphalt gelten laut ÖNORM EN 13043 [5] Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser von  $d \geq 2 \text{ mm}$  und  $D \leq 45 \text{ mm}$  als grob. Feine Gesteinskörnungen haben einen Durchmesser  $D \leq 2 \text{ mm}$ . [2]

#### Feinanteile

Feinanteile sind jene Bestandteile der Gesteinskörnung, die durch ein 0,125 mm Sieb hindurchgehen. Dies sind einerseits die Komponenten der Korngruppe 0/2 und andererseits die anhaftenden Feinanteile der gröberen Korngruppen (Unterkorn). [2]

#### Füller

Als Füller wird laut Norm [5] jene Gesteinskörnung bezeichnet, deren überwiegender Teil durch ein 0,063 mm Sieb hindurchgeht. Es kann in „Fremdfüller“ und „Mischfüller“ unterschieden werden, die beide mineralischen Ursprungs sind und getrennt von den anderen Gesteinskörnungen hergestellt werden. [2]

#### Asphaltmastix

Asphaltmastix, oder kurz Mastix, bezeichnet die Mischung aus Bitumen und Füller bzw. Feinanteilen. Sie ist für den Verbund der groben Gesteinskörnung zuständig und somit maßgebend für den Zusammenhalt im Asphalt. Da es keine normative Festlegung für das Größtkorn in der Mastix gibt, wurde es im Rahmen dieser Arbeit mit 0,125 mm definiert. [2]

## 2.3 Bitumen

### 2.3.1 Grundlagen

Nach ÖNORM EN 12597 [7] ist Bitumen definiert als

*„nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich ist, bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos oder nahezu fest.“*

In der Norm wird unterschieden zwischen Bitumen in Naturasphalt und Bitumen und abgeleitete Produkte.

Bitumenhaltige Baustoffe bezeichnet Stoffe, die ganz oder teilweise aus Bitumen bestehen. Die Haupteinsatzgebiete liegen im Asphaltstraßenbau und in der Abdichtungstechnik. [3]

Bitumen ist ein thermoplastischer Werkstoff, dessen rheologische Eigenschaften größtenteils von der Temperatur abhängig sind. Bei hohen Temperaturen verhält er sich rein viskos, bei tiefen Temperaturen spröde-elastisch, im gebrauchrelevanten Temperaturbereich zeichnet er sich durch visko-elastisches Materialverhalten aus. [6]

Bitumen besteht hauptsächlich aus Kohlenstoffen und Wasserstoffen, sowie einem geringen Anteil an anderen Elementen, wie Schwefel, Sauerstoff und Stickstoff. Obwohl die chemische Zusammensetzung oft sehr unterschiedlich sein kann, haben Bitumen aufgrund der Vielzahl an Stoffen nahezu gleiche Gebrauchseigenschaften. [6]

Die Struktur von Bitumen kann vereinfacht als kolloides Zwei-Phasen-System beschrieben werden. Asphaltene, die eine hohe Molekülmasse besitzen und praktisch unlöslich sind, bilden gemeinsam mit den sie umschließenden Erdölharzen die feste, steifigkeitsgebende, elastische Phase – die Mizellen. Sie befinden sich in einem niedrigermolekularen Dispersionsmedium – den Maltene. Diese bilden die viskose, flüssige, ölige Phase. Das Verhältnis Maltene zu Asphaltene hat einen maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bitumens, insbesondere auf die Festigkeit, Verformbarkeit und Temperaturbeständigkeit. [4]

### **2.3.2 Herstellung**

Die Ausgangsbasis für die Herstellung von Bitumen bildet Erdöl, welches bei Umwandlungsprozessen von organischem Material, wie abgestorbene Algen oder Plankton, entsteht. Das auf dem Meeresgrund abgelagerte Material wird nach und nach von Ton, Sand und weiteren Erdschichten überlagert, von Bakterien in Faulschlamm umgewandelt und durch weitere Sedimentation zu einem festen Muttergestein. Aus dem Wasser des Planktonschlicks entweichen die Kohlenwasserstoffe bei einer Temperatur von 65 bis 120°C und einem Druck von 150 bis 300 bar und wandern nach oben, wo sie sich in Speichergesteinen als Erdöl oder Erdgas ansammeln. [8]

Das stabilisierte, d. h. von leichten Gasen und von unerwünschten Anteilen wie Wasser, Sand und Salz befreite Erdöl wird als Rohöl bezeichnet. Die Gewinnung von Bitumen aus

Rohöl erfolgt durch Destillation – also Verdampfung durch Erwärmung und anschließender Kondensation. In Raffinerien wird im ersten Schritt der zweistufigen Erdöldestillation das Rohöl unter atmosphärischem Druck destilliert, wodurch bei Temperaturen von 350 bis 400°C Benzin, Petroleum, Diesel- und Heizöl verdampfen. Der Rückstand wird einer Vakuumdestillation (Vakuum zwischen 4 und 7 kPa) unterzogen, woraus anschließend das Destillationsbitumen entsteht. Der Härtegrad des Bitumens kann hierbei durch eine Änderung der Destillationsbedingungen (Temperatur, Vakuum) beeinflusst werden. Destillationsbitumen dient als Ausgangsstoff für die Weiterverarbeitung und Modifikation zu Bitumen mit bestimmten Qualitätsanforderungen, z. B. Hartbitumen bzw. Hochvakuumbitumen (durch weitere Destillation in einem besonders hohen Vakuum) oder Oxydationsbitumen (durch Einblasen von Luft in die heißflüssigen Bitumen). [8]

Neben der Gewinnung von Bitumen aus Erdöl gibt es auch natürliche Vorkommen des Stoffes. Als Naturasphalt wird ein relativ hartes, natürlich vorkommendes Bitumen bezeichnet, das mit feinen Mineralstoffanteilen gemischt ist und die gleichen rheologischen Eigenschaften wie Destillationsbitumen aufweist. [3]

### 2.3.3 Arten

Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Bitumenarten.

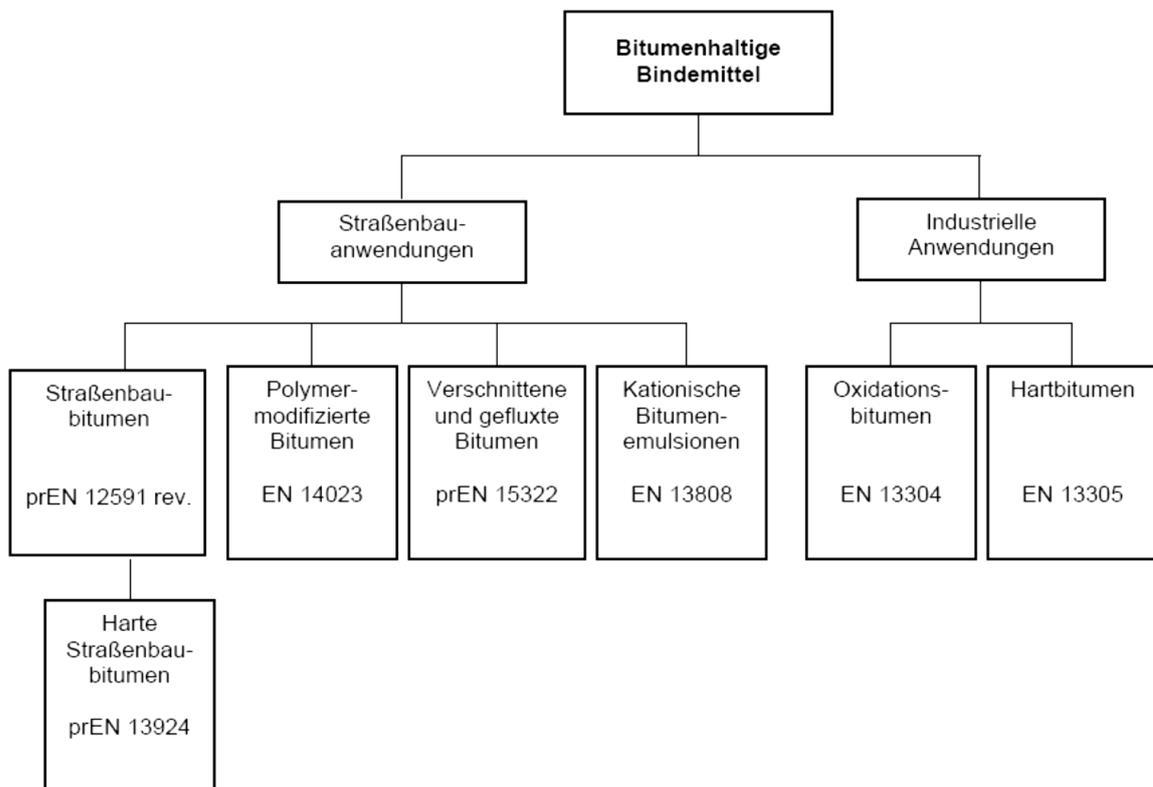


Abbildung 2-1: Arten von bitumenhaltigen Bindemitteln [9]

### **Straßenbaubitumen (Destillationsbitumen)**

Zur Herstellung von Asphalt für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen werden Straßenbaubitumen verwendet, deren Konsistenz von weich bis hart eingestuft werden kann. Die Klassifikation erfolgt anhand des unteren und oberen Grenzwertes der Nadelpenetration in Zehntelmillimeter. Weiche Bitumensorten (z. B. 160/220) werden meist zur Oberflächenbehandlung und bei der Herstellung von Asphaltmischungen für dünne Schichten verwendet. Außerdem dienen sie als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Bitumenemulsionen, Bitumenlösungen und polymermodifizierten Bitumen. Mittelharte Sorten (z. B. 70/100) werden bei der Erzeugung von Walzasphalt, die härteren (z. B. 20/30) bei Gussasphalt verarbeitet. [3]

Die Anforderungen an Straßenbaubitumen finden sich in der ÖNORM EN 12591 [10]. Die in Österreich im Straßenbau gebräuchlichste Bitumensorte ist 70/100.

### **Polymermodifiziertes Bitumen (PmB)**

Um die Gebrauchseigenschaften von Bitumen zu verbessern, werden stabile Gemische von Bitumen und Kunststoffen (Polymeren) hergestellt – polymermodifizierte Bitumen. Die verwendeten Modifikationsmittel werden eingeteilt in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. [9]

Polymermodifizierte Bitumen werden vor allem bei besonders hoher Beanspruchung durch Witterung und/oder Verkehr eingesetzt. Ihre Vorteile sind:

- größere Plastizitätsspanne,
- höhere Kohäsion, d. h. deutlich bessere Haftung an Mineralstoffen,
- günstigere Langzeitalterung,
- große elastische Rückformung nach Entlastung.

Durch die Beimengung von Polymeren soll die Verformungsbeständigkeit des Bitumens bei hohen Temperaturen erhöht und die Sprödigkeit bei tiefen Temperaturen verringert werden.

Die Bezeichnung von polymermodifizierten Bitumen setzt sich aus der Anforderungsspanne für die Nadelpenetration in Zehntelmillimeter und dem Anforderungswert für den Erweichungspunkt Ring und Kugel ( $EP_{RuK}$ ) zusammen. PmB 45/80-50 kennzeichnet ein polymermodifiziertes Bitumen mit einer Nadelpenetration zwischen 45 und 80 Zehntelmillimeter und einem Erweichungspunkt von 50°C. [3]

Die Anforderungen an PmB finden sich in der ÖNORM EN 14023 [11]: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen.

### **Oxidationsbitumen**

Die typische Konsistenz eines Oxidationsbitumens, das auch geblasenes oder Industrie-bitumen genannt wird, ist hart bis elastisch. Die Kurzbezeichnung setzt sich aus zwei Zahlen zusammen, die den Erweichungspunkt Ring und Kugel und die Nadelpenetration angeben (z. B.: 90/10 hat einen Erweichungspunkt von 85 bis 95°C und eine Penetration von 5 bis 15 Zehntelmmillimeter). Die Herstellung von Oxidationsbitumen erfolgt durch das Einblasen von Luft in weiches Destillationsbitumen bei Temperaturen zwischen 230 und 290°C. Das bewirkt durch eine innere Umwandlung eine wesentliche Erweiterung der Plastizitätsspanne. Deshalb wird es meist bei extrem hohen oder extrem tiefen Temperaturen verwendet, z. B. bei Beschichtungen von Dichtungsbahnen, bei Fugenvergussmassen sowie in der Gummiindustrie als Weichmacher. [3]

### **2.3.4 Eigenschaften**

#### **Konsistenz**

Bitumensorten werden hauptsächlich anhand ihrer Härte bzw. Weichheit, sprich ihrer Konsistenz, unterschieden. Es gibt zwei Möglichkeiten um eine beschreibende Größe für die temperaturabhängige Konsistenz anzugeben: Man kann bei einer vorgegebenen Temperatur die Zähigkeit des Bitumens messen oder für eine vorgegebene Zähigkeit die zugehörige Temperatur bestimmen. [3]

Bei der ersten Methode wird gemäß ÖNORM EN 1426 [12] anhand einer konventionellen Bitumenprüfung, der Nadelpenetration, bei einer Prüftemperatur von 25°C die Eindringtiefe einer mit einem Gewicht von 100 g belasteten Nadel in das Bitumen innerhalb von fünf Sekunden in Zehntelmmillimeter gemessen.

Die zweite Variante wird meist anhand der in ÖNORM EN 1427 [13] beschriebenen Bestimmung des Erweichungspunktes mit dem Ring- und Kugel-Verfahren (abgekürzt: EP<sub>RUK</sub>) vorgenommen. Dabei wird eine in einem Stahlring befindliche Bindemittelschicht durch eine Stahlkugel und gleichzeitige Erwärmung belastet bis die Schicht eine bestimmte Verformung erreicht hat. Die Temperatur, bei der eine Verformung von exakt 25,4 mm erreicht wurde, wird als Erweichungspunkt bezeichnet und u. a. in der Kurzbezeichnung von polymermodifiziertem Bitumen oder Hartbitumen verwendet.

#### **Rheologie**

Das Verformungs- und Fließverhalten von Bitumen hängt stark von seiner Temperatur ab. Im Bereich tiefer Temperaturen verhält es sich spröd-elastisch, bei hohen Temperaturen rein viskos. Diese Eigenschaften können anhand verschiedener Verfahren bestimmt werden. [3]

Die Duktilität von Bitumen, also die Eigenschaft sich plastisch zu verformen bevor der Werkstoff versagt, kann nach der in ÖNORM C 9218 [14] beschriebenen Bitumenprüfung bestimmt werden. Dabei wird ein Probekörper mit vorgegebener Form in einem Prüfbad mit einer Temperatur von  $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$  mit einer konstanten Ziehgeschwindigkeit so weit gestreckt, bis der entstehende Faden reißt. Beim Reißen wird die erreichte Verlängerung des Prüfkörpers gemessen und als Maß für die Duktilität in Zentimetern angegeben.

Ähnlich zur Bestimmung der Duktilität ist das Verfahren zur Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen nach ÖNORM EN 13398 [15]. Hierbei wird der Prüfkörper mit konstanter Geschwindigkeit auf eine Länge von  $200 \pm 1$  Millimeter ausgezogen und anschließend in der Mitte durchgeschnitten. Nach 30 Minuten wird der Abstand zwischen den Enden der beiden Bitumenfäden gemessen und daraus die elastische Rückstellung als Prozentsatz berechnet.

