

Diploma Thesis

Comparative fatigue performance assessment of asphalt mastics in DSR

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

DIPLOMARBEIT

Vergleichende Untersuchungen zur Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmastix am Dynamischen Scherrheometer (DSR)

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

von

Martin Peyer

Matr.Nr.: 01125128

unter der Anleitung von

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

Und der Mitbetreuung von

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

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

Wien, im September 2020

Kurzfassung

Der Widerstand der einzelnen Asphaltsschichten gegen Materialermüdung ist für die Aufrechterhaltung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Asphaltoberbauten von besonderer Bedeutung. Zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens werden dabei hauptsächlich Prüfverfahren mit Probekörpern aus Asphalt oder Bitumen angewendet, mit deren Hilfe ermüdungsrelevante Parameter quantitativ erfasst werden. Der wesentliche Einfluss des Füllers auf die Ermüdungseigenschaften der Asphaltsschichten wird bei diesen Prüfverfahren jedoch nur unzureichend beschrieben. Eine mangelnde Qualität des Füllers als Bestandteil der Asphaltmastix (= Füller + Bitumen) oder seiner mangelnden Kompatibilität zum verwendeten Bitumen kann eine verringerte Dauerhaftigkeit des Asphaltoberbaus zur Folge haben.

Zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix werden in der Forschung aktuell unterschiedliche Prüfmethöden angewendet, da keine Kriterien oder Richtlinien zu Ermüdungsprüfungen an Asphaltmastix existieren. Beispielsweise wurde an der TU Wien ein standardisierter Ermüdungsversuch im dynamischen Scherrheometer (DSR) mit einem hyperbolischen Probekörper entwickelt.

In der gegenständlichen Arbeit werden zuerst einige Prüfverfahren erläutert, welche im europäischen bzw. nordamerikanischen Raum für die Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Bitumen oder Asphalt zur Anwendung kommen. Dabei werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Prüfverfahren betreffend der Versuchsdurchführung bzw. der Versuchsauswertung angeführt und deren potentielle Anwendbarkeit für Ermüdungsprüfungen an Asphaltmastix analysiert.

Aus den angeführten Prüfverfahren wurden drei gängige Verfahrensarten ausgewählt (dehnungsgesteuerte Time-Sweep-Prüfung, spannungsgesteuerte Time-Sweep-Prüfung und Linear-Amplitude-Sweep-Prüfung) und an hyperbolischen sowie zylindrischen Probekörpern, welche aus jeweils drei unterschiedlichen Asphaltmastixsorten hergestellt wurden, angewandt.

Die einzelnen Prüfergebnisse wurden in weiterer Folge unter Anwendung unterschiedlicher Ermüdungskriterien ausgewertet und in Abhängigkeit des verwendeten Prüfverfahrens und der verwendeten Asphaltmastixsorte mittels Regressionsanalysen in Wöhler-Kurven abgebildet, welche anschließend miteinander verglichen wurden.

Dabei zeigte sich, dass die Auswertung spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen und die Auswertung der Linear-Amplitude-Sweep-Prüfungen äquivalente Resultate zum Ermüdungsverhalten der untersuchten Asphaltmastixsorten liefern. Im Vergleich dazu lieferte die Auswertung der verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen bei einer Mastixsorte ein abweichende Ergebnis in der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens. Weiters zeigte sich bei allen drei angewendeten Prüfverfahren, dass zwar betreffend der Anfangswerte des Betrags des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ betragsmäßig große Unterschiede zwischen den durchgeführten Prüfungen an hyperbolischen und zylindrischen Probekörpergeometrien auftraten, und folglich ein Materialversagen aufgrund Ermüdung bei hyperbolischen Probekörpern zu einem früheren Zeitpunkt eintritt als bei zylindrischen Probekörpern. Dennoch wurde beim Vergleich der abgebildeten Wöhlerkurven sowohl bei hyperbolischen als zylindrischen Probekörpern ein äquivalentes Ermüdungsranking ermittelt. In Folge dessen konnte nachgewiesen werden, dass innerhalb der durchgeführten Testreihen die Verwendung von hyperbolischen und zylindrischen Probekörpern zu äquivalenten Ergebnissen hinsichtlich der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens der drei untersuchten Asphaltmastixsorten führt.

Abstract

The fatigue resistance of asphalt pavement layers is of particular importance for sustaining the load-bearing capacity and serviceability of asphalt pavements. To describe the fatigue behavior, test methods with test specimens made of asphalt mixture or bitumen are mainly used, which enable the characterization of fatigue related parameters. However, the main influence of the filler on the fatigue behavior of the asphalt layers is not adequately described in these test methods. A poor quality of the filler as part of the asphalt mastic (= filler + bitumen) or its incompatibility with the used bitumen can result in a reduced durability of the asphalt pavement and thus, reduced technical lifetimes.

To determine the fatigue behavior of asphalt mastic, different test methods are currently used in research, as there are no standards for fatigue tests on asphalt mastic. Lately an efficient fatigue test in the dynamic shear rheometer with a hyperbolic test specimen was developed at TU Wien.

In the thesis at hand, some test methods are presented which are used in Europe and North America to assess the fatigue behavior of bitumen or asphalt. The advantages and disadvantages of the individual test procedures with regard to the test procedure and the test evaluation are listed and their potential applicability for fatigue tests on asphalt mastic is analysed.

Afterwards, three common types of test procedures were selected (strain-controlled time-sweep test, stress-controlled time-sweep test and linear amplitude sweep test) and applied to hyperbolic and cylindrical test specimens, each made from three different types of asphalt mastic.

The individual test results were then evaluated using different fatigue criteria and, depending on the test method used and the type of asphalt mastic used, were derived into Woehler curves by the use of regression analyses, which were then compared with one another.

It was found that the evaluation of the stress-controlled time-sweep tests and the evaluation of the linear amplitude sweep tests provide comparable results of the fatigue behavior of the asphalt mastic samples. In comparison, the evaluation of the strain-controlled time-sweep tests for one type of mastic gave a different result in the characterization of the fatigue behavior. In addition, it was found with all three test methods used that there were large differences in initial complex modulus of shear $|G^*|$ between tests carried out on hyperbolic and cylindrical test specimens, and consequently material failure due to fatigue occurs earlier in the case of hyperbolic test specimens than in the case of cylindrical specimens. Nevertheless, when comparing the derived Woehler curves, an equivalent fatigue ranking was determined for both hyperbolic and cylindrical test specimens. As a result, it was possible to demonstrate that the use of hyperbolic and cylindrical test specimens within the test series led to equivalent results with regard to the description of the fatigue behavior of the three types of asphalt mastic under investigation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Allgemein.....	1
1.2	Aufgabenstellung.....	2
1.3	Begriffsdefinitionen.....	2
1.3.1	Asphaltmastix	2
1.3.2	Dynamischer Scherrheometer.....	2
1.3.3	Linear-viskoelastischer Bereich (LVE).....	4
1.3.4	Materialermüdung	5
1.3.5	Wöhlerkurven.....	6
2	Ausgewählte Prüfmethode zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens auf Bitumenebene	7
2.1	Versuch zur Ermittlung des Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ (AASHTO PG-Grading).....	7
2.1.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	7
2.1.2	Vorteile des Prüfverfahrens	7
2.1.3	Nachteile des Prüfverfahrens.....	8
2.2	Time-Sweep Prüfverfahren	8
2.2.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	8
2.2.2	Vorteile des Prüfverfahrens	9
2.2.3	Nachteile des Prüfverfahrens.....	9
2.3	Linear-Amplitude-Sweep Prüfverfahren (LAS) nach AASHTO TP101 [35].....	9
2.3.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	9
2.3.2	Vorteile des Prüfverfahrens	12
2.3.3	Nachteile des Prüfverfahrens.....	12
2.4	Multiple Stress Creep and Recovery Test (Kriechtest - MSCRT) – nach ÖNORM EN 16659 [37]	12
2.4.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	12
2.4.2	Vorteile des Prüfverfahrens	16
2.4.3	Nachteile des Prüfverfahrens.....	16
2.5	Zugversuch am zweiseitig gekerbten Bitumenstreifen (DENT) - nach MTO LS-299 [38]	17
2.5.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	17
2.5.2	Vorteile des Prüfverfahrens	18
2.5.3	Nachteile des Prüfverfahrens.....	19
3	Ausgewählte Prüfmethode zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens auf Asphaltmastix-/Asphaltebene.....	20
3.1	Dynamisch-mechanische Analyseprüfung (DMA).....	20

3.1.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	20
3.1.2	Vorteile des Prüfverfahrens	20
3.1.3	Nachteile des Prüfverfahrens	20
3.2	Vierpunkt-Biegebalken-Versuch am prismatischen Probekörper (4PB-PR) nach ÖNORM EN 12697-24 [44]	21
3.2.1	Beschreibung des Prüfverfahrens	21
3.2.2	Vorteile des Prüfverfahrens	22
3.2.3	Nachteile des Prüfverfahrens	22
4	Anwendbarkeit der Prüfverfahrens zur Prüfung von Asphaltmastix	23
5	Materialauswahl und Probekörpereigenschaften.....	25
5.1	Materialauswahl.....	25
5.2	Probekörpergeometrie.....	25
5.3	Probekörperherstellung	26
5.3.1	Zylindrischer Probekörper	26
5.3.2	Hyperbolischer Probekörper	26
6	Prüfgerät.....	28
7	Bestimmung linear-viskoelastische Bereiche (LVE).....	29
7.1	Allgemeines	29
7.2	Lineare Viskoelastizität zylindrischer Probekörper	29
7.3	Lineare Viskoelastizität hyperbolischer Probekörper	31
7.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse	32
8	Angewendete Prüfverfahren zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix... 34	
8.1	Time-Sweep-Prüfverfahren (verschiebungsgesteuert)	34
8.1.1	Prüfparameter	34
8.1.2	Prüfablauf.....	34
8.2	Time-Sweep-Prüfverfahren (spannungsgesteuert).....	35
8.2.1	Prüfparameter	35
8.2.2	Prüfablauf	35
8.3	LAS-Prüfverfahren	36
8.3.1	Prüfparameter	36
8.3.2	Prüfablauf	36
9	Ermüdungskriterien.....	37
9.1	Übersicht	37
9.2	Angewendete Ermüdungskriterien	38

9.2.1	Abfall des Betrags des komplexen Schubmoduls auf 50% des Ausgangswerts ($G^*(50\%)$ -Kriterium)	38
9.2.2	Erreichen des maximalen Phasenverschiebungswinkels (δ_{\max} Kriterium)	39
9.2.3	Änderung bzw. Zunahme der dissipativen Energie bei fortschreitender Lastspielanzahl (DER-Kriterium)	40
10	Auswertung und Analyse der Prüfergebnisse	43
10.1	Allgemeines	43
10.2	Ermüdung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen	43
10.2.1	Allgemeines	43
10.2.2	Anwendung Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$	43
10.2.3	Anwendung Ermüdungskriterium δ_{\max} :.....	45
10.2.4	Anwendung Ermüdungskriterium DER:.....	47
10.2.5	Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	48
10.3	Ermüdung spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen	50
10.3.1	Allgemeines	50
10.3.2	Anwendung Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$	50
10.3.3	Anwendung Ermüdungskriterium δ_{\max} :.....	52
10.3.4	Anwendung Ermüdungskriterium DER:.....	53
10.3.5	Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	55
10.4	Ermüdung gemäß Linear-Amplitude-Sweep-Test (LAS)	57
10.4.1	Allgemeines	57
10.4.2	Prüfungen mit zylindrischen Probekörpern	57
10.4.3	Prüfungen mit hyperbolischen Probekörpern.....	58
10.4.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	59
11	Zusammenfassung und Ausblick	62
11.1	Zusammenfassung.....	62
11.2	Ausblick.....	63
12	Verzeichnisse	64
12.1	Literaturverzeichnis.....	64
12.2	Abbildungsverzeichnis.....	68
12.3	Tabellenverzeichnis	69
13	Anhang.....	70