Weitere Aussagen über die Fließfähigkeit von weichen Bitumen können durch die Bestimmung der kinematischen und dynamischen Viskosität getroffen werden. [3]

### **Relaxationsvermögen**

Eine weitere temperaturabhängige Eigenschaft von Bitumen ist das Relaxationsvermögen. Es beschreibt die Fähigkeit, durch äußere Belastungen hervorgerufene Spannungen durch viskose Verformung abzubauen. Die Relaxationszeit ist somit von der Viskosität des Bitumens abhängig. Bei mittleren und hohen Gebrauchstemperaturen, d. h. bei weichem Bitumen, können Spannungen relativ schnell abgebaut werden, bei niedrigeren Temperaturen erhöht sich die notwendige Relaxationszeit. Sinkt die Temperatur jedoch zu schnell, kann das erhärtete Bitumen die entstandenen Spannungen nicht immer abbauen und es entstehen Kälterisse. [6] [16]

### **Plastizität**

Der Temperaturbereich zwischen dem Brechpunkt nach Fraaß (BP) und dem Erweichungspunkt Ring und Kugel ( $EP_{\text{RUK}}$ ) wird als „Plastizitätsspanne“ bezeichnet. Bitumen zeichnet sich in diesem Bereich durch zähplastisches Materialverhalten aus. [3]

Der Brechpunkt nach Fraaß wird mittels einer konventionellen Bitumenprüfung bestimmt, bei der ein Metallplättchen mit einem dünnen Bitumenfilm überzogen wird und anschließend im Prüfgerät bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit von 1 Kelvin/Minute abgekühlt und gleichzeitig einer Durchbiegung unterzogen wird. Die Temperatur, bei der es zu einem Riss oder Bruch in der Oberfläche des Bitumens kommt, wird als Brechpunkt nach Fraaß bezeichnet. Unterhalb des BP verhält sich Bitumen zunehmend spröde, oberhalb des Erweichungspunktes Ring und Kugel wird es zähflüssig. [17] [18]

Straßenbaubitumen nach ÖNORM EN 12591 [10] haben üblicherweise eine Plastizitätsspanne von etwa 60°C, polymermodifizierte Bitumen weisen höhere Spannen auf. [19]

### **Adhäsion**

Die Adhäsion oder das Haftverhalten bezieht sich auf die Wechselwirkungen zwischen Bitumen und anderen Stoffen, bei der beide Partner einen Anteil zur Bindungsfestigkeit beitragen. Der Einfluss des Stoffpartners ist im Allgemeinen größer als jener des Bitumens selbst, deswegen ist es in der Regel falsch, von einer guten oder schlechten Haftfestigkeit des Bitumens zu sprechen. Entscheidend ist, dass die zu verbindenden Stoffe, etwa Bitumen und Gesteinskörnung, staubfrei und trocken sind, um eine einwandfreie Benetzung zu erreichen. Das Haftverhalten kann durch möglichst hohe Temperaturen des Bindemittels sowie der Gesteinsoberfläche verbessert werden und wird durch Wasser verschlechtert. [3]

### **Verhalten gegenüber Wasser**

Die Löslichkeit von Bitumen in Wasser liegt bei 0,001 bis 0,01 %, die Diffusionskonstante beträgt etwa  $10^{-8}$  g/(cm·h·mbar). Das bedeutet, Bitumen ist praktisch wasserunlöslich. Daher eignet es sich besonders als Korrosionsschutzstoff und Abdichtungsmaterial. [3]

### **Verhalten gegenüber Chemikalien**

Allgemein gilt je härter das Bitumen ist, desto widerstandsfähiger ist es gegen chemische Einflüsse. Bitumen ist gegen die Einwirkung von organischen und anorganischen Salzen, aggressiven Wässern, Kohlensäure und Alkalien beständig. Löslich ist es hingegen in Kohlenwasserstoffen gleicher Herkunft, wie z. B. Benzin oder anderen Mineralödestillaten, und bestimmten Lösemitteln (Toluol, Benzol). [3]

### **Weitere Eigenschaften**

Mit steigender Härte nimmt auch die Dichte von Destillationsbitumen zu. Bei 25°C beträgt sie  $\rho = 1,01 \pm 0,02$  bis  $1,07 \pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup>. Der kubische Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt im Bereich zwischen 15 und 200°C nahezu konstant  $d_t = 0,0006$  K<sup>-1</sup>. Da die Wärmeleitfähigkeit von Bitumen sehr niedrig ist, zeigt es eine gute Isolierwirkung. Im Bereich von 0 bis 70°C beträgt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,16$  W/(m·K). Ebenso weist es eine geringe elektrische Leitfähigkeit von 0,1 bis  $1 \cdot 10^{-13}$  S/cm bei 35°C auf. [3]

### 2.3.5 Alterung von Bitumen

Die Alterung von Bitumen führt zu einer zeitlichen Verschlechterung seiner Gebrauchseigenschaften. Das Bitumen wird dadurch härter und versprödet. Den größten Einfluss auf den Alterungsprozess haben folgende Parameter [20]:

- Temperatur,
- Luftsauerstoff,
- Wasser,
- Verkehrsbelastung (mechanische Belastung sowie Schadstoffe) und
- Sonneneinstrahlung.

Unter der *destillativen Alterung* versteht man das Verdampfen öligere Anteile bei erhöhten Gebrauchstemperaturen, z. B. bei der Asphaltherstellung. Hierbei handelt es sich um einen rein physikalischen Vorgang, der zu einer Verhärtung des Bitumens führt und eine fortschreitende Alterung verursachen kann. Das Ausmaß der Alterung ist dabei abhängig von der Bitumensorte, der spezifischen Oberfläche und der Temperatur. Da weichere Bitumen einen höheren Anteil an niederviskosen Ölen besitzen, kann bei diesen ein stärkeres Altern beobachtet werden. Außerdem steigt die Verdampfungsgeschwindigkeit mit der spezifischen Oberfläche. Je fortgeschrittener die Bitumenverhärtung ist, umso schwächer wird die destillative Alterung. [20]

Bei der *oxidativen Alterung* tritt eine Verhärtung des Bitumens durch Oxidation ein. Bei diesem rein chemischen Vorgang reagiert das Bitumen mit Luftsauerstoff, Ozon, Radikalen und in Wasser gelösten Radikalen, wie  $\text{OH}^\cdot$ . Das Ausmaß und die Geschwindigkeit der Alterung ist dabei abhängig von der Temperatur, dem Luftzutritt, der spezifischen Oberfläche, sowie der Sonneneinstrahlung. Sie verläuft umso schneller, je höher die Temperatur, spezifische Oberfläche und Intensität der Lichteinstrahlung ist. [20]

Die Veränderung der Kolloidstruktur durch die destillative und oxidative Alterung von Bitumen wird als *Strukturalterung* bezeichnet. Es kommt zu einer Abnahme der leichten Maltene und einer Zunahme der höhermolekularen Anteile der Asphaltene, wodurch das Bitumen an Strukturviskosität gewinnt und härter wird. [20]

#### **Zeitliche Alterungsstufen**

Bitumen verändert mit der Zeit seine Gebrauchseigenschaften. Daher ist es sinnvoll, es in verschiedene Alterungsstufen einzuteilen, um vergleichende Aussagen treffen zu können. Als ungealtertes bzw. Frischbitumen bezeichnet man solches, das unverwendet und gebrauchsfertig aus der Raffinerie kommt. [9]

Die *Kurzzeitalterung* beschreibt jene Zustandsänderungen, die durch Transport, Lagerung, Pumpvorgänge, Mischen mit Mineralstoffen und Mischguteinbau hervorgerufen werden. Während dieser Prozesse kommt es zur Verdunstung noch verbliebener niedrigsiedender Komponenten aufgrund hoher Temperaturen. [9]

Bei der *Langzeitalterung* wird zusätzlich zu diesen Vorgängen eine langjährige Asphaltliegedauer von fünf bis zehn Jahren betrachtet. Aufgrund unterschiedlicher Umwelt- und Verkehrsbelastungen ist eine genauere Angabe der Liegedauer nicht möglich. Dabei kommt es im Bitumen zur Oxidation als Reaktion mit Luftsauerstoff und zu Änderungen in der kolloidalen Struktur. [9]

In Abbildung 2-2 ist der zeitliche Verlauf der Alterung von Bitumen dargestellt.

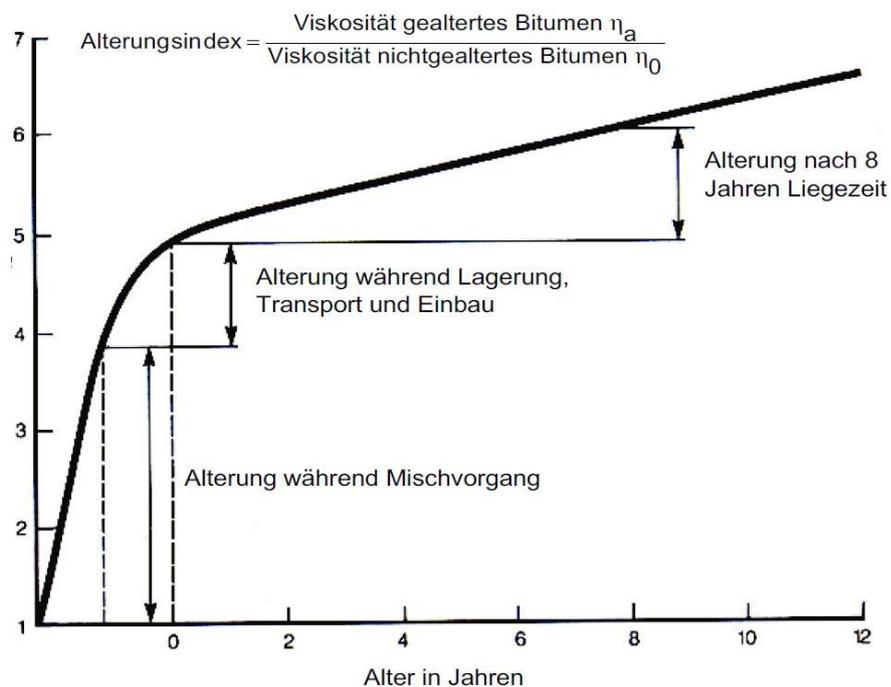


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung des Alterungsverlaufs von Bitumen [9]

### Simulation der Feldalterung im Labor

Unter Feldalterung versteht man die „natürliche“ Alterung des Bitumens, wie sie im üblichen Gebrauch (Transport, Lagerung, Mischvorgang, Einbau, usw.) eintritt. Um die Eigenschaften eines gealterten Bitumens erfassen bzw. voraussagen zu können, wurden Methoden entwickelt, mit denen die Feldalterung im Labor simuliert werden kann. Die in Österreich gebräuchlichsten Methoden werden im Folgenden kurz beschrieben. [9]

#### *Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT*

Die Simulation der Kurzzeitalterung wird im Labor mittels RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) nach ÖNORM EN 12607-1 [21] durchgeführt. Ziel ist es, eine Masseänderung durch

destillative und oxidative Einflüsse am Bitumen zu bewirken, das danach mit anderen Methoden weiter geprüft wird. Dazu werden mit 35 g Bitumen gefüllte Glasflaschen in einer Trommel bei konstanter Prüftemperatur von 163°C rotiert, sodass ein dünner Bitumenfilm mit möglichst großer Oxidationsoberfläche entsteht. Die Proben werden bei einem Luftstrom von  $4,0 \pm 0,2$  l/min für  $75 \pm 1$  min in der Wärmekammer belassen und sind anschließend binnen 72 Stunden nach den einzelnen Prüfverfahren (Penetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel, dynamische Viskosität) zu prüfen. [9]

### *Pressure Aging Vessel – PAV*

Eine Langzeitalterung, die die Bitumenveränderung während einer Asphaltliegedauer von fünf bis zehn Jahren simulieren soll, wird nach ÖNORM EN 14769 [22] mit dem Pressure Aging Vessel Verfahren an bereits RTFOT-gealtertem Bitumen durchgeführt. Hierbei werden mit  $50,0 \pm 0,5$  g Bitumen gefüllte Schalen in einem Druckkessel bei einer vorgegebenen Temperatur zwischen 90°C und 110°C mit 2,07 MPa Druck beaufschlagt. Durch die hohe Temperatur und den hohen Druck erfährt das Bitumen eine beschleunigte Oxidation, ohne dass es zu einem Verlust flüchtiger Bitumenbestandteile kommt. An den PAV-gealterten Proben werden anschließend weitere Prüfungen durchgeführt, um die Veränderungen der Gebrauchseigenschaften zu bewerten.

Weitere Methoden zur Simulation der Feldalterung von Bitumen im Labor sind u. a. der Thin Film Oven Test, Rotating Flask Test und Rotating Cylinder Aging Test. [9]

## **2.4 Materialermüdung**

Nach ÖNORM EN 12697-24 [23] ist Ermüdung definiert als

*„Verringerung der Festigkeit eines Materials bei wiederholter Belastung im Vergleich mit der Festigkeit unter einer Einzellast.“*

Im Asphaltstraßenbau kann Materialermüdung in zwei verschiedenen Formen auftreten. Einerseits besteht die Gefahr der Netzzrissbildung. Hierbei entstehen durch wiederholte Beanspruchung durch den Schwerverkehr meist an der Unterseite der bituminösen Tragschicht Mikrorisse. Diese pflanzen sich bei weiterer Belastung zu Makrorissen fort bis sie schließlich zur Deckschicht durchdringen und dort in Form von Netzzrissen sichtbar werden (siehe Abbildung 2-3, links). Die andere Art der Ermüdungsschäden im Asphalt tritt in Form von Kornausbrüchen auf (siehe Abbildung 2-3, rechts). Ursache dafür könnte eine mangelnde Verbundwirkung der Asphaltmastix, die die grobe Gesteinskörnung zusammenhält, sein. [2]



**Abbildung 2-3: Netzrisse und Kornausbrüche [2]**

Zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmischgut gibt es bereits eine normierte Prüfmethode, die in der ÖNORM EN 12697-24 [23] beschrieben ist und im Abschnitt 2.4.1 kurz erläutert wird.

Die Entwicklung und Standardisierung einer Ermüdungsprüfung für Asphaltmastix wird in Kapitel 3 genau beschrieben.

### **2.4.1 Ermüdungsversuch an Asphaltmischgut**

Die gebrauchsvorhaltensorientierte Asphaltprüfung zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens wird in Österreich standardmäßig mittels Vierpunktbiegebalken (4PBB) durchgeführt. Hierbei wird ein prismatischer Probekörper, der an vier Punkten gehalten wird, einer periodischen, dehnungsgesteuerten Belastung unterzogen. Die Verschiebungsamplitude ist als Funktion der Zeit konstant. Gemessen wird die für die vorgegebene Dehnung benötigte Kraft und nach jedem Lastwechsel wird der Steifigkeitsmodul bestimmt. [2] [9]

Das Ergebnis dieses Versuches ist die Anzahl der Lastwechsel ( $N_{zul}$ ) bis sich der Steifigkeitsmodul auf die Hälfte des Ausgangswertes verringert hat. Die Prüfung muss für eine gegebene Temperatur und Frequenz bei drei unterschiedlichen Belastungsstufen an je sechs Probekörpern durchgeführt werden. Das bedeutet, dass diese Prüfmethode sowohl zeit- als auch materialintensiv ist. Die Daten der insgesamt 18 Versuche werden in einem Diagramm dargestellt, bei dem die Dehnungsstufen der Anzahl an Lastwechseln bis zur Ermüdung ( $N_{zul}$ ) gegenübergestellt werden (siehe Abbildung 2-4). Somit ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Belastung und Ermüdungsfestigkeit (Wöhlerkurve). Aus der Wöhlerkurve kann nun der Kennwert für die Ermüdungsfestigkeit  $\epsilon_6$  abgelesen werden. Er entspricht jener Dehnungsstufe, bei der genau eine Million Lastwechsel ( $N_{zul} = 10^6$  LW) ertragen werden können. [2] [9]

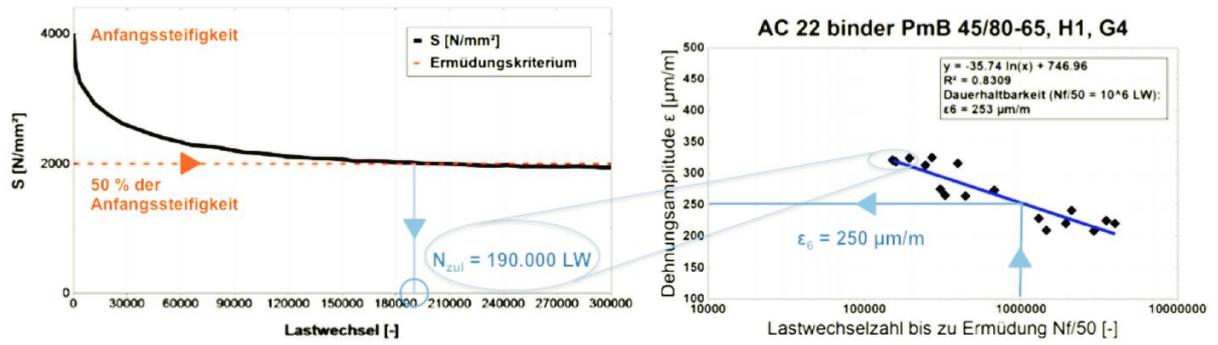


Abbildung 2-4: Auswertung eines 4PBB-Versuches und Ermittlung von  $\epsilon_6$  [2]

## 3 Entwicklung und Standardisierung der Prüfmethodik

### 3.1 Prüfgerät

#### 3.1.1 Anforderungen und Wahl des Prüfgerätes

Um die Prüfdauer in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zu halten, ist eine hohe Frequenz der aufgetragenen Belastung erforderlich. Weiters ist es von Vorteil, wenn sich der Versuch – im Gegensatz zum 4PBB-Versuch – mit geringen Probemengen durchführen lässt. [2]

Als sinnvoll hat sich der Einsatz eines Dynamischen Scherrheometers (DSR) erwiesen. Neben statischen Belastungen kann dieses auch oszillierende Scherbeanspruchungen unter hoher Frequenz aufbringen. Außerdem sind dafür nur geringe Probemengen notwendig, sodass sich die Methode auch für Feldproben eignet. Weitere Vorteile des DSR liegen darin, dass auch eine spannungsgesteuerte Prüfung möglich ist und bis zum Materialversagen geprüft werden kann. [2]



Abbildung 3-1: Dynamisches Scherrheometer – Anton Paar MCR 302

### 3.1.2 Herausforderungen

Eine der Herausforderungen an das Prüfgerät lag darin, dass Mastix im Vergleich zu Bitumen eine deutlich höhere Steifigkeit hat. Daher stellt die Ermüdungsprüfung einen hohen Anspruch an das Prüfgerät selbst dar. Es muss imstande sein, ein ausreichend hohes elektrisches Drehmoment über mehrere Stunden bereitstellen zu können. [2]

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Mastixprüfungen wurden mit einem neuen Rheometer, Modell Anton Paar MCR 302 mit aktiv temperierter Abdeckhaube inkl. optionaler Luftspülung (H-PTD200) (siehe Abbildung 3-1), durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit mit jenen Mastixprüfungen sicherzustellen, die bereits zuvor mit dem alten DSR (Modell Anton Paar MCR 300) durchgeführt wurden, mussten einige Voruntersuchungen gemacht werden. [2]

Anfangs zeigten die Vergleichsversuche geringere Steifigkeiten sowie geringere Ermüdungsfestigkeiten. Der Grund dafür lag darin, dass die Temperatur des Probekörpers in der Mitte um etwa 4°C vom Sollwert (10°C) abwich. Gemessen wurde der Temperaturgradient innerhalb des Probekörpers mit sehr dünnen Thermoelementfühlern. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde die Luftspülung der Abdeckhaube aktiviert und somit eine homogene Temperaturverteilung innerhalb der Probe sichergestellt. Bei den weiteren Vorversuchen erreichten nun alle Probekörper signifikant höhere Ermüdungsfestigkeiten. Außerdem konnte eine bessere Wiederholbarkeit festgestellt werden. Es liegt der Verdacht nahe, dass beim alten DSR (MCR 300) die Raumtemperatur einen Einfluss auf die Prüfung hatte und die luftgespülte Abdeckhaube des neuen Modells (MCR 302) für die bessere Wiederholbarkeit verantwortlich ist. Das bedeutet, dass der entwickelte Ermüdungsversuch eine hohe Sensitivität und damit hohe Anforderungen gegenüber der Temperierungsvorrichtung des Rheometers hat. Eine Vergleichbarkeit mit jenen Mastixprüfungen, die mit dem alten DSR durchgeführt wurden, konnte somit nicht sichergestellt werden. [2]

### 3.1.3 Funktionsweise eines Dynamischen Scherrheometers

Die Prüfung mit dem DSR gehört zu den Gebrauchsverhaltensorientierten (GVO) Prüfmethoden. Das Ziel solcher Methoden ist es, eine Aussage über die Gebrauchseigenschaften des Bindemittels im Asphalt zu treffen. Daher werden die Versuche bei in der Praxis relevanten Temperaturen durchgeführt. Neben dem Dynamischen Scherrheometer zählen auch das Rotationsviskosimeter, das Biegebalkenrheometer und der Direkte Zugversuch zu den GVO Prüfverfahren. Es können dadurch Angaben über das Ermüdungsverhalten, die Verformbarkeit, die Verarbeitbarkeit und das Tieftemperaturverhalten gemacht werden. [9]

Bei der Prüfung mit dem DSR wird ein Probekörper aus bituminösem Bindemittel zwischen zwei Stahlplatten eingebaut und durch eine Scherspannung beansprucht. Die durch Oszillation der oberen Platte hervorgerufene Scherbeanspruchung verursacht eine Deformation der Probe (siehe Abbildung 3-2). [9]

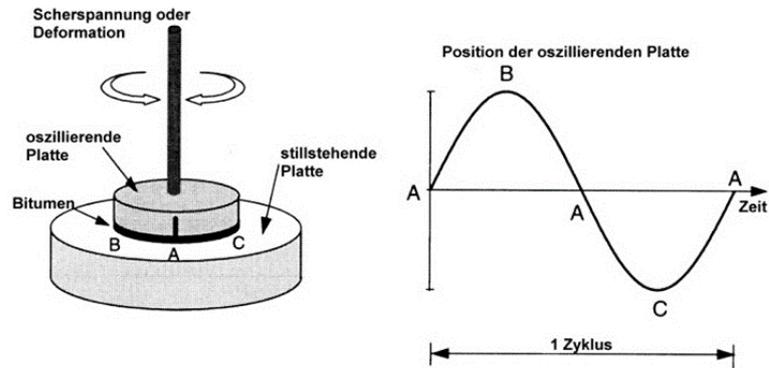


Abbildung 3-2: Funktionsweise des DSR, Oszillationsversuch [9]

Im Materialverhalten lassen sich zwei Zustände unterscheiden: ideal-elastisches Verhalten nach Hooke und ideal-viskoses Verhalten nach Newton. Bei ideal-elastischem Materialverhalten stehen Scherspannung und Deformation in einem direkten, proportionalen Zusammenhang. Bei ideal-viskosem Verhalten gibt es eine maximale Zeitverschiebung zwischen aufgebrachtener Scherspannung und resultierender Deformation. Die Zeitverschiebung wird durch den Phasenverschiebungswinkel  $\delta$ , oder kurz Phasenwinkel, ausgedrückt. Ein Winkel von  $0^\circ$  entspricht ideal-elastischem, einer von  $90^\circ$  ideal-viskosem Verhalten. Der für Bitumen gebrauchtsrelevante visko-elastische Bereich befindet sich dazwischen. [2]

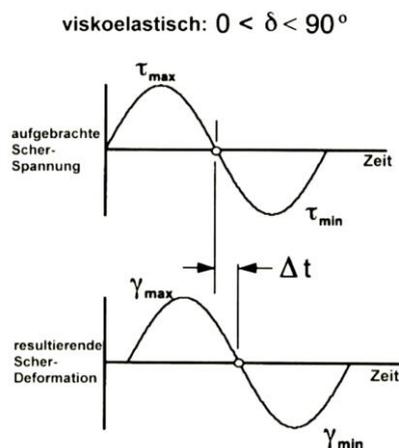


Abbildung 3-3: Viskoelastisches Materialverhalten, Phasenverschiebungswinkel  $\delta$  [9]

Der Phasenverschiebungswinkel wird mit folgender Formel berechnet [2]:

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360^\circ \quad \text{mit} \quad t = \frac{1}{f}$$

Darin ist

$\delta$	Phasenverschiebungswinkel [°]
$\Delta t$	Zeitverschiebung zwischen $\tau_{\max}$ und $\gamma_{\max}$ [s]
$t$	Zeit für eine Schwingung [s]
$f$	Frequenz [Hz]

Die zweite Messgröße ist der komplexe Schubmodul  $|G^*|$ , ein Maß für die Verformungsresistenz. Er gibt an, welche Spannung notwendig ist, um eine vorgegebene Deformation zu erreichen („Controlled Deformation“ Modus), oder welche Deformation bei einer vorgegebenen Spannung auftritt („Controlled Stress“ Modus). [2]

Die Berechnung des komplexen Schubmoduls für zylindrische Probekörper erfolgt mit folgender Formel [2]:

$$|G^*| = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad \text{mit} \quad \tau_{\max} = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\pi \cdot r^3} \quad \text{und} \quad \gamma_{\max} = \frac{\alpha_{\max} \cdot r}{h}$$

Darin ist

$ G^* $	komplexer Schubmodul [Pa]
$\tau_{\max}$	Scherspannung [Pa]
$\gamma_{\max}$	Deformation [-]
$M_{\max}$	maximales Drehmoment [Nm]
$r$	Radius der Messgeometrie [m]
$\alpha_{\max}$	Verdrehwinkel [rad]
$h$	Messspalt [m]

Der komplexe Schubmodul kann in zwei Komponenten aufgeteilt werden. Der elastische Anteil  $G' = |G^*| \cdot \cos(\delta)$  wird auch als Speichermodul oder Realteil von  $|G^*|$  bezeichnet. Der viskose Anteil  $G'' = |G^*| \cdot \sin(\delta)$  wird auch Verlustmodul oder Imaginärteil genannt. Zwei Materialien können den gleich großen Schubmodul besitzen, jedoch unterschiedliche elastische bzw. viskose Eigenschaften haben, wenn die Realteile/Imaginärteile von  $|G^*|$  unterschiedlich groß sind. [2]

## 3.2 Mastixproben

### 3.2.1 Mischungsverhältnis der Mastixproben

Das Masseverhältnis von Bitumen zu Füller bzw. Feinanteilen wurde für die Versuchsreihe mit 1 : 1,5 festgelegt. Das entspricht etwa einer realitätsnahen Ermüdungsprüfung für AC Mischgüter. Vorversuche wurden mit verschiedenen Mischungsverhältnissen zwischen

1 : 0,5 und 1 : 2,5 durchgeführt. Die Wiederholbarkeit der Ermüdungsprüfungen hat jedoch ab einem Verhältnis von 1 : 2,0 deutlich abgenommen und schien daher nicht als sinnvoll. [2]

### 3.2.2 Herstellung einer Mastixprobe

Zur Herstellung einer Mastixprobe wird zuerst die benötigte Masse an Füller bzw. Feinanteilen in den Mischbehälter eingewogen und anschließend für eine Stunde bei 180°C im Trockenschrank erwärmt. Das Verhältnis von Bitumen zu Füller/Feinanteilen (B : F) beträgt 1 : 1,5. Um den Mischvorgang zu vereinfachen und eine besonders homogene Masse herstellen zu können, sollte die Gesamtprobenmenge nicht zu klein gewählt werden. Die Mastixproben wurden mit 40, 50 oder 60 ( $\pm 0,1$ ) g Bitumen und dementsprechend 60, 75 oder 90 ( $\pm 0,1$ ) g Füller bzw. Feinanteilen hergestellt. [2] [24]

Das Bitumen ist vor dem Mischvorgang ebenfalls zu erhitzen. Mit einem Glas- oder Metallstab wird geprüft, ob sich die gesamte Menge verflüssigt und homogenisiert hat. Dann wird die benötigte Menge an flüssigem Bindemittel in den Mischbehälter eingewogen und die Mischung solange mit einem Metallstab händisch verrührt bis eine homogene Masse entsteht. Anschließend wird der Mischbehälter mit Deckel in den Kühschrank bei etwa 5°C gestellt, um ein etwaiges Absinken des Füllers/Feinanteils und damit ein Entmischen der Mastixprobe zu verhindern. [2] [24]

## 3.3 Versuchsrandbedingungen

### 3.3.1 Prüftemperatur und -frequenz

Die Prüftemperatur wurde mit 10°C festgelegt. Bei dieser Temperatur erreicht die Mastixprobe eine ausreichende Steifigkeit, sodass ein Kriechen verhindert wird. Dies ist zwingend notwendig, damit der Probekörper nicht der Ermüdungsprüfung ausweicht. [2]

Es wurde eine Prüffrequenz von 30 Hz gewählt, um die Prüfdauer auf einem praxisgerechten Niveau zu halten. Das entspricht 108.000 Lastwechseln innerhalb einer Stunde. [2]

### 3.3.2 Probekörpergeometrie

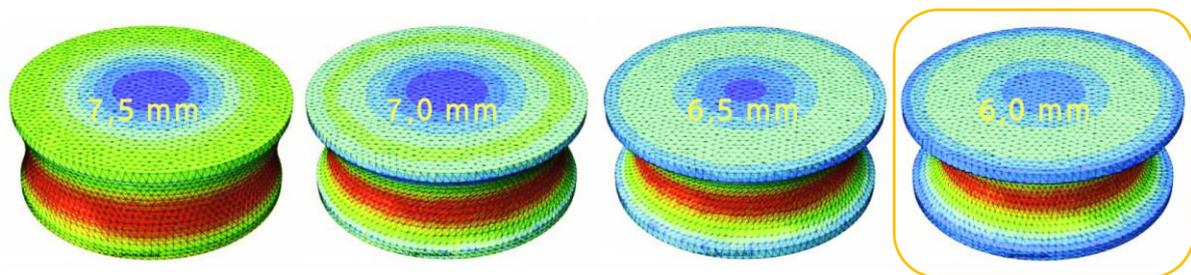
Im nächsten Schritt musste eine passende Probekörpergeometrie gewählt werden. Für die Prüfung von Bindemitteln mit einem DSR wird standardmäßig das Platte-Platte Messsystem verwendet. Während die untere Platte (Stator) stillsteht, oszilliert die obere Platte (Rotor oder auch als Prüfgeometrie bezeichnet) mit der festgelegten Frequenz. Für Versuche im Temperaturbereich von 4 bis 40°C wird üblicherweise die Prüfgeometrie PP08 mit einem Durchmesser von 8,0 mm verwendet. [2]



**Abbildung 3-4: Platte-Platte System, Prüfgeometrie PP08**

In zahlreichen Vorversuchen hat sich eine zylindrische Probekörpergeometrie mit einem Durchmesser von 8,0 mm und einer Höhe von 2,0 mm als ungeeignet erwiesen, da die Probekörper nicht das gewünschte Bruchverhalten zeigten. Teilweise brachen sie innerhalb der Mastixprobe (Kohäsionsbruch), teilweise rissen die Proben aber von der Stahloberfläche (Stator oder Prüfgeometrie) glatt ab (Adhäsionsbruch). Da für einen Ermüdungsversuch jedoch nur das Materialverhalten bedeutend ist und nicht der Verbund zum Prüfgerät, war eine Variation der Geometrie notwendig. [2] [24]

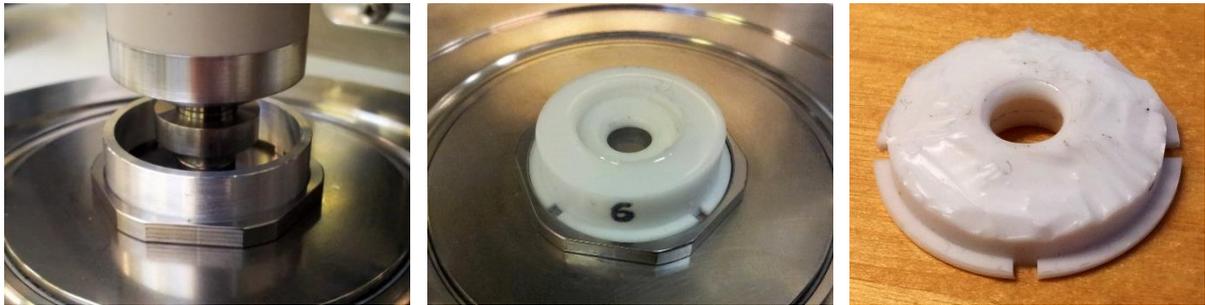
Zuerst wurde die Höhe von 2,0 mm auf 3,0 mm erhöht, wodurch aber noch nicht das gewünschte Bruchverhalten erreicht werden konnte. Als Lösung wurde der Probekörper mit einer Einschnürung versehen, sodass er die geometrische Form eines Hyperboloids aufweist. Dadurch wird in der Mitte eine Spannungsspitze erreicht und der Probekörper bricht an der gewünschten Stelle. Es wurden Probekörper mit Einschnürungen auf 7,5 mm, 7,0 mm, 6,5 mm und 6,0 mm konstruiert und mit der Software Abaqus einer FE-Simulation unterzogen, um die Auswirkungen auf die Spannungsverteilung innerhalb des Probekörpers festzustellen (siehe Abbildung 3-5). Eine Einschnürung auf 6,0 mm und eine Probekörperhöhe von 3,0 mm hat sich als optimal erwiesen. [2]



**Abbildung 3-5: FE-Modellierung der Hyperboloide [2]**

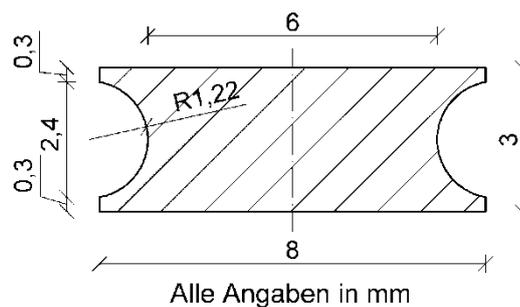
Mit Hilfe einer Positivform aus Edelstahl und gießbarem 2-Komponenten-Silikon wurde eine Silikonform hergestellt (siehe Abbildung 3-6). Diese Form dient als Ausgangsbasis zur Herstellung jedes einzelnen Probekörpers. Sie ist kurzfristig bis 180°C belastbar, damit die Mastix schmelzflüssig eingebracht werden kann, und wurde an einer Stelle eingeschnitten,

um sie nach dem Eingießen der Probe wieder aus dem Prüfgerät entfernen zu können. [2]  
[24]



**Abbildung 3-6: Edelstahl-Positivform im DSR, gegossene Silikonform, fertige Silikonform [2]**

Die exakte Probekörpergeometrie, die mithilfe der Negativform aus Silikon hergestellt wird, ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Am oberen und unteren Ende wurde jeweils ein Plateau von 0,3 mm angeordnet, damit der kreisrunde Einschnitt nicht direkt am Rotor bzw. Stator endet. Dies würde zu ungünstigen Spannungskonzentrationen führen. [2]



**Abbildung 3-7: Probekörpergeometrie [2]**

## 3.4 Versuchsdurchführung

### 3.4.1 Probekörpervorbereitung

Bevor die tatsächliche Ermüdungsprüfung starten kann, muss mit der Probekörpervorbereitung begonnen werden. Diese umfasst alle Arbeiten von der Entnahme der Mastixprobe aus dem Behältnis bis zum Eingießen der schmelzflüssigen Mastix in die Silikonform. Um ein etwaiges Entmischen der Probe zu verhindern, wird das Behältnis stets im Kühlschrank aufbewahrt und erst kurz vor der Probenentnahme herausgeholt. [2]

Zunächst wird eine ausreichend große Menge der Mastixprobe entnommen, um sie bei etwa 180°C aufzuschmelzen. Mit einem Glas- oder Metallstab wird sie vor dem Eingießen in die Silikonform noch einmal homogenisiert. Die Silikonform befindet sich direkt im Rheometer („interne Probekörpervorbereitung“) und wird mit einem kleinen Gummiband fixiert. Dadurch wird die Herstellung von homogenen und maßhaltigen Probekörpern garantiert, um eine gute

Wiederholpräzision zu erreichen. Anschließend kann die schmelzflüssige Probe direkt in das Rheometer eingebracht werden. [2]

#### 3.4.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf gliedert sich bei interner Probekörpervorbereitung wie folgt.