1 Einleitung

1.1 Allgemein

Das Auftreten von Rissen infolge Materialermüdung, vor allem bedingt durch wiederholt auftretende Verkehrsbelastung, ist eines der am häufigsten anzutreffenden Schadensbilder in Asphaltoberbauten. Die verkehrsinduzierten Belastungen führen bei jedem Lastwechsel zu Spannungen und Dehnungen in den darunterliegenden Asphaltsschichten, welche mit fortlaufender Dauer zu Schadensakkumulationen, in Form von anwachsenden Mikrorissen an der Unterseite der Asphalttragschichten, führen. Nachdem sich diese Mikrorisse zu Makrorissen vereinigt haben, schlagen sich letztere häufig bis zu den oberen Asphaltsschichten bzw. bis zur Oberfläche des Straßenoberbaus durch.

Der Prävention ermüdungsbedingter Risse kommt daher im Asphaltstraßenbau eine tragende Rolle zu. Um das Ermüdungsverhalten der verwendeten Materialien bzw. Materialkompositionen hinreichend genau zu erfassen, werden eine Vielzahl unterschiedlicher Prüfverfahren angewandt, welche das Materialverhalten hauptsächlich auf Bitumenebene (z.B. PG-Grading-Prüfung) oder Asphaltenebene (z.B. 4-Punkt-Biegebalken-Prüfung) beschreiben.

Bei diesen Prüfverfahren wird jedoch der wesentliche Einfluss des Füllers auf den Widerstand gegen Materialermüdung nicht bzw. unzureichend beachtet. Der Füller lagert sich in den Zwischenräumen der grobkörnigen Zuschlagsstoffe der Asphaltmischung, inmitten der Bitumenphase ein und beeinflusst daher als Bestandteil der Asphaltmischung (= Füller + Bitumen) die Belastungsfähigkeit des eingebauten Asphalts. Beispielsweise wurden in Österreich in der näheren Vergangenheit immer häufiger Korn- und Schollenausbrüche in Asphaltdeckschichten festgestellt, deren Ursache nicht immer eindeutig einer klimatischen oder verkehrsinduzierten Belastung zugeordnet werden konnten. Als mögliche Schadensursache kommt dabei die mangelnde Dauerhaftigkeit von Asphaltmischung, infolge unzureichender Qualität der Asphaltmischungskomponenten, in Frage [1].

Untersuchungen von Liao et al. [2] mit dem DSR an Probekörpern aus Asphaltmischung und Bitumen haben Änderungen der Ermüdungseigenschaften infolge Zugabe von Füller zum Bitumen aufgezeigt. Es wurde festgestellt, dass die Steifigkeit von Asphaltmischung, vor allem mit zunehmenden Füllergehalt, deutlich über jener von reinem Bitumen liegt. Die Abweichungen bei den Wöhlerkurven zwischen Asphaltmischung und Bitumen, weisen weiters die Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens durch den Füller nach.

In weiterer Folge stellen die Beschreibung des Ermüdungsverhaltens auf Ebene der Asphaltmischung und dessen Korrelation zum Ermüdungsverhalten der einzelnen Asphaltsschichten einen interessanten Untersuchungsumfang dar. Unter anderem dadurch werden in der Forschung neue Prüfverfahren entwickelt bzw. existierende Prüfverfahren auf Bitumen- bzw. Asphaltenebene adaptiert, um das Ermüdungsverhalten auf Asphaltmischung-Ebene beschreiben zu können. Für die Anwendung bzw. die Auswertung dieser Prüfverfahren existieren zum aktuellen Zeitpunkt jedoch größtenteils noch keine Richtlinien bzw. Grenzwerte. Auch die generelle Anwendbarkeit mancher Prüfverfahren bzw. die Aussagekraft der Ergebnisse sind noch Ziel genauerer Untersuchungen.

1.2 Aufgabenstellung

Im Zuge des Forschungsprojekt „Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix – Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriteriums“ am Institut für Verkehrswissenschaften der TU Wien [1] wurde ein standardisierter Ermüdungsversuch am dynamischen Scherrheometer (DSR) zur Beschreibung der Ermüdungseigenschaften von Asphaltmastix entwickelt.

In der gegenständlichen Arbeit soll dieses Prüfverfahren mit anderen Verfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix untersucht werden. Dazu werden die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen analysiert und Korrelationen zwischen den einzelnen Prüfparametern sowie mögliche Einschränkungen hinsichtlich der Verwendbarkeit des Prüfverfahrens aufgezeigt.

Der Untersuchungsumfang der vorliegenden Arbeit begrenzt sich dabei auf:

- Prüfen von drei unterschiedlichen Asphaltmastix-Sorten mit jeweils drei unterschiedlichen Prüfmethoden an zwei unterschiedlichen Probekörperformen
- Auswertung und Analyse der Prüfergebnisse
- Auswertung und Analyse der Prüfmethoden
- Zusammenfassung der Arbeit (Vergleich der Ergebnisse und Empfehlungen zufolge der Testreihen)

1.3 Begriffsdefinitionen

1.3.1 Asphaltmastix

Die Asphaltmastix als Bestandteil eines klassischen Heißmischgut-Asphalts, bezeichnet das Gemisch aus Bitumen und Füller (Überwiegender Anteil der Körner $< 0,063\text{mm}$ [3]). Innerhalb des Asphaltmischguts umhüllt die Asphaltmastix in Ihrer Eigenschaft als Bindemittelsubstanz die grobkörnigeren Asphaltbestandteile. Die Festigkeit der Asphaltmastix sowie deren Haftvermögen an den größeren Gesteinskörnungen, sind wichtige Parameter für die Eigenschaften der jeweiligen Asphaltsschichten. Untersuchungen haben gezeigt, dass die mineralogische Zusammensetzung des Füllers bzw. der Feinanteile die Qualität der Asphaltmastix, sowie deren Festigkeit und Haftungsvermögen an grober Gesteinskörnung, wesentlich beeinflusst [4]-[6]. Die Verwendung qualitativ ungeeigneter Asphaltmastixbestandteile kann in weiterer Folge zu deutlichen Einbußen in der Lebensdauer der entsprechenden Asphaltsschichten führen.