Zuerst wird die Luftzufuhr der Abdeckhaube eingeschaltet und auf einen Volumenstrom von 200 L<sub>N</sub>/h eingestellt. Dann wird die Prüfgeometrie PP08 (siehe Abbildung 3-4, rechts) in das Gerät eingebaut. Um den Nullspalt bei einer Prüftemperatur von 10°C zu bestimmen, wird die Temperierhaube abgesenkt und die Prüfeinrichtung auf 10°C temperiert. Anschließend wird der Nullspalt bestimmt.

Danach kann die mit einem Gummiring gesicherte Silikonform eingesetzt und die Prüfeinrichtung auf die Einbautemperatur von 130°C aufgeheizt werden. Dadurch soll verhindert werden, dass die schmelzflüssig eingebrachte Mastix zu schnell bzw. ungleichmäßig abkühlt. Nach 600 Sekunden Temperierung wird die Mastixprobe mit Überschuss eingegossen. Nun wird die Prüfgeometrie auf die Messposition, d. h. auf 3 mm Höhe, herangefahren und die Prüfeinrichtung wieder auf 10°C abgekühlt.

Weitere 600 Sekunden später kann überschüssige Mastix gegebenenfalls entfernt und die Silikonform aus dem Gerät entnommen werden. Danach wird für weitere 900 Sekunden auf 10°C temperiert, um sicherzustellen, dass der Probekörper überall eine Temperatur von 10°C erreicht hat und keine verfälschten Ergebnisse entstehen (siehe dazu Abschnitt 3.1.2). Nach diesen 900 Sekunden startet automatisch der Ermüdungsversuch. [2]



Abbildung 3-8: Eingießen der Mastix, fertiger Probekörper [2]

In Tabelle 3-1 sind die einzelnen Schritte der Versuchsvorschrift noch einmal kurz zusammengefasst.

<b>Schritt</b>	<b>Temperaturvorgabe</b>	<b>Dauer</b>
Luftzufuhr der Abdeckhaube einschalten auf 200 L <sub>N</sub> /h	Raumtemperatur	
Prüfgeometrie PP08 einbauen	Raumtemperatur	
Temperieren auf Prüftemperatur	10°C	600 s
Nullspalt bestimmen	10°C	
Silikonform einlegen	10°C	
Temperieren auf Einbautemperatur	130°C	600 s
Mastixprobe eingießen	130°C	
Temperieren auf Prüftemperatur	10°C	600 s
ggf. überschüssige Mastix entfernen	10°C	
Silikonform entnehmen	10°C	
Temperieren auf Prüftemperatur	10°C	900 s
Start der Ermüdungsprüfung	10°C	

**Tabelle 3-1: Versuchsablauf**

## 4 Materialien und untersuchte Parameter

### 4.1 Bitumen

In Zuge dieser Arbeit kam ein Straßenbaubitumen 70/100 der Rohölprovenienz Arabian Heavy zum Einsatz (PG 64-22, continuous PG 65-25). Es wurde ausgewählt, da es sich im Gegensatz zu PmB um ein rheologisch einfaches Produkt handelt und Bitumen der Sorte 70/100 im Straßenbau in Österreich am gebräuchlichsten sind. Das Bitumen trägt den TU-internen Laborcode B136A. [2]

In der folgenden Tabelle sind die laut ÖNORM EN 12591 [10] geforderten Bitumenkennwerte und die Messwerte der im Labor durchgeführten konventionellen Bitumenprüfungen angegeben. [2]

<b>Merkmal gemäß ÖNORM EN 12591</b>	<b>Prüfverfahren gemäß</b>	<b>Einheit</b>	<b>Anforderungs- wert</b>	<b>Messwert</b>
Penetration 25°C	EN 1426	0,1 mm	70 bis 100	<b>80</b>
Erweichungspunkt RuK	EN 1427	°C	43 bis 51	<b>45,2</b>
Brechpunkt nach Fraaß	EN 12593	°C	≤ -10	<b>-19</b>
Beständigkeit gegen Verhärtung				
verbleibende Penetration	EN 1426	%	≥ 46	<b>63</b>
Anstieg Erweichungspunkt RuK	EN 1427	°C	≤ 9	<b>7,0</b>

Tabelle 4-1: Konventionelle Bitumenkennwerte 70/100 [2]

### 4.2 Füller

Als Füller bzw. Feinanteile wurden Produkte unterschiedlicher Gesteinsart verwendet. Ziel war es hierbei, hinsichtlich ihrer Eigenschaften möglichst unterschiedliche Materialien in die Entwicklung der Prüfmethode miteinzubeziehen. [2]

In Tabelle 4-2 wird ein Überblick über die untersuchten Füller und Feinanteile gegeben. Jede Probe hat einen TU-internen Laborcode. Die Bezeichnung entspricht hauptsächlich dem Mineralienbestand, der mittels Röntgendiffraktometrie XRD ermittelt wurde. Die Herkunft gibt Aufschluss darüber, ob die Probe dem Straßenbaulabor der TU Wien als fertig verwendbarer Füller für die Verwendung in Asphaltmischgut übergeben wurde oder durch Aussieben mit einem 125 µm Sieb aus einer Gesteinsprobe der Korngruppe 0/2 gewonnen wurde. Das

hochreine Produkt F041 wurde vom Laborbedarfshändler Carl Roth GmbH + Co. KG bezogen. Bei F105 handelt es sich um eine selbst hergestellte Mischprobe, die zu jeweils gleichen Teilen aus F040 und F101 besteht. Die beiden vermischten Proben haben sehr unterschiedliche Sieblinien. Daraus sollen Erkenntnisse über den Einfluss der Sieblinie auf die Ermüdungsprüfung gewonnen werden. [2]

<b>Probe</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Herkunft</b>
F036	Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F038	Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F039	quarzreiches Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F040	Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F041	reines Quarzmehl	Laborbedarf Carl Roth GmbH & Co. KG
F051	Kersantit/Granitporphyr	aus 0/2 bis 125 µm ausgesiebt
F052	schichtsilikat-/feldspatreiches Quarzmehl	aus 0/2 bis 125 µm ausgesiebt
F053	Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F099	Kalksteinmehl	aus 0/2 bis 125 µm ausgesiebt
F100	Basalt (Klöch)	aus 0/2 bis 125 µm ausgesiebt
F101	Natursand aus reinem Quarz	aus 0/2 bis 125 µm ausgesiebt
F104	Granit (Limberg)	aus 0/2 bis 125 µm ausgesiebt
F105	Mischprobe	1 Teil F040 + 1 Teil F101

**Tabelle 4-2: Untersuchte Füller und Feinanteile [2]**

An den verwendeten Füllern und Feinanteilen wurden zuvor mineralogische Untersuchungen durchgeführt, auf die in den folgenden Abschnitten eingegangen wird. [2]

#### **4.2.1 Gesamtmineralienbestand mittels Röntgendiffraktometrie (XRD)**

Mithilfe der Röntgendiffraktometrie wird die mineralogische Zusammensetzung von Sedimenten bestimmt. Eine pulverförmige Probe wird dabei mit Röntgenstrahlung bestrahlt. Durch die Mineralienkristalle kommt es zur Beugung der Strahlung, ein Beugungsmuster kann aufgezeichnet werden und daraus die Kristallstruktur berechnet und der Mineralienbestand bestimmt werden. [2]

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der Mineralienbestimmung mittels XRD der Füller- und Feinanteilproben angegeben und in den darauffolgenden Abbildungen graphisch dargestellt.  
[2]

Probe	Quarz	Horn- blende	Schicht- silikate	Feld- späte	Kalzit	Dolomit	Diverses
F036	2	-	1	1	17	79	-
F038	8	-	1	1	30	60	-
F039	22	-	3	19	21	35	-
F040	1	-	-	-	81	18	-
F041	99	-	-	-	-	-	-
F051	26	16	29	23	-	6	-
F052	54	-	18	27	-	-	Magnetit (1)
F053	1	-	-	-	64	35	-
F099	10	8	10	5	64	3	-
F100	-	-	5	26	-	-	Augit (37) Nephelin (20) Olivin (12)
F101	100	-	-	-	-	-	-
F104	30	-	13	57	-	-	-
F105	50*	-	-	-	41*	9*	-

\*) Mineralienbestand durch anteilige Mittelung der beiden Ausgangsfüller berechnet.

**Tabelle 4-3: Gesamtmineralienbestand der Füller/Feinanteile – Anteile in % [2]**

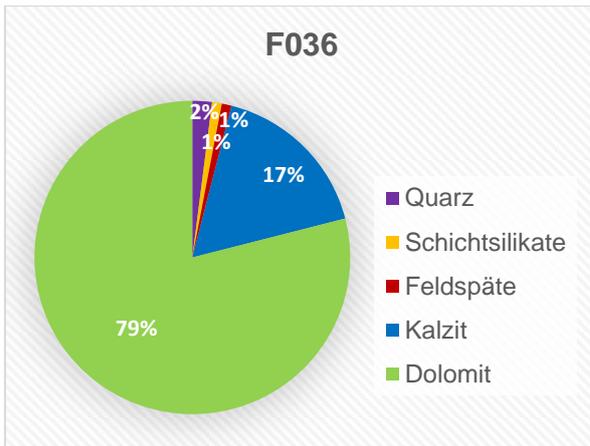


Abbildung 4-1: Mineralienbestand F036

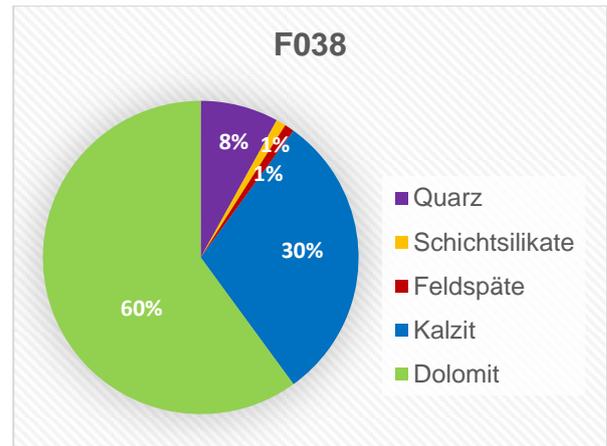


Abbildung 4-2: Mineralienbestand F038

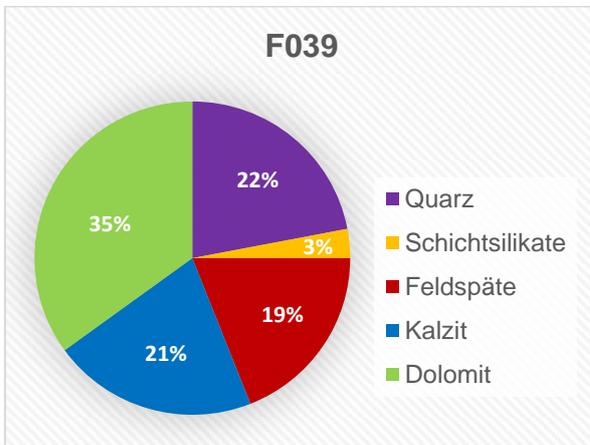


Abbildung 4-3: Mineralienbestand F039

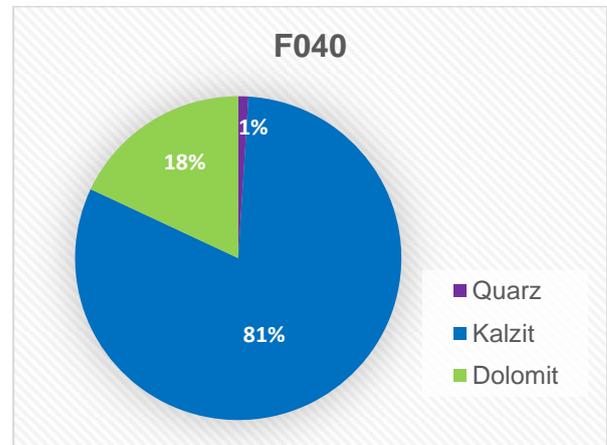


Abbildung 4-4: Mineralienbestand F040

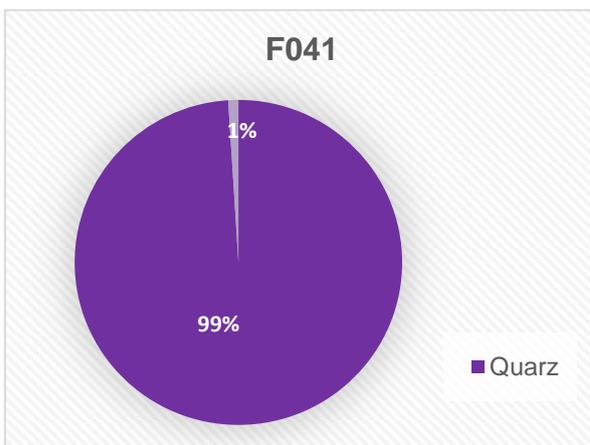


Abbildung 4-5: Mineralienbestand F041

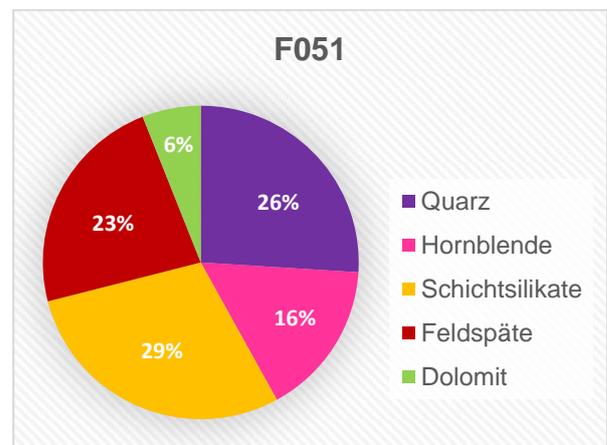


Abbildung 4-6: Mineralienbestand F051

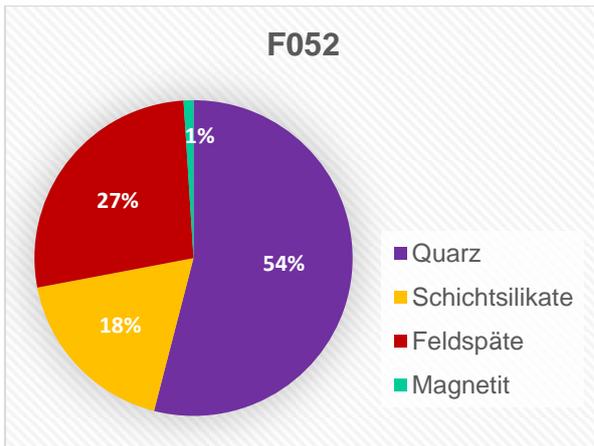


Abbildung 4-7: Mineralienbestand F052

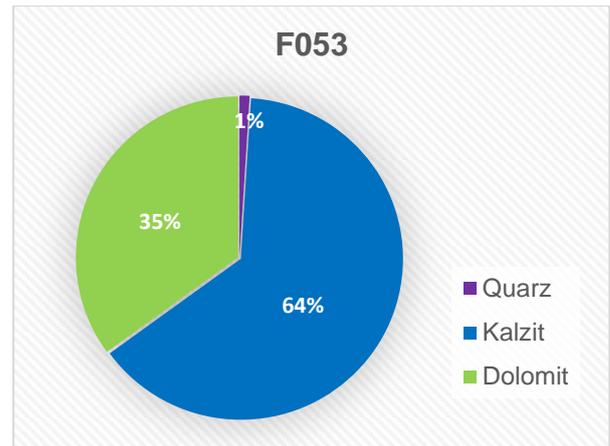


Abbildung 4-8: Mineralienbestand F053

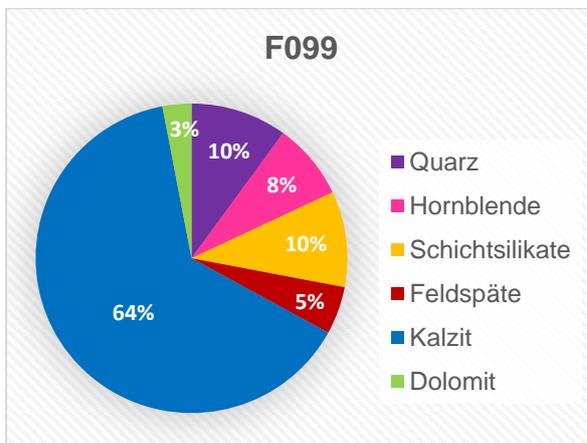


Abbildung 4-9: Mineralienbestand F099

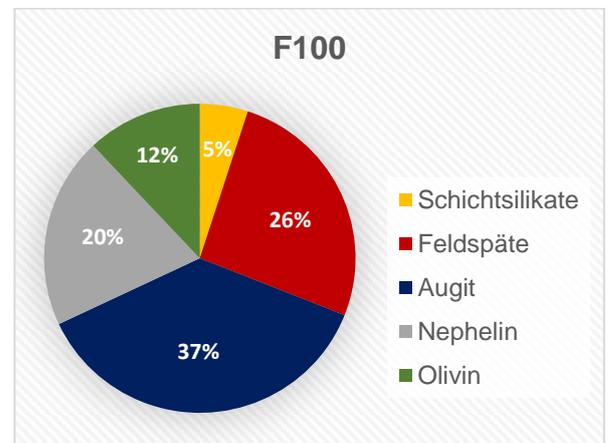


Abbildung 4-10: Mineralienbestand F100

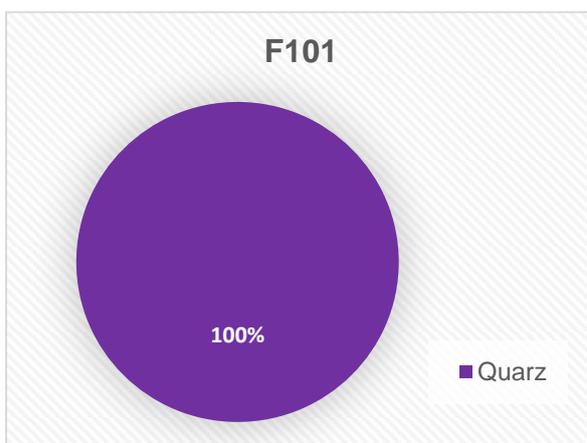


Abbildung 4-11: Mineralienbestand F101

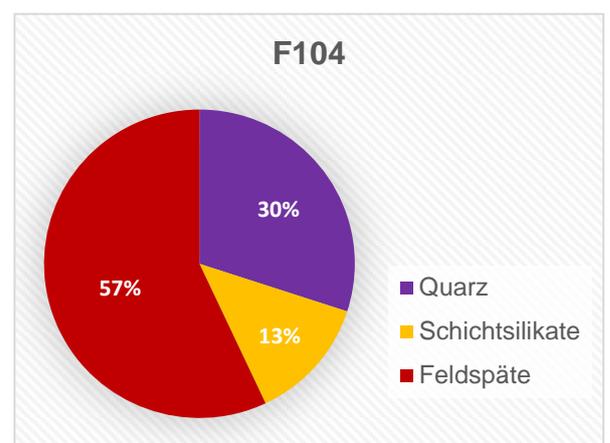
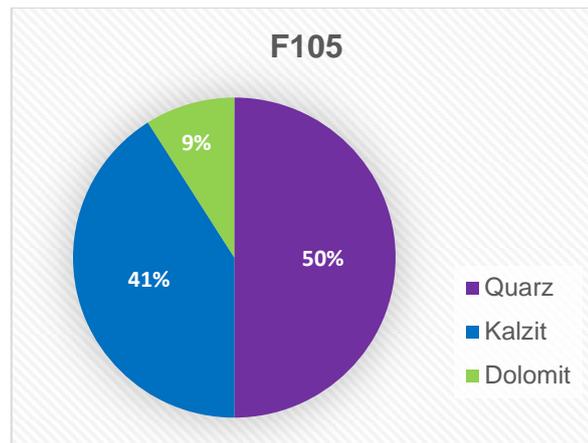


Abbildung 4-12: Mineralienbestand F104



**Abbildung 4-13: Mineralienbestand F105**

Die ermittelten Ergebnisse können wie folgt beurteilt werden [2]:

- ❖ Die Füllerproben F036, F038, F040 und F053 zeigen einen für Kalksteinmehle typisch hohen Gesamtkarbonatgehalt (Kalzit und Dolomit).
- ❖ Die Kontrollprobe F041 (reines Quarzmehl) aus dem Laborbedarf-Fachhandel ergab das erwartete Ergebnis.
- ❖ Der ursprünglich als „ungünstig“ eingestufte Füller F039 ist mit einem Gesamtkarbonatgehalt von 56 % eher als Kalksteinmehl zu bezeichnen und daher als potenziell „günstiger“ Asphaltfüller einzustufen.
- ❖ Die Probe F100 weist einen für Basalt typischen Mineralienbestand auf.
- ❖ Bei der Probe F051 handelt es sich um ein Ganggestein der Böhmisches Masse, wobei 6 % Dolomit eher unüblich sind. Die Probe wurde direkt bei einem Asphaltmischwerk entnommen. Möglicherweise kam es trotz sortenreiner Lagerung zu einer Verunreinigung.
- ❖ Bei dem Füller F052 handelt es sich um ein schichtsilikat-/feldspatreiches Quarzmehl.
- ❖ F099 kommt aus einem Granitsteinbruch und war als Hartgesteinsprobe gedacht. Die Röntgendiffraktometrie ergab einen Gesamtkarbonatanteil von 67 %, mit überwiegendem Anteil an Kalzit. Die Probe ist daher vielmehr als Kalksteinmehl einzustufen. Aufgrund eines Missverständnisses bei der Probennahme wurde eine Probe des darüberliegenden Abraumgesteines 0/2 entnommen. Sie ist dennoch interessant, da diese Gesteinskörnung tatsächlich zur Asphaltherstellung verwendet wird.
- ❖ Der aus Natursand gewonnene Feinanteil F101 weist einen Quarzgehalt von 100 % auf. Es handelt sich somit um eine sehr reine Probe.
- ❖ Die Probe F104 stellt einen Ersatz für F099 dar. Wie die Ergebnisse der XRD-Messung zeigen, handelt es sich hierbei nun tatsächlich um einen Granit.
- ❖ Der Mineralienbestand von F105 wurde aus den Ergebnissen von F040 und F101 berechnet.

Tabelle 4-4 enthält eine Zusammenfassung des ermittelten Mineralienbestands. [2]

Probe	Bezeichnung	Mineralienbestand (Auszug)
F036	Kalksteinmehl	96 % Gesamtkarbonatgehalt
F038	Kalksteinmehl	90 % Gesamtkarbonatgehalt
F039	quarzreiches Kalksteinmehl	56 % Gesamtkarbonatgehalt
F040	Kalksteinmehl	99 % Gesamtkarbonatgehalt
F041	reines Quarzmehl	99 % Quarz
F051	Kersantit/Granitporphyr	typischer Mineralienbestand
F052	schichtsilikat-/feldspatreiches Quarzmehl	54 % Quarz
F053	Kalksteinmehl	99 % Gesamtkarbonatgehalt
F099	Kalksteinmehl	67 % Gesamtkarbonatgehalt
F100	Basalt (Klöch)	typischer Mineralienbestand
F101	Natursand aus reinem Quarz	100 % Quarz
F104	Granit (Limberg)	typischer Mineralienbestand
F105	Mischprobe	50 % Quarz + 50 % Karbonate

Tabelle 4-4: Zusammenfassung des ermittelten Mineralienbestands [2]

#### 4.2.2 Rohdichte mittels Pyknometer-Verfahren

Die Rohdichten der Füller-/Feinanteilproben wurden gemäß ÖNORM EN 1097-7 [25] mit dem Pyknometer-Verfahren ermittelt. Die Dichtebestimmung wurde an drei Einzelmessproben mit einem kalibrierten Pyknometer und einer Prüfflüssigkeit bekannter Dichte durchgeführt und mit folgender Formel berechnet. [2]

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}}$$

Darin ist

- $\rho_f$  Dichte des Füllers/Feinanteils bei einer Temperatur von 25°C [Mg/m<sup>3</sup>]
- $m_0$  Masse des leeren Pyknometers einschließlich Stopfen [g]
- $m_1$  Masse des Pyknometers mit Messprobe [g]
- $m_2$  Masse des Pyknometers mit Messprobe und Prüfflüssigkeit [g]
- $V$  Volumen des Pyknometers [ml]
- $\rho_l$  Dichte der Prüfflüssigkeit bei einer Temperatur von 25°C [Mg/m<sup>3</sup>]

Die Bestimmung der Dichte wurde von der OÖ. Boden- und Baustoffprüfstelle (BPS) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-5 dargestellt. [2]

<b>Probe</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>
F036	Kalksteinmehl	2,79
F038	Kalksteinmehl	2,75
F039	quarzreiches Kalksteinmehl	2,70
F040	Kalksteinmehl	2,75
F041	reines Quarzmehl	2,65
F051	Kersantit/Granitporphyr	3,01
F052	schichtsilikat-/feldspatreiches Quarzmehl	2,81
F053	Kalksteinmehl	2,73
F099	Kalksteinmehl	2,81
F100	Basalt (Klöch)	3,02
F101	Natursand aus reinem Quarz	2,67
F104	Granit (Limberg)	2,69
F105	Mischprobe	2,71*

\*) Dichte durch anteilige Mittelung der beiden Ausgangsfüller berechnet.

**Tabelle 4-5: Dichte der Füller/Feinanteile [2]**

Zur Beurteilung der ermittelten Dichten ist eine Übersicht der Dichten der einzelnen Minerale in folgender Tabelle angegeben. [2]

<b>Mineral</b>	<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Mineral</b>	<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>
Quarz	2,65	Kalkhydrat	2,21
Hornblende	3,0 - 3,6	Augit	3,2 - 3,6
Schichtsilikate	-	Nephelin	2,6 - 2,7
Feldspäte	2,5 - 2,8	Olivin	3,2 - 4,4
Kalzit	2,6 - 2,8	Apatit	3,2
Dolomit	2,9	Magnetit	5,2

**Tabelle 4-6: Dichte von Mineralien [2]**

Die ermittelten Dichten können somit wie folgt beurteilt werden [2]:

- ❖ Bei Schichtsilikaten ist die Angabe einer Dichte nicht möglich, da sie mehrere Gruppen mit sehr unterschiedlicher Dichte umfassen: Serpentin-, Glimmer-, Chlorit- und Tonmineralgruppe.
- ❖ Das reine Quarzmehl F041 und der Natursand F101 entsprechen der Mineraleichte.
- ❖ Die Kalksteinmehle F036, F038, F040, F053 und F099 und das quarz-/feldspatreiche Kalksteinmehl F039 erreichen Dichten von 2,70 bis 2,81 g/cm<sup>3</sup>. Aufgrund des Quarzgehalts von 22 % liegt F039 dabei am unteren Ende. Die Ergebnisse sind im Hinblick auf die Dichten der dominierenden Minerale, Kalzit und Dolomit, plausibel.
- ❖ Das Quarzmehl F052 zeigt mit 2,81 g/cm<sup>3</sup> eine eher hohe Dichte, die jedoch durch die anderen beiden enthaltenen Mineralien, Feldspat und Schichtsilikate, erklärt werden kann. Genauere Aussagen können nur durch eine Detailuntersuchung der beiden Minerale getroffen werden.
- ❖ Der Basaltfeinanteil F100 mit den basalttypischen harten Mineralien, Augit (37 %) und Olivin (12 %), erreicht mit 3,02 g/cm<sup>3</sup> eine signifikant höhere Dichte als die anderen Füller/Feinanteile.
- ❖ Auch der Feinanteil aus Kersantit/Granitporphyr F051 mit 16 % Hornblende erreicht eine sehr hohe Dichte von 3,01 g/cm<sup>3</sup>.
- ❖ Der Feinanteil aus dem Granit Edelbrechkorn F104 weist eine für Granit typische Dichte von 2,69 g/cm<sup>3</sup> auf.
- ❖ Die Dichte von F105 wurde aus den Ergebnissen von F040 und F101 berechnet.

### 4.2.3 Trockenverdichtbarkeit (Rigden)

Zur Ermittlung der Trockenverdichtbarkeit dient ein Rigden Prüfgerät. Dabei wird in eine Bohrung der zuvor bei 110±5°C bis zur Massekonstanz getrocknete Füller/Feinanteil eingefüllt und mit einer definierten Anzahl an Schlägen verdichtet. Danach wird die Schichthöhe auf 0,01 mm bestimmt und das Volumen errechnet. Mithilfe der Dichten gemäß Tabelle 4-5 kann anschließend der Hohlraumgehalt mit folgender Formel berechnet werden.

$$v = \left( 1 - \frac{4 \cdot 10^3 \cdot m_2}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho_f \cdot h} \right) \cdot 100$$

Darin ist

v	Hohlraumgehalt [% Volumenanteil]
m <sub>2</sub>	Masse des verdichteten Füllers/Feinanteils [g]
α	Innendurchmesser der Bohrung im Fallblock [mm]
ρ <sub>f</sub>	Dichte des Füllers/Feinanteils bei einer Temperatur von 25°C [Mg/m <sup>3</sup> ]
h	Höhe des verdichteten Füllers/Feinanteils [mm]

Die Bestimmung der Trockenverdichtbarkeit wurde von der OÖ. Boden- und Baustoffprüfstelle (BPS) durchgeführt. Die Ergebnisse sind als Hohlraumgehalt in Tabelle 4-7 dargestellt. [2]

<b>Probe</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Hohlraumgehalt [V.-%]</b>
F036	Kalksteinmehl	34,1
F038	Kalksteinmehl	33,2
F039	quarzreiches Kalksteinmehl	32,7
F040	Kalksteinmehl	33,6
F041	reines Quarzmehl	38,9
F051	Kersantit/Granitporphyr	43,9
F052	schichtsilikat-/feldspatreiches Quarzmehl	42,4
F053	Kalksteinmehl	29,4
F099	Kalksteinmehl	33,0
F100	Basalt (Klöch)	33,1
F101	Natursand aus reinem Quarz	41,1
F104	Granit (Limberg)	38,2
F105	Mischprobe	37,4*

\*) Hohlraumgehalt durch anteilige Mittelung der beiden Ausgangsfüller berechnet.

**Tabelle 4-7: Trockenverdichtbarkeit der Füller/Feinanteile [2]**

#### **4.2.4 Korngrößenverteilung mittels Nasssiebung und Sedigraphie**

Die Korngrößenverteilung wurde durch Kombination von Nasssiebung der Gesteinskörnung > 20 µm und automatischer Sedimentationsanalyse mittels SEDIGRAPH 5000 ET der Firma Micromeritics ermittelt. Dadurch konnte die Korngrößenverteilung der Füller und Feinanteile von 2 mm bis 0,2 µm ermittelt werden. In Abbildung 4-14 sind die ermittelten Sieblinien der Füller- und Feinanteilproben graphisch dargestellt. [2]

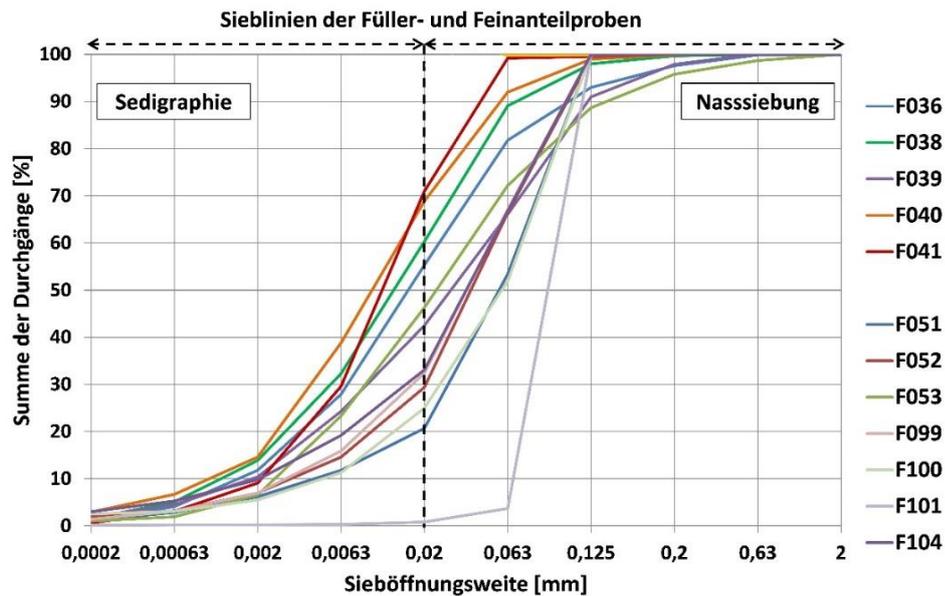


Abbildung 4-14: Sieblinien der Füller/Feinanteile [2]

Es sind große Unterschiede zwischen den Korngrößenverteilungen der verwendeten Proben erkennbar, wodurch der Einfluss der Sieblinie auf die Ermüdungsprüfung untersucht werden soll. Der Anteil an Gesteinskörnung < 63 µm reicht von 3,7 % bis 99,9 %, wobei das Produkt mit 3,7 % eigentlich kein Füller im engeren Sinne ist (siehe Abschnitt 2.2.2). Aus den bestimmten Sieblinien können mit folgenden Formeln die Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$  sowie die Krümmungszahl  $C_C$  berechnet werden. [2]

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Darin ist

$d_{60}$  Korngröße bei 60 % des Massendurchgangs der Sieblinie

$d_{10}$  Korngröße bei 10 % des Massendurchgangs der Sieblinie

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

Darin ist

$d_{60}$  Korngröße bei 60 % des Massendurchgangs der Sieblinie

$d_{30}$  Korngröße bei 30 % des Massendurchgangs der Sieblinie

$d_{10}$  Korngröße bei 10 % des Massendurchgangs der Sieblinie

Die beiden errechneten Kenngrößen sowie die Siebdurchgänge der Gesteinskörnungen von 6,3 µm, 63 µm und 125 µm sind in Tabelle 4-8 aufgelistet. [2]

Probe	Bezeichnung	$C_U$	$C_C$	< 6,3 $\mu\text{m}$ [%]	< 63 $\mu\text{m}$ [%]	< 125 $\mu\text{m}$ [%]
F036	Kalksteinmehl	16,45	1,16	27,9	81,8	93,0
F038	Kalksteinmehl	14,25	1,20	32,3	89,1	98,0
F039	quarzreiches Kalksteinmehl	27,21	1,13	24,3	66,1	92,0
F040	Kalksteinmehl	13,27	1,17	38,8	92,0	99,0
F041	reines Quarzmehl	7,47	1,16	29,6	99,2	99,6
F051	Kersantit/Granitporphyr	14,60	2,94	11,8	53,3	100,0
F052	schichtsilikat/ feldspatreiches Quarzmehl	15,03	2,09	14,6	66,4	99,5
F053	Kalksteinmehl	14,87	0,86	23,3	72,2	88,7
F099	Kalksteinmehl	15,71	1,73	15,9	67,1	100,0
F100	Basalt (Klöch)	13,76	1,60	11,3	51,9	100,0
F101	Natursand aus reinem Quarz	1,48	101,05	0,3	3,7	100,0
F104	Granit (Limberg)	25,97	2,53	19,2	66,8	100,0
F105	Mischprobe	26,57	1,08	19,2	47,9	99,5

Tabelle 4-8: Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$ , Krümmungszahl  $C_C$  und Siebdurchgänge [2]

## 5 Mastix-Prüfprogramm

### 5.1 Reihenuntersuchung zur Wiederholpräzision

Als Wiederholpräzision wird die Differenz zwischen zwei Prüfergebnissen, die von demselben Prüfer mit derselben Prüfeinrichtung unter gleichen Prüfbedingungen an identischem Prüfmaterial ermittelt wurden, bezeichnet. Zur Untersuchung der Wiederholpräzision der entwickelten Prüfmethodik wurden zehn Versuche unter identen Prüfbedingungen und mit gleichem Probenmaterial durchgeführt. Hierzu wurde die mit dem Füller F040 hergestellte Mastixprobe verwendet. In Tabelle 5-1 sind die ermittelten Kennwerte des verwendeten Füllers gesammelt dargestellt. Die Versuche zur Bestimmung der Wiederholbarkeit wurden bei einer Schubspannung von 400 kPa durchgeführt. [2]

Die Ergebnisse dieser Reihenuntersuchung sind in Abschnitt 6.1 dargestellt.