1.3.2 Dynamischer Scherrheometer

Der dynamische Scherrheometer (DSR) ist ein Prüfgerät, das eine oszillierende Scherbeanspruchung auf einen eingebauten Probekörper ausübt und dessen Materialantwort in Form von Schubdehnungen aufzeichnet (siehe Abbildung 1). Im Bereich des Straßenbaus wird der DSR hauptsächlich für die Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen verwendet.

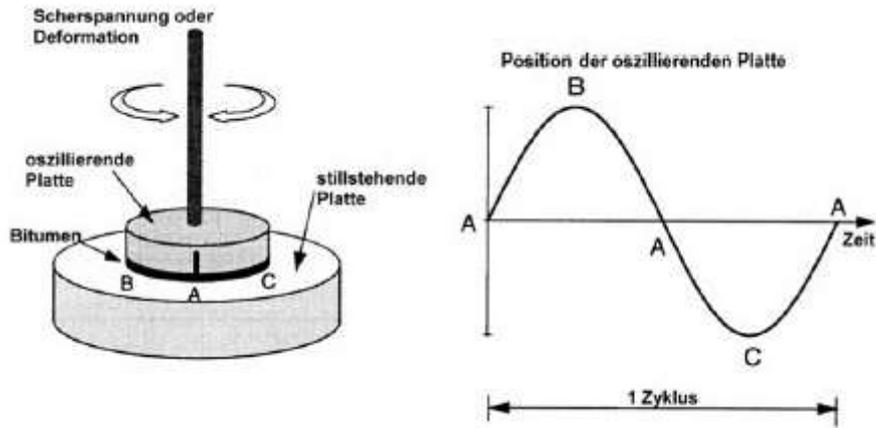


Abbildung 1: Funktionsweise des DSR [7]

Im Zuge der Versuchsdurchführung wird auf einen Bitumenprobekörper mittels eines DSR-Stempels eine definierte, oszillierende Schubspannung τ (spannungsgesteuerter Versuch) mit bekannter Frequenz f bei einer konstanten Temperatur T aufgebracht. Als Reaktion auf die Belastung antwortet der Prüfkörper mit einer Schubverformung γ , welche für jeden Zeitpunkt des Versuchs aus der Prüfkörpergeometrie (Radius r und Höhe h) und dem gemessenen Drehwinkel α gemäß Gleichung (1) ermittelt wird.

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

Aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens von Bitumen erfolgt die Reaktion des Bitumenprobekörpers zeitversetzt auf die eingebrachte Schubbeanspruchung (siehe Abbildung 2). Die Dauer dieses Zeitversatzes wird als Zeitverschiebung Δt bezeichnet, und über die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet.

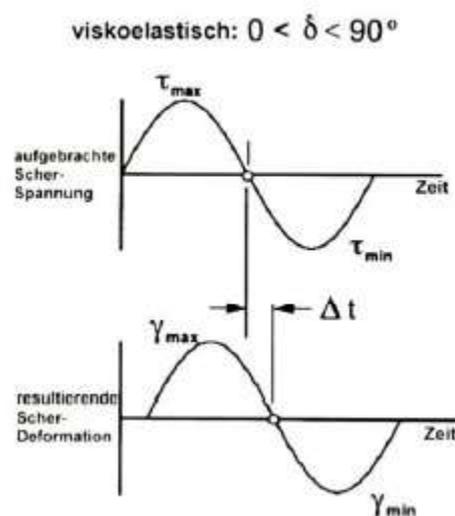


Abbildung 2: Phasenverschiebungswinkel eines viskoelastischen Materials [7]

Das Verhältnis von Δt zur gesamten Periodendauer T (bzw. zur Frequenz f) wird als Phasenverschiebungswinkel δ bezeichnet und errechnet sich gemäß Gleichung (2).

$$\delta = \frac{\Delta t}{T} \quad (2)$$

Der Phasenverschiebungswinkel δ gibt Aufschluss über das rheologische Materialverhalten des untersuchten Probekörpers. Kleine Phasenverschiebungswinkel (unterer Grenzwert $\delta = 0^\circ$) weisen auf ein eher elastisches Materialverhalten hin, während ein großer Phasenverschiebungswinkel (oberer Grenzwert $\delta = 90^\circ$) ein viskoses Verhalten beschreibt.

Neben der Schubverformung γ_{\max} wird auch der Verlauf der eingebrachten Schubbeanspruchung τ_{\max} aufgezeichnet. Diese Schubbeanspruchung wird mittels Anlegen eines Drehmoments M an den sogenannten DSR-Stempel erzeugt, welcher diese Beaufschlagung als Schubbeanspruchung an den Probekörper weitergibt. Die eingebrachte Schubspannung τ lässt sich als Verhältnis der eingebrachten Schubkraft F zur Querschnittsfläche A des Prüfkörpers gemäß Gleichung (3) errechnen.