Probe	Bezeichnung	Mineralienbestand	Anteil < 6,3 µm [%]	Anteil < 63 µm [%]	Anteil < 125 µm [%]	Dichte ρ [g/cm <sup>3</sup> ]
F040	Kalksteinmehl	99 % Gesamt- karbonatgehalt	38,8	92,0	99,0	2,75

Tabelle 5-1: Kennwerte des Füllers F040

### 5.2 Ermüdungsprüfungen

Die Festlegung der Versuchsrandbedingungen wurde bereits in Abschnitt 3.3 beschrieben. Die Ermüdungsprüfungen finden bei einer Frequenz von 30 Hz und einer Temperatur von 10°C statt. Die Probekörper haben die Form eines Hyperboloids (siehe Abbildung 3-7) und werden aus Mastix mit einem Mischungsverhältnis von B : F = 1 : 1,5 hergestellt. In Tabelle 5-2 sind die Versuchsrandbedingungen noch einmal übersichtlich zusammengefasst. [2]

Prüffrequenz	Prüftemperatur	Probekörpergeometrie	Mischung B : F
30 Hz	10°C	H = 3 mm Ø <sub>Rand</sub> = 8 mm Ø <sub>Mitte</sub> = 6 mm	1 : 1,5

Tabelle 5-2: Versuchsrandbedingungen

Zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit verschiedener Mastixproben wurden mehrere Schubspannungen gewählt, die im Zuge der Prüfungen auf die Probekörper aufgebracht wurden, um daraus eine Wöhlerkurve (siehe Abschnitt 2.4.1) erstellen zu können. Dabei ist zu beachten, dass die gewählten und dem DSR vorgegebenen Schubspannungen aufgrund der Probekörpergeometrie (Hyperboloid statt Zylinder, siehe Abschnitt 3.3.2) nicht den Spannungen im Probekörper entsprechen. Das Prüfgerät erkennt automatisch die Prüfgeometrie mit einem Durchmesser von 8 mm und das elektrische Drehmoment wird infolge der vorgegebenen Schubspannung und des Prüfgeometriedurchmessers angefahren. Aufgrund dieser Abweichung können die Ergebnisse dieser Ermüdungsprüfungen nur mit solchen Ergebnissen verglichen werden, die durch Prüfungen mit derselben Probekörpergeometrie ermittelt wurden. [2]

Tabelle 5-3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Ermüdungsprüfungen. Die Bezeichnung der Proben bezieht sich hier auf den in der Mastixprobe enthaltenen Füller/Feinanteil. Insgesamt wurden 158 Ermüdungsprüfungen durchgeführt.

<b>Probe</b>	<b>Schubspannung DSR* [kPa]</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Probe</b>	<b>Schubspannung DSR* [kPa]</b>	<b>Anzahl</b>
F036 F052 F038 F053 F040 F099 F041 F100 F051	600	3x	F039	600	3x
	500	3x		500	3x
	400	3x		400	3x
	300	3x		300	3x
	200	1x			
F101 F104	500	3x	F105	500	3x
	400	3x		400	3x
	300	3x		300	3x
	200	1x			
*) entspricht nicht der Schubspannung im Probekörper					

**Tabelle 5-3: Prüfprogramm**

## 6 Ergebnisse und Interpretation

### 6.1 Ergebnis der Untersuchung zur Wiederholpräzision

In Abbildung 6-1 sind die Ergebnisse der Reihenuntersuchung zur Wiederholpräzision graphisch dargestellt. Das Diagramm zeigt den am DSR eingestellten komplexen Schubmodul zu Beginn des jeweiligen Ermüdungsversuches (bei  $t = 10$  s) und die Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen des Probekörpers. Der blau strichlierte Bereich stellt die Vergleichspräzision laut ÖNORM EN 14770 [26] für einen zylindrischen Probekörper aus reinem Bitumen dar. Alle zehn Messwerte liegen trotz geänderter Probekörperform und anderem Material (Mastix statt Bitumen) innerhalb dieser Vergleichspräzision. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit ist davon auszugehen, dass die Mastixprobe sehr homogen ist und die Probekörper sehr maßhaltig hergestellt werden können. Der grün hinterlegte Bereich zeigt das berechnete 95 % Konfidenzintervall des Standardfehlers der Lastwechsel. Er schließt zu 95 % die wahre Lage des untersuchten Parameters (Lastwechsel bis zum Bruch) ein. Aus den zehn Messwerten ergibt sich ein Mittelwert von 199.950 Lastwechseln mit einem Variationskoeffizienten von 10 %. [2]

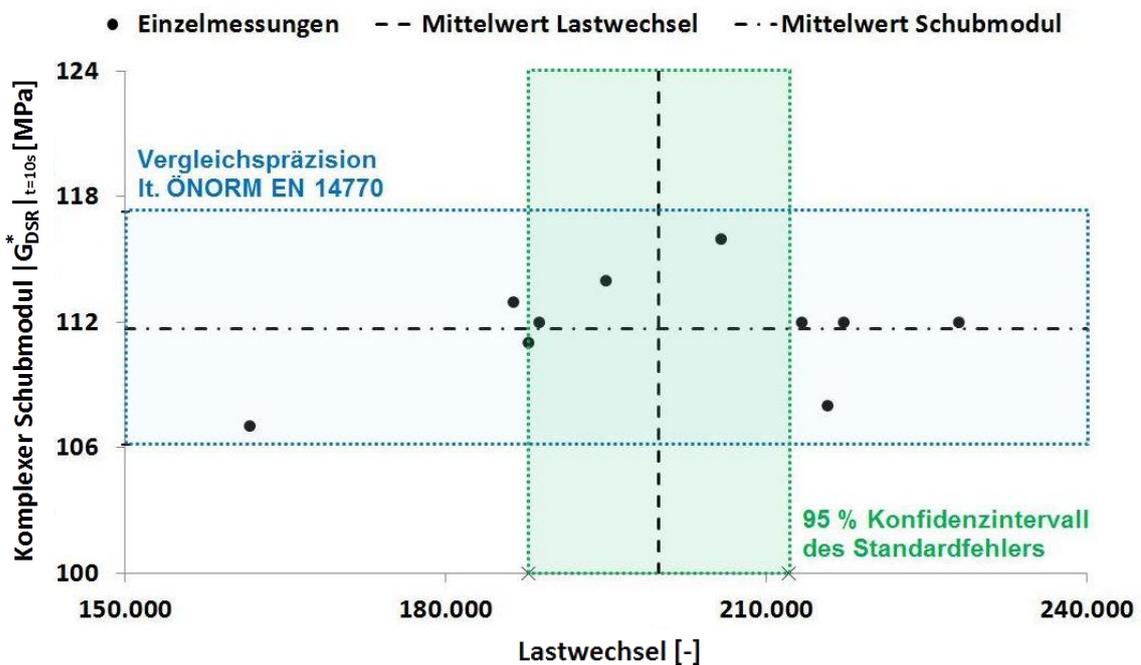


Abbildung 6-1: Wiederholpräzision des Ermüdungsversuches bei 400 kPa [2]

## 6.2 Ergebnis der Ermüdungsprüfungen

### 6.2.1 Ermüdungskurve

Die Prüfungen wurden im „Controlled Stress“ Modus durchgeführt. Dabei wird eine vorgegebene Scherspannung aufgebracht und die daraus resultierende Deformation gemessen. Die Ergebnisse werden in Form des komplexen Schubmoduls  $|G_{DSR}^*|$  und des Phasenverschiebungswinkels  $\delta$  dargestellt (siehe Abschnitt 3.1.3) und sehen qualitativ immer gleich aus. In Abbildung 6-2 ist der beispielhafte Verlauf einer Ermüdungskurve bis zum Bruch eines Probekörpers zu sehen. [2] [24]

Die Einschwingphase ist durch einen besonders raschen Abfall des komplexen Schubmoduls charakterisiert. Dieser schnelle Verlust des Verformungswiderstandes lässt sich durch Erwärmung des Probekörpers infolge frei gewordener Energie, aber vor allem auch durch Thixotropie erklären. Thixotropie beschreibt in der Rheologie eine Zeitabhängigkeit der Fließeigenschaften. Aufgrund einer andauernden mechanischen Beanspruchung sinkt die Viskosität und nimmt erst nach Beendigung der Beanspruchung wieder zu. Es handelt sich also um einen reversiblen Effekt. Nach der Einschwingphase beginnt die Phase der Mikrorissbildung infolge wiederholter Beanspruchung. Der Abfall des komplexen Schubmoduls ist wesentlich geringer und der Verlauf der Ermüdungskurve annähernd linear. In der dritten Phase verbinden sich die Mikrorisse zusehends zu Makrorissen, bis ein vollständiger Bruch des Probekörpers (Materialversagen) eintritt und der komplexe Schubmodul gegen null sinkt. Die Ermüdung ist somit erreicht und es können keine weiteren Kräfte übertragen werden. Der Phasenwinkel verhält sich annähernd spiegelverkehrt zum Schubmodul. Zum Zeitpunkt des Bruches fällt er schlagartig ab. [2] [24]

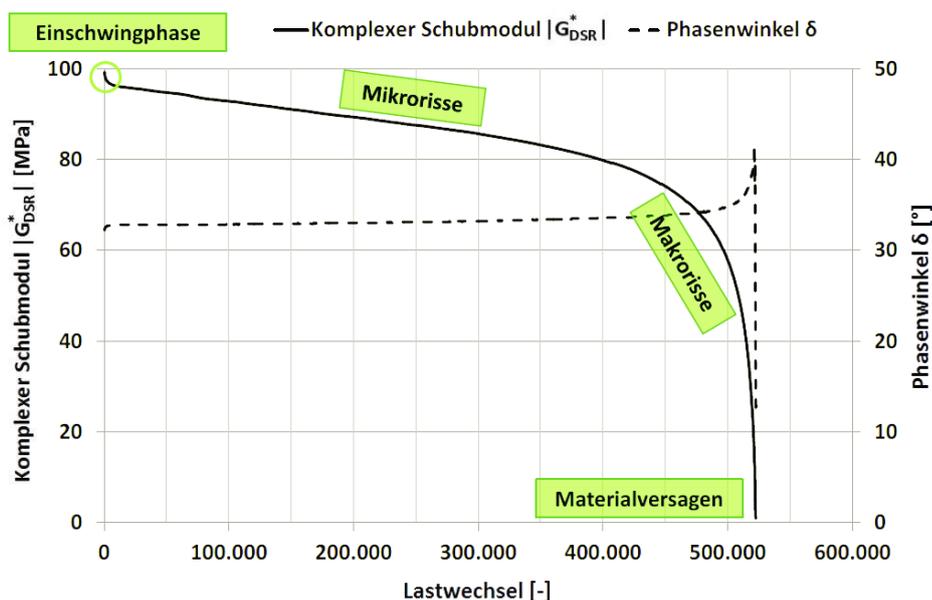


Abbildung 6-2: Beispielhafte Ermüdungskurve [2]

### 6.2.2 Wöhlerkurve

Aus den Ermüdungsprüfungen kann, ähnlich wie beim 4PBB (siehe Abschnitt 2.4.1), eine sogenannte Wöhlerkurve erstellt werden. Im Gegensatz zur 4PBB-Prüfung, bei der jeweils sechs Probekörper geprüft werden müssen, sind bei der Prüfung von Asphaltmastix bereits drei Versuche je Spannungsniveau ausreichend. [2]

In Abbildung 6-3 ist die Auswertung der Ermüdungsprüfungen einer Mastixprobe graphisch dargestellt. In dem Diagramm werden die äquivalenten, d. h. bei einem zylindrischen Probekörper aufgetragenen Schubspannungen gemäß Tabelle 5-3 den Anzahlen an Lastwechseln bis zum Versagen des Probekörpers gegenübergestellt und mit einer potenziellen sowie logarithmischen Trendlinie beschrieben. Beide Trendlinien weisen ein hohes Bestimmtheitsmaß mit  $R^2 = 0,997$  (pot.) und  $R^2 = 0,9887$  (log.) auf. Die Auswertung zeigt, dass eine Erhöhung der aufgetragenen Schubspannung um 17 % die Lebensdauer des Probekörpers bereits um die Hälfte reduzieren kann. Als Beispiel: Bei einer Schubspannung von 300 kPa werden ca. 1 Mio. Lastwechsel bis zum Bruch ertragen, bei 350 kPa nur noch etwa 0,5 Mio. Lastwechsel. Ermüdungsversuche, die deutlich über 1 Mio. Lastwechsel ertragen, sind aufgrund der langen Versuchsdauer nicht mehr wirtschaftlich vertretbar. Der dargestellte Einzelversuch mit annähernd 4,5 Mio. Lastwechseln bedarf einer Prüfdauer von 42 Stunden. [2]

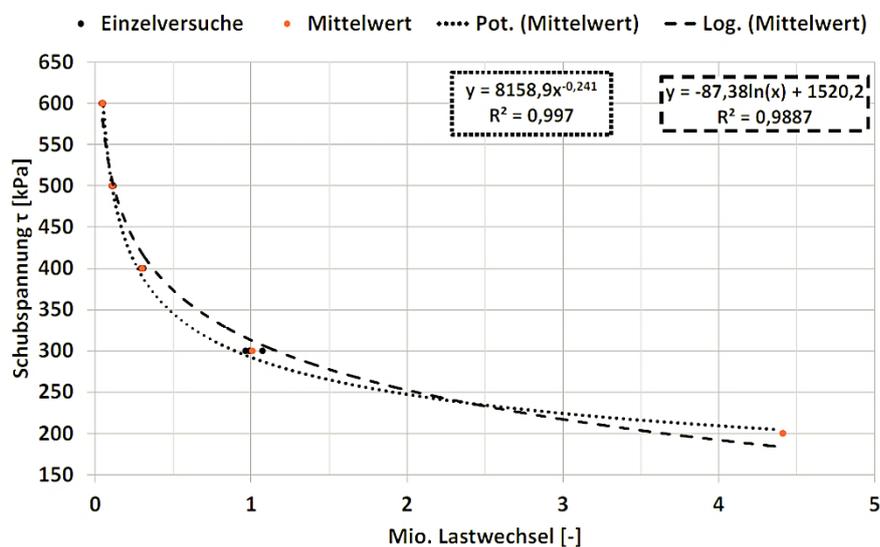


Abbildung 6-3: Wöhlerkurve der Ermüdungsprüfungen einer Mastixprobe [2]

Abbildung 6-4 zeigt die übliche Darstellung einer Wöhlerkurve mit logarithmischer Skalierung der horizontalen Achse. [2]

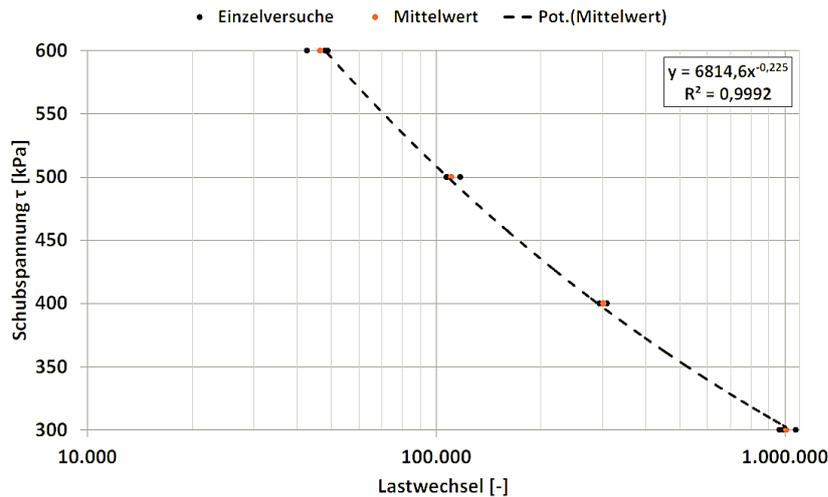


Abbildung 6-4: Wöhlerkurve mit logarithmischer Skalierung der horizontalen Achse [2]