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

Der Quotient aus der sinusförmig eingebrachten Schubspannung τ_{\max} und der Materialantwort des Prüfkörpers in Form der Schubverformung γ_{\max} entspricht dem Betrag der komplexen Schubsteifigkeit $|G^*|$ des untersuchten Materials (siehe Gleichung (4)).

$$|G^*| = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad (4)$$

Aufgrund der Phasenverschiebung δ , die als Folge des viskoelastischen Materialverhaltens von Bitumen auftritt, gliedert sich die komplexe Schubsteifigkeit G^* gemäß Gleichung (5) bis (7) in einen elastischen Anteil G' (Speichermodul = Realteil) und einen viskosen Anteil G'' (Verlustmodul = Imaginärteil).

$$G' = G^* \cdot \cos \delta \quad (5)$$

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

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (7)$$

Neben der Durchführung von belastungsgesteuerten Versuchen kommen auch verschiebungsgesteuerte Versuche zur Anwendung. Bei diesen Versuchsdurchführungen wird der Probekörper einer konstanten Verformung γ anstatt einer konstanten Spannung τ ausgesetzt. Dabei wird die daraus resultierende Materialantwort in Form einer oszillierenden Schubspannung gemessen. Beide Versuche werden in der Regel im Bereich mit linear-viskoelastischem Materialverhalten durchgeführt [8].

1.3.3 Linear-viskoelastischer Bereich (LVE)

Der linear-viskoelastische Bereich LVE definiert sich als jener Bereich in dem der Betrag des komplexen Schubmoduls $|G^*|$, unabhängig vom aufgebrauchten Verformungs- bzw. Spannungsniveau, einen annähernd konstanten Verlauf aufweist [9]. Für die Definition des Grenzwerts des linear-

viskoelastischen Bereichs lassen sich in den Normen unterschiedliche Festlegungen finden. Beispielsweise wird der Grenzwert gemäß EN 14770 [9] an jener Stelle definiert, an der sowohl der Speichermodul G' als auch der Verlustmodul G'' (gemäß Gleichung (5) und (6)) infolge des Aufbringens eines bestimmten Verformungs- bzw. Spannungsniveaus auf jeweils 95% seines Initialwerts abgefallen sind. Im Gegensatz dazu wird der Grenzwert gemäß DIN 53019-4 [10] bzw. ASTM D7175 [11] an jenem Punkt definiert, an der der Betrag des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ auf 95% (DIN 53019-4 [10]) bzw. 90% (ASTM D7175 [11]) seines Ausgangswerts abgesunken ist.

Wird beispielsweise ein Probekörper im Zuge einer durchgeführten Time-Sweep-Prüfung mit einem Verformungs- oder Spannungsniveau beaufschlagt, welches einen annähernd konstanten Verlauf des Betrags des komplexen Schubmoduls zur Folge hat, befindet sich die Messstruktur im linear-viskoelastischen Bereich wodurch der untersuchte Probekörper frei von Zerstörung bleibt. Viele Prüfverfahren, wie z.B. der PG-Grading-Versuch (siehe Abschnitt 2.1) oder der erste Abschnitt (Frequenz-Sweep) des LAS-Prüfverfahrens (siehe Abschnitt 2.3) zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Bitumen, dürfen nur innerhalb des linear-viskoelastischen Bereichs des zu untersuchenden Probekörpers stattfinden.

1.3.4 Materialermüdung

Unter Materialermüdung versteht man die langsam voranschreitende Schädigung einer oder mehrerer Asphaltsschichten infolge dynamischer Beanspruchungen, welche sich hauptsächlich auf klimatische oder verkehrsbedingte Einwirkungen zurückführen lassen.

Der Prozess der Materialermüdung lässt sich typischerweise auf insgesamt vier, zeitlich aufeinander folgende Ermüdungsphasen aufteilen (für spannungsgesteuerte Versuchsdurchführung siehe Abbildung 3) [12]. Zu Belastungsbeginn tritt Phase 1 (Einschwingphase) auf, innerhalb dieser thixotrope Vorgänge [13],[14] sowie geringe Materialerwärmungen infolge Energiedissipation zu einer reversiblen Steifigkeitsverminderung führen. Während der zweiten Phase folgen die Entstehung und die anschließende Ausbreitung bzw. das Anwachsen von Mikrorissen, welche zu einer kontinuierlichen Abnahme der Steifigkeit und einer Zunahme der Schädigung pro Lastzyklus führen. In verschiedenen Untersuchungen [15]-[18] hat sich gezeigt, dass die in Phase zwei auftretenden Schädigungen in Form von Mikrorissen während belastungsfreier Perioden vom Material wieder abgebaut werden können. In Phase drei vereinigen sich die anwachsenden Mikrorisse zu größeren Makrorissen, welche nicht rückbildbare Schädigungen zur Folge haben. Phase drei kennzeichnet sich weiters durch eine, verglichen mit Phase 2, wesentlich raschere Abnahme der Materialsteifigkeit bei zunehmender Anzahl an Lastspielen [19]. Durch das weitere Anwachsen der Makrorisse vereinigen sich diese in Phase 4 zu durchgehenden Bruchlinien, welche ein Versagen des Materials zur Folge haben [12].

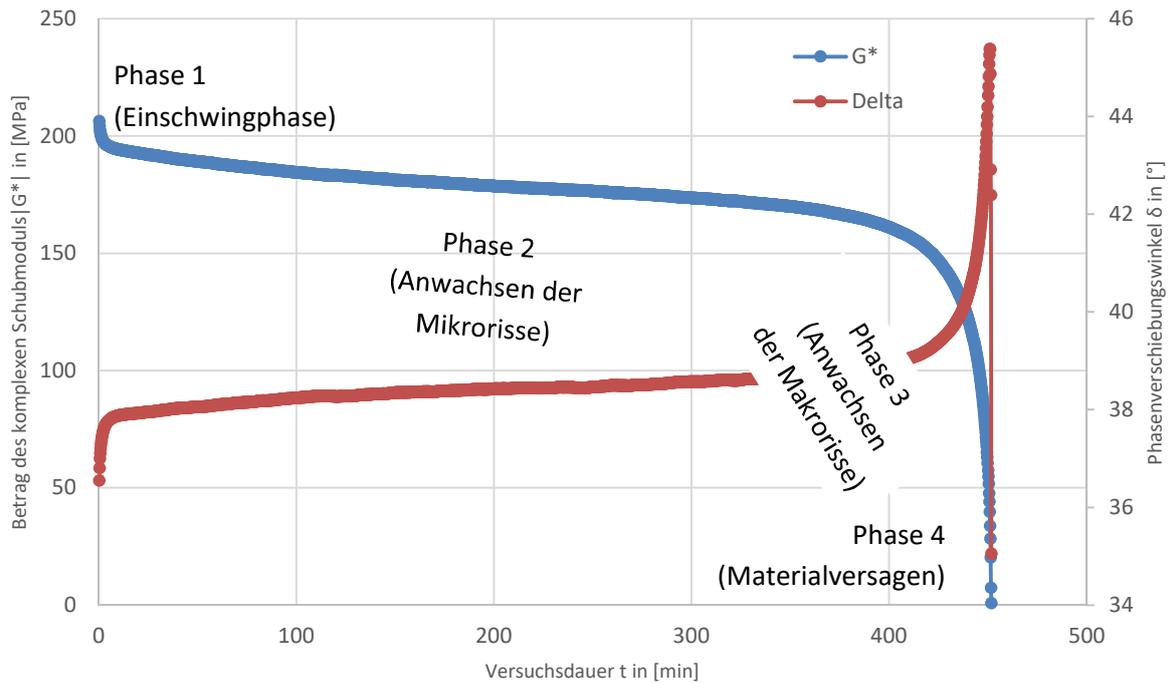


Abbildung 3: Ermüdungsphasen während spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfung

1.3.5 Wöhlerkurven

Die Auswertung der Einzelergebnisse der durchgeführten Ermüdungsprüfungen führen im Allgemeinen zur Ermittlung jener Lastspielzahlen, bei denen während der jeweiligen Versuchsdurchführung Ermüdung eintritt. Mithilfe von Wöhlerdiagrammen werden die ermittelten Anzahlen an Lastspiele bis zum Ermüdungseintritt (x-Achse) dem jeweils aufgebrachten Beanspruchungsniveau (y-Achse) gegenübergestellt. Um das Ermüdungsverhalten der untersuchten Materialien auch außerhalb der bereits aufgebrachten Beanspruchungsniveaus beschreiben zu können, werden die jeweiligen Einzelergebnisse mittels Regressionsanalysen zusammengefasst und in Regressionskurven, die sogenannten Wöhlerkurven, abgebildet. Stellt man die x-Achse des Wöhlerdiagramms (Anzahl der Lastspiele bis zum Ermüdungseintritt) in einem besser geeigneten Maßstab dar, zeigen sich die einzelnen Wöhlerkurven als Geraden. In der gegenständlichen Arbeit wurde jeweils ein logarithmischer Maßstab angewendet, wodurch die Funktionswerte der einzelnen Wöhlerkurven gemäß Gleichung (8) beschrieben werden können.

$$y = k \cdot \ln(x) + d \quad (8)$$

Die Korrelation zwischen den einzelnen Ermüdungslastspielzahlen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven werden mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes R^2 beurteilt. Hohe Werte von R^2 bedeuten eine gute Korrelation zwischen den Einzelergebnissen und den abgeleiteten Wöhlerkurven, während geringe R^2 -Werte auf eine schlechte Korrelation schließen lassen.

2 Ausgewählte Prüfmethode zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens auf Bitumenebene

2.1 Versuch zur Ermittlung des Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ (AASHTO PG-Grading)

2.1.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Die Ermittlung des Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ eines bituminösen Bindemittels erfolgt durch Prüfung mit dem DSR. Dabei werden der Betrag des komplexen Schermoduls $|G^*|$ und der Phasenverschiebungswinkel δ des untersuchten Bitumenprobekörpers ermittelt, ausgewertet und als Ermüdungsindex $G^*\sin \delta$ abgebildet.

Bei Durchführung des PG-Grading-Tests gemäß AASHTO T315 [20] wird ein Bitumenprobekörper innerhalb von 10 Schwingzyklen mit einer Beanspruchungsfrequenz von 1,592Hz (bzw. 10 s^{-1}), zur Simulation einer Schubbeanspruchung infolge einer Überfahrt mit 90 km/h [21], sinusförmig belastet. Dabei werden die Verläufe des Betrags des komplexen Schermoduls $|G^*|$ und des Phasenverschiebungswinkels δ für alle 10 Schwingzyklen aufgezeichnet. Im Anschluss daran werden die Verläufe gemäß AASTHO T315 [20] ausgewertet und daraus der Ermüdungsindex $G^*\sin \delta$ ermittelt.

Als Prüfkörper kommt entweder ein Bitumen-Plättchen mit einem Durchmesser von 8mm und einer Dicke von 2mm oder ein Bitumen-Plättchen mit einem Durchmesser von 25mm und einer Dicke von 1mm zum Einsatz. Auf Basis der ausgewählten Prüftemperatur erfolgt die Auswahl der Probekörpergeometrie. Bei Versuchsdurchführung im hohen Temperaturbereich (46-82°C) wird ein 25mm-Plättchen verwendet. Erfolgt die Versuchsdurchführung bei niedrigerer Temperatur (4-40°C) findet das 8mm-Plättchen seine Anwendung [20],[21].

Bei Ermittlung des Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ nach Vorgaben der Prüfparameter gemäß ÖNORM EN 14770 [8], soll die Beanspruchungsfrequenz des jeweiligen Bitumenprobekörpers innerhalb des Bereichs von 0,1 bis 10 Hz liegen. Dabei kann der jeweilige Versuch bei einer konstanten Frequenz oder innerhalb eines vordefinierten Frequenzbereichs stattfinden. Die Prüftemperatur soll gemäß ÖNORM EN 14770 [8] im Bereich zwischen +25 und +85°C liegen. Für die Beschreibung des Ermüdungsverhaltens des untersuchten Bitumenprobekörpers werden in der Praxis jedoch auch Versuche bei Temperaturen $T < 25^\circ\text{C}$ durchgeführt.