### 6.2.3 Korrelation zwischen Schubmodul und Lastwechsel bis zum Versagen

In Abbildung 6-5 ist die Korrelation zwischen dem komplexen Schubmodul  $|G_{DSR}^*|$  (bei  $t = 10$  s) und der Anzahl an Lastwechseln bis zum Versagen abgebildet. Das Diagramm zeigt die Mittelwerte von jeweils drei Versuchen aller durchgeführten Ermüdungsprüfungen bei unterschiedlichen Spannungsniveaus. Daraus ist ersichtlich, dass nicht allein der komplexe Schubmodul  $|G_{DSR}^*|$  zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Asphaltmastix herangezogen werden kann, da eine hohe Anfangssteifigkeit nicht zwangsweise eine lange Lebensdauer bedeutet. [2]

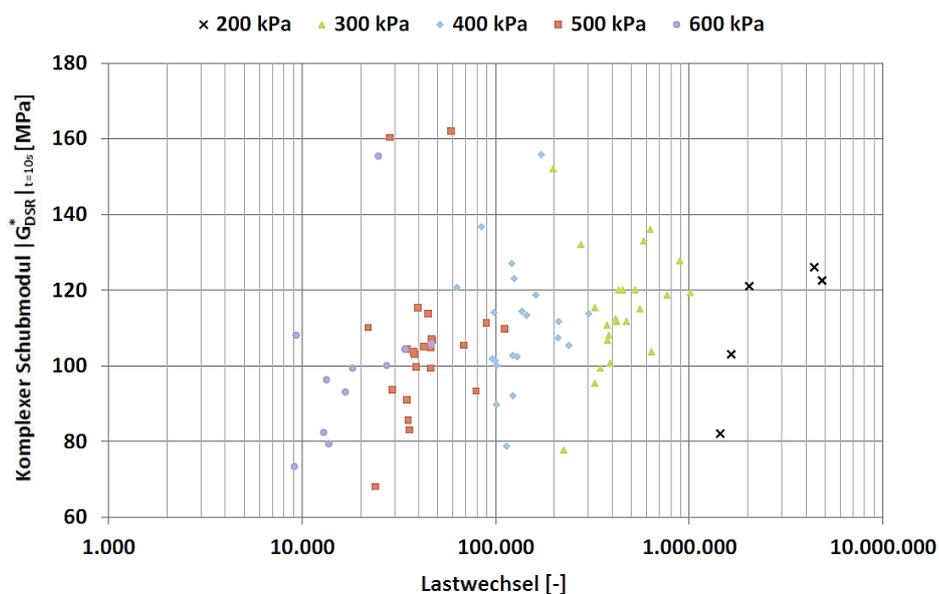


Abbildung 6-5: Korrelation zwischen Schubmodul und Lastwechsel bis zum Versagen [2]

Im Rahmen des SUPERPAVE Prüfschemas wird anstelle des komplexen Schubmoduls  $|G^*|$  der Kombinationswert  $|G^*| \cdot \sin(\delta)$  zur Ermittlung einer ausreichenden Ermüdungsfestigkeit

von Bitumen verwendet. Im folgenden Diagramm (siehe Abbildung 6-6) sind daher die Mittelwerte aller Ermüdungsprüfungen in Abhängigkeit des Kombinationswertes  $|G_{DSR}^*| \cdot \sin(\delta)$  und der Anzahl an Lastwechseln dargestellt. Auch dieser Wert ist nicht geeignet zur Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit. [2]

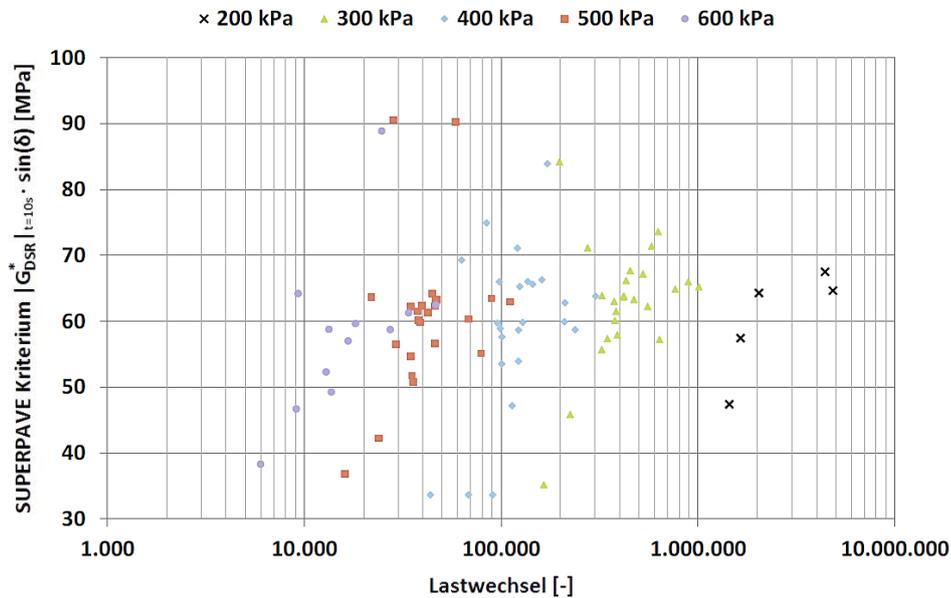


Abbildung 6-6: Korrelation zwischen  $|G_{DSR}^*| \cdot \sin(\delta)$  und Lastwechsel bis zum Versagen [2]

Zufolge dieser Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die entwickelte Prüfmethode wie gewünscht den Verbund von Bitumen und Füller/Feinanteil anspricht. [2]

#### 6.2.4 Einfluss der Sieblinie

Es wurde eine Mischprobe (F105) zu gleichen Teilen aus dem Füller F040 (Kalksteinmehl, Kornanteil < 63  $\mu\text{m}$ : 92,0 %) und dem Natursand F101 (reiner Quarz, Kornanteil < 63  $\mu\text{m}$ : 3,7 %) hergestellt, um einen Einfluss der Sieblinie auf die Ergebnisse der Ermüdungsversuche zu ermitteln. Die errechnete Sieblinie und die Sieblinien der beiden Ausgangsprodukte sind in Abbildung 6-7 dargestellt. Neben den Sieblinien unterscheiden sich die Proben F040 und F101 auch in ihrer Mineralogie (siehe Abschnitt 4.2.1). Der Füller kennzeichnet sich durch einen (theoretisch) günstigen Gesamtkarbonatgehalt von 99 %, der Natursand besteht aus reinem Quarz. In Abschnitt 6.2.5 wird auf den Einfluss der Mineralogie auf die Ermüdungsfestigkeit eingegangen. [2]

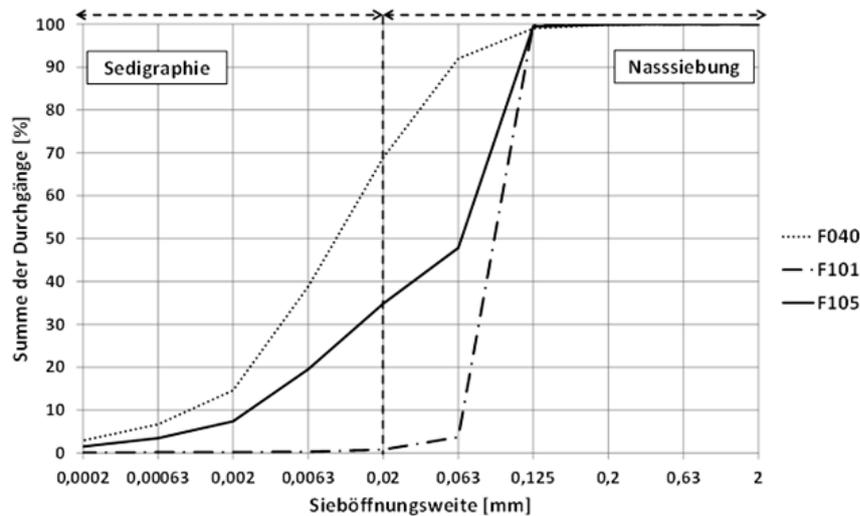


Abbildung 6-7: Sieblinien der Mischprobe F105 und der beiden Ausgangsprodukte [2]

In Abbildung 6-8 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen der drei Mastixproben, die mit den Füllern/Feinanteilen F040, F101 und F105 hergestellt wurden, in Form von Wöhlerkurven zu sehen. Die Bezeichnung der Proben bezieht sich in diesem Diagramm auf den in der Mastix verwendeten Füller/Feinanteil. Die drei Wöhlerkurven unterscheiden sich stark voneinander. Als Beispiel: Bei einer Schubspannung von 300 kPa erreicht F040 766.600 Lastwechsel, F101 nur 197.600 LW und die Mischprobe F105 298.500 LW. Die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch Zugabe eines Füllers mit einer besseren Ermüdungsfestigkeit (hier: F040) folgt demnach keinem linearen Verlauf. Eine Zugabe von 50 % bewirkt keine Zunahme der Ermüdungsfestigkeit auf das arithmetische Mittel der beiden Produkte. [2]

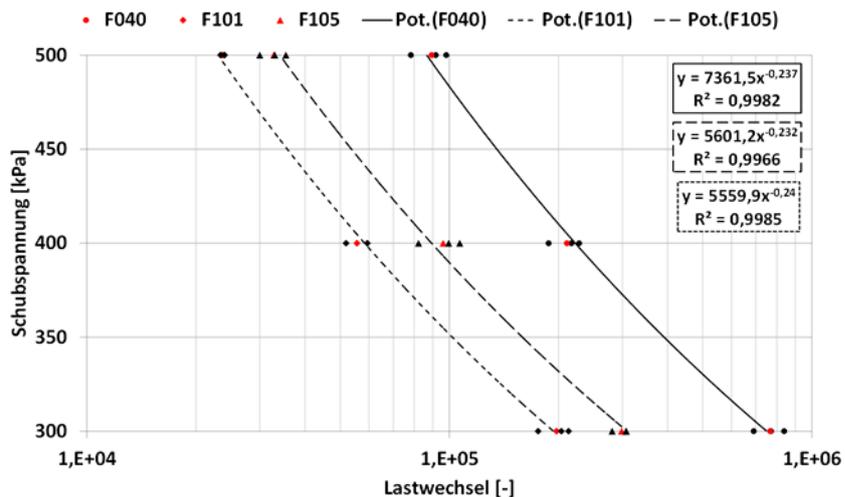


Abbildung 6-8: Wöhlerkurven der Ermüdungsprüfungen dreier Mastixproben [2]

## 6.2.5 Einfluss der Mineralogie

Um einen Einfluss der Mineralogie auf die Ermüdungsfestigkeit von Asphaltmastix zu untersuchen, wurden insgesamt 13 verschiedene Mastixmischungen mit möglichst unterschiedlichen Füllern/Feinanteilen hinsichtlich ihrer Mineralogie hergestellt. In Abbildung 6-9 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen (Anzahl an Lastwechseln) bei einer Schubspannung von 300 kPa dargestellt. Die Bezeichnung der Proben bezieht sich hier wieder auf den in der Mastix verwendeten Füller/Feinanteil. Als günstig anzusehende Füller sind i.d.R. Kalksteinmehle (F036, F038, F040, F053, F099). Teilweise liefern sie jedoch keine besseren Ergebnisse als die Hartgesteine (Granit, Basalt, Kersantit/Granitporphyr). Die Mastixmischung mit reinem Quarzmehl (F041) aus dem Laborbedarf kann hingegen besonders gute Resultate vorweisen. Dieses wird allerdings nicht für die Asphaltherstellung verwendet. Zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit ist die reine Betrachtung der Mineralogie aufgrund der gewonnenen Ergebnisse nicht ausreichend. [2]

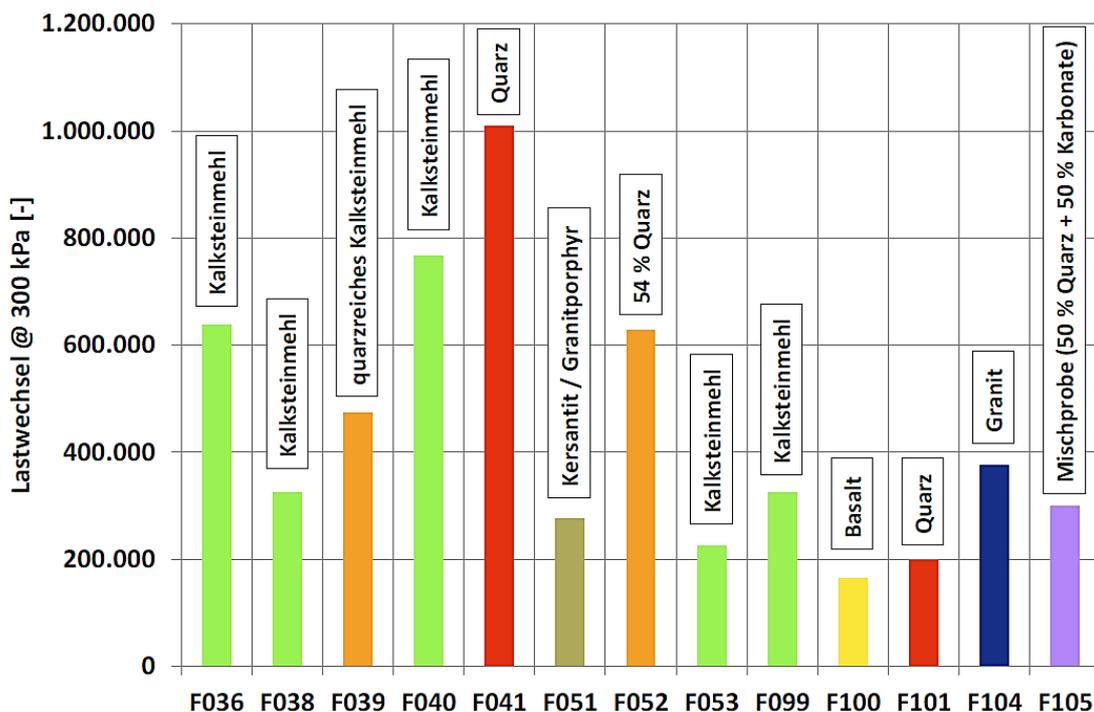


Abbildung 6-9: Ermüdungsfestigkeit unterschiedlicher Füller/Feinanteile [2]

## 6.2.6 Lineare Korrelationsanalyse und multiple Regressionsanalyse

Es wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter auf die Zielvariable, die Ermüdungsfestigkeit bei einer aufgetragenen Schubspannung von 300 kPa, zu untersuchen. Die Einflussparameter (Variablen) werden zunächst getrennt voneinander betrachtet und deren Bestimmtheitsmaße  $R^2$  sowie Signifikanzniveaus berechnet. Mithilfe des Bestimmtheitsmaßes kann indirekt der Zusammenhang zwischen

einer Variablen und der Zielvariablen gemessen werden. Unter Signifikanz versteht man einen Wert, der die Wahrscheinlichkeit eines systematischen Zusammenhangs zwischen einem Einflussparameter und der Zielvariablen ausdrückt. Ein Wert  $< 5 \%$  entspricht einem signifikanten,  $< 1 \%$  einem sehr signifikanten und  $< 0,1 \%$  einem hoch signifikanten Ergebnis. Zu den untersuchten Variablen gehören die Dichte, der Hohlraumgehalt, der Gehalt an Quarz bzw. Karbonaten und einige Kennzahlen der Sieblinie:  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ,  $C_U$ ,  $C_C$ , und die Anteile  $< 6,3 \mu\text{m}$ ,  $< 63 \mu\text{m}$  und  $< 125 \mu\text{m}$ . [2]

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 6-1 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Parameter  $d_{60}$ , Anteil  $< 6,3 \mu\text{m}$  sowie Anteil  $< 63 \mu\text{m}$  einen signifikanten bis sehr signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Mastix haben. Diese werden weiters einer multiplen Regressionsanalyse unterzogen, d. h. sie werden gleichzeitig zur Erklärung der Zielvariablen betrachtet. Das Resultat dieser Betrachtung ist ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,50$  und ein Signifikanzniveau von  $8,6 \%$  und liefert somit kein besseres Ergebnis als der betrachtete Einzelparameter  $d_{60}$ . Demnach kann festgehalten werden, dass der Korndurchmesser bei  $60 \%$  Massendurchgang einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit von Asphaltmastix hat. [2]

Parameter	Bestimmtheitsmaß $R^2$	Signifikanz [%]
Dichte	0,13	22,0
Hohlraumgehalt	0,01	69,6
$d_{10}$	0,10	28,5
$d_{30}$	0,09	31,1
<b><math>d_{60}</math></b>	<b>0,50</b>	<b>0,7</b>
$C_U$	0,02	68,4
$C_C$	0,09	33,5
<b>Anteil <math>&lt; 6,3 \mu\text{m}</math></b>	<b>0,39</b>	<b>2,4</b>
<b>Anteil <math>&lt; 63 \mu\text{m}</math></b>	<b>0,46</b>	<b>1,1</b>
Anteil $< 125 \mu\text{m}$	0,001	92,2
Gehalt an Quarz	0,07	32,4
Gehalt an Karbonaten	0,002	87,3
Stichprobenumfang $n = 13$		

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Korrelationsanalyse [2]

Bisher wurde angenommen, dass die Mineralogie einen bedeutenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Mastix hat. Aufgrund der durchgeführten Versuche und der statistischen Analyse kann diese Annahme jedoch nicht bestätigt werden. Wesentlich ist offenbar der Einfluss der Sieblinie im Feinbereich  $< 63 \mu\text{m}$ . Ein höherer Gehalt an Feinanteilen hat positive Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit von Mastix. [2]