Anforderungen an das Bindemittel hinsichtlich des Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ sind bei Anwendung der Performance-Grade-Klassifizierung geregelt. Dabei gilt der Widerstand gegen Materialermüdung als hinreichend groß, wenn das zu prüfende RTFOT- und PAV-gealterte Bitumen einen Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta) \leq 5000 \text{ kPa}$ aufweist [22].

2.1.2 Vorteile des Prüfverfahrens

- + Probekörper kann einfach, schnell und kostengünstig hergestellt werden
- + Gute Beurteilungsmöglichkeit der Auswirkungen der Langzeitalterung auf die Materialeigenschaften von Bitumen [23]
- + Variable Einstellungsmöglichkeiten betreffend die Regelung von Temperatur

- + Verhältnismäßig rasche Versuchsdurchführung
- + Aus Versuchsdurchführung können bemessungsrelevante, physikalische Parameter (Komplexer Schubmodul, Phasenverschiebungswinkel) ermittelt werden

2.1.3 Nachteile des Prüfverfahrens

- Speziell bei modifizierten Bitumensorten schlechte Korrelation zwischen Ergebnissen für den Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ und Ergebnissen aus Vergleichsuntersuchungen, wie beispielsweise mit dem 4-Punkt-Bieebalken-Versuch, oder Ergebnissen aus anderen Langzeitermüdungsuntersuchungen [24]-[26].
- Nur teilweise Nachbildung einer praxisnahen Beanspruchung. Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ ist ein steifigkeitsbasierender Parameter der infolge einer relativ geringen Beanspruchung ohne Auftreten einer Schädigung und mit einer geringen Anzahl an Lastzyklen ermittelt wird. Diese Prüfsituation weicht relativ stark von der in der Realität vorhandenen komplexen Ermüdungseinwirkung ab, welche sich durch eine hohe Anzahl an Lastspielen und eine hohe Lastintensität kennzeichnet [24]. Unter anderem deswegen wird die Anwendbarkeit des Ermüdungsindex $G^*\sin(\delta)$ zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Bitumen, in vielen Untersuchungen stark angezweifelt [27]-[31].
- Keine Information zum chemischen Aufbau bzw. der Struktur des untersuchten Bitumens. Restrisiken infolge von Fehlern bei der Beurteilung des untersuchten Bitumens anhand der Prüfergebnisse können nicht ausgeschlossen werden.
- Anwendung ausschließlich im linear-viskoelastischen Bereich [24]

2.2 Time-Sweep Prüfverfahren

2.2.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Mit dem Time-Sweep-Prüfverfahren wird das Ermüdungsverhalten von Bitumen mit Hilfe des DSR untersucht. Dabei wird ein Bitumenprobekörper bei einer konstanten Temperatur sowie einer definierten Frequenz solange einer vorgegebenen oszillierenden Spannung (spannungsgesteuerter Versuch) oder einer vorgegebenen oszillierenden Verformung (verschiebungsgesteuerter Versuch) ausgesetzt, bis ein Materialversagen eintritt oder ein Ermüdungskriterium erfüllt wird. Folglich wird der Bitumenprobekörper während des Time-Sweep-Tests in den meisten Fällen mit einer deutlich höheren Anzahl an Lastspielen beaufschlagt als während des Versuchs zur Ermittlung des Ermüdungsparameters $G^*\sin(\delta)$ gemäß PG-Grading System (siehe Abschnitt 2.1).

Aufgrund des Fehlens einer einheitlichen Prüfnorm für die Durchführung des Time-Sweep-Prüfverfahrens können die spezifischen Prüfparameter wie beispielsweise Prüftemperatur oderfrequenz nur in Anlehnung an unterschiedliche, sich mit diesem Prüfverfahren befassende Publikationen ausgewählt werden, welche sich teilweise zusätzlich noch hinsichtlich der gewählten Ermüdungskriterien unterscheiden [12],[32]-[34].

Bei vielen dieser Publikationen findet die Versuchsdurchführung bei relativ niedrigen Temperaturen, meist im Bereich zwischen 0 – 25°C statt, um zu Prüfbeginn einen hinreichend großen Initialwert für $|G^*|$ zu gewährleisten. Diese hohen Initialwerte für $|G^*|$ sind erforderlich um während der Prüfung hauptsächlich Schädigungen infolge Materialermüdung zu beschreiben und die Einflüsse aus den

sogenannten Kantenrissen zu minimieren, welche die Prüfergebnisse negativ beeinflussen können [33]. Die Prüffrequenz liegt bei vielen der Publikationen bei $f = 10$ Hz.

Als Bitumenprobekörper kommt in der Regel ein zylinderförmiges Bitumenplättchen mit einem Durchmesser von 8mm und einer Höhe von 2mm zur Anwendung.

Beim Time-Sweep-Prüfverfahren werden während der gesamten Prüfdauer die Verläufe des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ und des Phasenverschiebungswinkel δ aufgezeichnet. Die verfahrensbezogenen, analytischen Zusammenhänge zwischen den eingebrachten Spannungen bzw. Dehnungen und den abgeleiteten Werten für den Betrag des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ sowie den Phasenverschiebungswinkel δ werden in Abschnitt 1.3.2 beschrieben.