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Der Anlass dieser Forschungsarbeit ist das vermehrte Auftreten von Schäden an bituminösen Deckschichten nach kurzer Liegedauer, die weder einer klimatischen noch verkehrlichen Belastung zugeordnet werden können. Als mögliche Schadensursache wird ein mangelndes Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix genannt. Aus diesem Grund soll eine geeignete Prüfmethode zur Bewertung der Mastixqualität entwickelt und standardisiert werden. [2]

Die Prüfmethode wird an einem Dynamischen Scherrheometer (DSR) durchgeführt, welches in kommerziellen Straßenbaulabors weitgehend vorhanden ist. Ob sich ein DSR für die Prüfmethodik eignet, hängt jedoch vom verfügbaren elektrischen Drehmoment und der Art der Temperierung ab. Wie in Abschnitt 3 dieser Arbeit beschrieben, wurden detaillierte Verfahren zur Herstellung der Mastixproben und der Probekörper festgelegt, um eine hohe Vergleichspräzision zu gewährleisten. Insgesamt wurden 13 verschiedene Füller/Feinanteile mit unterschiedlicher Herkunft und Mineralogie untersucht. Der Mineralienbestand wurde mittels Röntgendiffraktometrie, die Rohdichte mittels Pyknometer-Verfahren, die Trockenverdichtbarkeit mittels Rigden Prüfgerät und die Korngrößenverteilung mittels Nasssiebung und Sedigraphie bestimmt. Außerdem wurden aus den Sieblinien die Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$  und die Krümmungszahl  $C_C$  berechnet. Zur Herstellung der Mastixproben wurde einheitlich ein Bitumen der Sorte 70/100 (PG 64-22) verwendet, um einen Einfluss des Bindemittels zu vermeiden. [2]

Die Reihenuntersuchung zur Wiederholpräzision der entwickelten Prüfmethodik zeigt eine gute Wiederholbarkeit. Der komplexe Schubmodul liegt innerhalb der in ÖNORM EN 14770 [26] angegebenen Wiederholpräzision von 10 % und auch die Wiederholpräzision hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit (Anzahl der Lastwechsel bis zur Ermüdung) liegt bei 10 %. Die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen können in einer Wöhlerkurve, bei der die aufgebrachte Schubspannung der Anzahl an Lastwechseln bis zum Bruch gegenübergestellt wird, mit ausgezeichneter Korrelation dargestellt werden. [2]

Zur Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ermüdungsfestigkeit wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Drei der untersuchten Variablen zeigten einen signifikanten bis sehr signifikanten Einfluss. Der Siebdurchgang  $d_{60}$  (sehr signifikant) und die Kornanteile  $< 63 \mu\text{m}$  und  $< 6,3 \mu\text{m}$  wirken sich demnach besonders stark auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Die Annahme, dass die Mineralogie einen bedeutenden Einfluss

auf die Dauerhaftigkeit der Mastix hat, konnte jedoch nicht bestätigt werden. Folglich sollte in Zukunft mehr Augenmerk auf die Sieblinie im Feinanteilsbereich  $< 63 \mu\text{m}$  gelegt werden. [2]

### 7.2 Ausblick

Die Korrelationsanalyse hat gezeigt, dass sieblinienverwandte Faktoren einen signifikanten Einfluss auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltmastix haben. Für zukünftige Versuche empfiehlt es sich, die für die Prüfung ungünstigen Bestandteile größer  $125 \mu\text{m}$ , die aufgrund des erlaubten Überkorns im Füller enthalten sein können, aus der Gesteinskörnung zu entfernen. Die durchgeführten Untersuchungen am Füller/Feinanteil reichen noch nicht aus, um das Ermüdungsverhalten umfassend zu erklären. Ein weiterer möglicherweise signifikanter Einflussfaktor, der noch untersucht werden muss, ist die Kornform des verwendeten Füllers/Feinanteils. [2]

Ein weiterer Aspekt, der im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt blieb, ist der Einfluss von Wasser auf die Ermüdungsprüfungen. Da Festgesteine unterschiedliche Wasserempfindlichkeiten aufweisen, kann angenommen werden, dass eine Einwirkung von Wasser auch die Füller/Feinanteile und infolgedessen die Asphaltmastix unterschiedlich beeinflusst. Daher sind weitere Ermüdungsversuche mit einer Wasserlagerung notwendig. [2]

### 7.3 Fazit

Es konnte eine effiziente Prüfmethode zur Bestimmung der Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmastix entwickelt werden. Die Prüfungen sind an einem handelsüblichen DSR mit geringen Adaptionen durchführbar. Es wurden standardisierte Verfahren zur Mastixprobenherstellung, Probekörpervorbereitung, Prüfdurchführung und -auswertung ausgearbeitet. Die bisherige Annahme, dass die Mineralogie der Gesteinskörnung einen wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltmastix hat, konnte durch die umfangreichen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Stattdessen wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen sieblinienverwandten Faktoren und der Dauerhaftigkeit von Mastix festgestellt. Die Vermutung, dass auch kornformverwandte Faktoren einen Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit haben, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht. [2]

## Literaturverzeichnis

- [1] GESTRATA – Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt (Hrsg.): Asphalt Handbuch. Wien, 2010
- [2] M. Hospodka, B. Hofko, R. Blab: Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix – Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriteriums. Wien, 2017
- [3] W. Scholz, W. Hiese, R. Möhring (Hrsg.) et al.: Baustoffkenntnis. Werner Verlag, Köln, 2011
- [4] B. Hofko: Skriptum zur Vorlesung Baustoffe im Verkehrswegebau. TU Wien, 2016
- [5] ÖNORM EN 13043: 2014-02-15: Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen. Austrian Standards, Wien, 2014  
(Nachfolger-Entwurf: ÖNORM EN 13043: 2015-07-15)
- [6] G. Neroth, D. Vollenschaar (Hrsg.): Wendehorst Baustoffkunde. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [7] ÖNORM EN 12597: 2014-09-15: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie. Austrian Standards, Wien, 2014
- [8] ARBIT: bitumen! 02/11 Vom Erdöl bis zur Baustelle. Magazin der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. Hamburg, 2011
- [9] R. Blab, L. Eberhardsteiner: Skriptum zur Vorlesung Konstruktiver Straßenbau. TU Wien, 2016
- [10] ÖNORM EN 12591: 2009-07-01: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Anforderungen an Straßenbaubitumen. Austrian Standards, Wien, 2009  
(Nachfolger-Entwurf: ÖNORM EN 12591: 2016-05-15)
- [11] ÖNORM EN 14023: 2013-06-01: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen. Austrian Standards, Wien, 2013
- [12] ÖNORM EN 1426: 2015-09-15: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration. Austrian Standards, Wien, 2015
- [13] ÖNORM EN 1427: 2015-09-15: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung

- des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren. Austrian Standards, Wien, 2015
- [14] ÖNORM C 9218: 1995-01-01: Bitumen - Prüfung - Bestimmung der Duktilität. Austrian Standards, Wien, 1995  
(Zurückziehung: 2016-09-15)
- [15] ÖNORM EN 13398: 2010-07-01: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen. Austrian Standards, Wien, 2010  
(Nachfolger-Entwurf: ÖNORM EN 13398: 2016-03-01)
- [16] ARBIT: bitumen! 02/13 Die Kälteeigenschaften von Bitumen. Magazin der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. Hamburg, 2013
- [17] ÖNORM EN 12593: 2015-10-01: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß. Austrian Standards, Wien, 2015
- [18] ARBIT: bitumen! 04/11 Bitumen auf dem Prüfstand. Magazin der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. Hamburg, 2011
- [19] ARBIT: bitumen! 03/11 Multitalent Bitumen. Magazin der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. Hamburg, 2011
- [20] M. Hospodka: Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor. BOKU Wien, 2013
- [21] ÖNORM EN 12607-1: 2014-12-15: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren. Austrian Standards, Wien, 2014
- [22] ÖNORM EN 14769: 2012-07-15: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV). Austrian Standards, Wien, 2014
- [23] ÖNORM EN 12697-24: 2012-07-15: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. Austrian Standards, Wien, 2012
- [24] P. Mandahus: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Qualitätsbeurteilung der Asphaltmastix. TU Wien, 2016
- [25] ÖNORM EN 1097-7: 2009-01-01: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren. Austrian Standards, Wien, 2009

- [26] ÖNORM EN 14770: 2012-07-15: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). Austrian Standards, Wien, 2012

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Arten von bitumenhaltigen Bindemitteln.....	9
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung des Alterungsverlaufs von Bitumen.....	15
Abbildung 2-3: Netzrisse und Kornausbrüche .....	17
Abbildung 2-4: Auswertung eines 4PBB-Versuches und Ermittlung von $\epsilon_6$ .....	18
Abbildung 3-1: Dynamisches Scherrheometer – Anton Paar MCR 302.....	19
Abbildung 3-2: Funktionsweise des DSR, Oszillationsversuch.....	21
Abbildung 3-3: Viskoelastisches Materialverhalten, Phasenverschiebungswinkel $\delta$ .....	21
Abbildung 3-4: Platte-Platte System, Prüfgeometrie PP08.....	24
Abbildung 3-5: FE-Modellierung der Hyperboloide .....	24
Abbildung 3-6: Edelstahl-Positivform im DSR, gegossene Silikonform, fertige Silikonform .....	25
Abbildung 3-7: Probekörpergeometrie .....	25
Abbildung 3-8: Eingießen der Mastix, fertiger Probekörper.....	26
Abbildung 4-1: Mineralienbestand F036 .....	31
Abbildung 4-2: Mineralienbestand F038 .....	31
Abbildung 4-3: Mineralienbestand F039 .....	31
Abbildung 4-4: Mineralienbestand F040 .....	31
Abbildung 4-5: Mineralienbestand F041 .....	31
Abbildung 4-6: Mineralienbestand F051 .....	31
Abbildung 4-7: Mineralienbestand F052 .....	32
Abbildung 4-8: Mineralienbestand F053 .....	32
Abbildung 4-9: Mineralienbestand F099 .....	32
Abbildung 4-10: Mineralienbestand F100.....	32
Abbildung 4-11: Mineralienbestand F101 .....	32
Abbildung 4-12: Mineralienbestand F104.....	32
Abbildung 4-13: Mineralienbestand F105.....	33
Abbildung 4-14: Sieblinien der Füller/Feinanteile .....	38
Abbildung 6-1: Wiederholpräzision des Ermüdungsversuches bei 400 kPa.....	42
Abbildung 6-2: Beispielhafte Ermüdungskurve.....	43
Abbildung 6-3: Wöhlerkurve der Ermüdungsprüfungen einer Mastixprobe.....	44
Abbildung 6-4: Wöhlerkurve mit logarithmischer Skalierung der horizontalen Achse .....	45
Abbildung 6-5: Korrelation zwischen Schubmodul und Lastwechsel bis zum Versagen .....	45
Abbildung 6-6: Korrelation zwischen $ G_{DSR}^*  \cdot \sin(\delta)$ und Lastwechsel bis zum Versagen .....	46
Abbildung 6-7: Sieblinien der Mischprobe F105 und der beiden Ausgangsprodukte.....	47
Abbildung 6-8: Wöhlerkurven der Ermüdungsprüfungen dreier Mastixproben.....	47
Abbildung 6-9: Ermüdungsfestigkeit unterschiedlicher Füller/Feinanteile.....	48

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Versuchsablauf .....	27
Tabelle 4-1: Konventionelle Bitumenkennwerte 70/100 .....	28
Tabelle 4-2: Untersuchte Füller und Feinanteile .....	29
Tabelle 4-3: Gesamtmineralienbestand der Füller/Feinanteile – Anteile in % .....	30
Tabelle 4-4: Zusammenfassung des ermittelten Mineralienbestands .....	34
Tabelle 4-5: Dichte der Füller/Feinanteile .....	35
Tabelle 4-6: Dichte von Mineralien .....	35
Tabelle 4-7: Trockenverdichtbarkeit der Füller/Feinanteile .....	37
Tabelle 4-8: Ungleichförmigkeitszahl $C_U$ , Krümmungszahl $C_C$ und Siebdurchgänge .....	39
Tabelle 5-1: Kennwerte des Füllers F040 .....	40
Tabelle 5-2: Versuchsrandbedingungen .....	40
Tabelle 5-3: Prüfprogramm .....	41
Tabelle 6-1: Ergebnisse der Korrelationsanalyse .....	49

## Anhang

## Ermüdungsfestigkeiten aller durchgeführten Ermüdungsprüfungen

Mastix- probe	Füller	Schub- spannung [kPa]	Versuch #1			Versuch #2			Versuch #3		
			$ G^* _{t=10s}$	$\delta_{t=10s}$	Lastwechsel	$ G^* _{t=10s}$	$\delta_{t=10s}$	Lastwechsel	$ G^* _{t=10s}$	$\delta_{t=10s}$	Lastwechsel
B599A	F041	600	104	36,5	48.000	102	36,2	42.600	111	36,0	48.900
		500	109	35,2	107.100	107	35,1	107.400	113	34,8	117.300
		400	114	34,1	294.300	113	34,2	301.500	114	34,1	309.000
		300	117	33,3	964.500	118	33,3	990.000	123	32,8	1.074.000
		200	126	32,4	4.410.600						
B598A	F040	600	110	35,9	33.900	103	36,1	32.400	100	35,9	35.400
		500	112	34,8	91.800	106	35,0	78.300	116	34,5	98.100
		400	112	34,2	217.200	111	34,3	187.800	112	34,1	228.000
		300	119	33,0	838.200	122	33,2	771.000	115	33,2	690.600
		200	116	32,2		129	31,5	4.839.300			
B595A	F036	600	76	36,6	20.400	116	35,5	33.600	108	35,8	27.900
		500	104	35,0	66.600	100	35,2	65.700	112	34,6	73.200
		400	110	34,1	210.300	92	34,0	204.000	120	33,7	215.400
		300	105	33,3	674.700	109	33,3	672.900	97	33,9	564.900
		200	102	32,6							
B601A	F052	600	138	35,5	21.600	165	34,6	25.200	163	34,6	27.300
		500	156	34,5	45.000	162	33,7	61.200	168	33,4	69.600
		400	174	31,5	238.500	157	33,1	162.000	160	33,2	164.700
		300	86	33,2	660.300	169	32,3	645.300	153	32,8	576.000
		200	140	32,3	2.036.400						
B600A	F051	600	113	36,0	9.300	94	37,2	8.400	117	36,2	10.200
		500	114	35,0	21.300	94	35,8	20.100	122	35,3	24.300
		400	126	33,8	77.400	144	32,8	89.100	140	33,1	86.700
		300	128	32,4	269.100	131	33,0	254.700	137	32,4	302.100
		200	121	32,1	1.644.300						
B597A	F039	600	84	37,4	16.800	108	36,4	20.400	106	36,6	17.400
		500	110	35,9	37.500	100	35,7	34.800	99	35,7	41.700
		400	103	35,0	134.700	99	34,5	109.800	106	35,0	123.000
		300	111	34,0	438.300	115	33,5	470.700	120	33,4	509.100
B602A	F099	600	109	37,0	15.300	103	37,5	15.000	96	37,7	12.300
		500	89	37,0	30.900	94	37,2	27.600	98	37,1	29.100
		400	82	36,3	75.300	99	36,1	88.500	123	35,4	119.400
		300	114	34,1	302.400	121	34,7	360.900	100	34,8	310.500
		200	103	33,9	1.441.200						
B596A	F038	600	83	39,6	13.500	83	39,5	13.500	81	39,2	11.700
		500	92	37,3	42.600	69	38,3	30.600	88	37,4	33.900
		400	89	36,7	92.400	93	36,8	88.800	87	36,4	121.200
		300	93	35,9	309.900	94	40,0	346.800	99	35,6	315.300
		200	82	35,3	1.474.200						
B613A	F100	600	53	41,3	6.300	72	40,0	6.900	49	42,7	4.800
		500	71	38,6	16.500	50	39,3	15.600	54	39,3	16.200
		400	48	39,0	39.000	52	38,7	43.800	62	37,9	48.300
		300	46	38,1	122.100	54	37,4	152.400	74	36,4	219.300
		200	59	36,3	678.600						
B616A	F053	600	73	39,5	7.800	71	39,7	9.600	76	39,4	9.900
		500	64	38,6	22.800	68	38,6	22.800	72	37,9	25.800
		400	78	36,9	64.200	77	36,7	67.500	81	36,9	72.900
		300	84	35,9	210.000	76	36,2	255.000	73	36,4	207.300
		200	88	34,8	1.168.800						
B643A	F101	500	149	35,3	23.400	133	35,2	24.000			
		400	151	34,7	59.400				132	35,0	51.900
		300	155	33,3	203.700	163	33,3	213.300	138	34,3	175.800
		200	185	31,7	1.713.300						
B644A	F104	500	99	36,8	33.900	104	36,6	31.500	110	36,4	38.400
		400	111	35,4	105.900	96	35,8	92.700	100	35,7	95.400
		300	103	34,8	381.000	112	34,7	361.800	117	34,6	382.500
		200	110	34,0	1.712.100						
B645A	F105	500	107	36,7	30.000	117	36,3	35.400	115	36,5	33.000
		400	128	35,1	106.800	140	35,0	99.600	111	35,5	82.200
		300	106	34,9	307.200	111	35,0	281.100	112	34,8	307.200