2.2.2 Vorteile des Prüfverfahrens

- + Probekörper kann einfach, schnell und kostengünstig hergestellt werden
- + Variable Einstellungsmöglichkeiten betreffend die Regelung von Temperatur, Frequenz und Art der Versuchsdurchführung (dehnungs- oder belastungsgesteuert)
- + Nachbildung einer praxisnahen Beanspruchung
- + Aus Versuchsdurchführung können bemessungsrelevante, physikalische Parameter (Komplexe Schubsteifigkeit, Phasenverschiebungswinkel) direkt ermittelt werden
- + Keine Beschränkung auf linear-viskoelastischen Bereich

2.2.3 Nachteile des Prüfverfahrens

- Teilweise Abhängigkeit der Prüfergebnisse von verwendeter Probekörpergeometrie [33]
- lange Versuchsdauer (oft mehrere Stunden pro Versuch)
- Bei geringen Beträgen des Initialwerts des komplexen Schubmoduls ($|G^*_{init}| < 15$ MPa) können Beeinflussungen der Prüfergebnisse durch Bildung von Kantenrissen auftreten [33].
- Bei Verwendung zylindrischer Probekörper kann bei sehr hohen Beträgen des Initialwerts des komplexen Schubmoduls ($|G^*_{init}| \gg \sim 100$ MPa) und in Kombination mit hohen Beanspruchungsfrequenzen (z.B. $f = 30$ Hz) Materialversagen an der Kontaktfläche zwischen dem Bitumenprobekörper und der oberen, oszillierenden DSR-Platte auftreten. Dadurch werden die Prüfergebnisse in Abhängigkeit der Ausbildung bzw. der Adhäsionsverhältnisse in der Kontaktfläche unzulässig beeinflusst [12].

2.3 Linear-Amplitude-Sweep Prüfverfahren (LAS) nach AASHTO TP101 [35]

2.3.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Die LAS-Prüfung dient zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Bitumenprobekörpern unter Verwendung des DSR. Gemäß der US-amerikanischen Richtlinie AASHTO TP101 [35] kommen als Probekörper zylindrische sowie RTFOT-kurzzeitgealterte Bitumenplättchen mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Höhe von 2 mm zum Einsatz. Die Versuchsdurchführung gemäß AASHTO TP101 [35] gliedert sich dabei in zwei Abschnitte:

- Der erste Prüfabschnitt dient zur Ermittlung des Materialverhaltens und der rheologischen Kennwerte des unbeschädigten Bitumenprobekörpers mittels einer verschiebungsgesteuerten Frequenz-Sweep-Prüfung im DSR. Dabei wird der Bitumenprobekörper bei einer konstanten Prüftemperatur mit einer oszillierenden Schubbeanspruchung beaufschlagt, welche eine konstante, betragsmäßig geringe Dehnungsamplitude von 0,1% zur Folge hat (verschiebungsgesteuert). Gemäß AASTHO TP101 [35] wird die Frequenz der eingebrachten oszillierenden Beanspruchung während dieses ersten Prüfabschnitts in zwölf definierten Frequenzstufen über einen Bereich von $f = 0,2 - 30$ Hz gesteigert (Frequenz-Sweep). Dabei werden der Betrag des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ sowie der Phasenverschiebungswinkel δ in Abhängigkeit der beaufschlagten Frequenz f aufgezeichnet (siehe Abbildung 4).

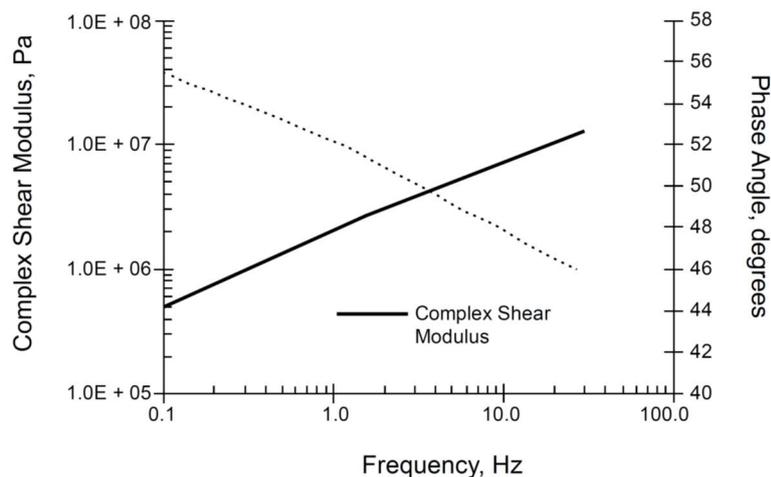


Abbildung 4: Resultat Abschnitt 1 - Frequenzabhängige Funktionsgraphen für $|G^*|$ und δ [35]

Bedingt durch die betragsmäßig geringe, eingebrachte Dehnungsstufe reagiert der Probekörper innerhalb des Bereichs des linear-viskoelastischen Materialverhaltens, was keine Schädigung des untersuchten Materials zur Folge hat. Aus den aufgezeichneten Funktionsgraphen lässt sich der Parameter α ermitteln, welcher später zur Bestimmung der Ermüdungskenngröße N_f benötigt wird. Hierzu wird aus den aufgezeichneten Werten für $|G^*|$, δ und f (bzw. die Kreisfrequenz ω) der zugehörige Speichermodul G' errechnet (siehe Gleichung (9)).

$$G'(\omega) = |G^*(\omega)| \cdot \cos \delta(\omega) \quad (9)$$

Der Verlauf des Speichermoduls G' wird anschließend näherungsweise durch Anlegen einer logarithmischen Gerade gemäß Gleichung (10) beschrieben.

$$\log G'(\omega) = m \cdot \log(\omega) + b \quad (10)$$

Der zur Bestimmung der Ermüdungskenngröße N_f erforderliche Parameter α entspricht gemäß Gleichung (11) dem Kehrwert des Steigungsparameters m aus vorangegangenen Gleichung (10).

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (11)$$

- Während des zweiten Prüfabschnitts wird der Bitumenprobekörper mit Hilfe des DSR einer verschiebungsgesteuerten Amplituden-Sweep-Prüfung unterzogen, die mit einer konstanten Frequenz von 10 Hz und bei einer konstanten, bereits für Prüfabschnitt 1 ausgewählten Prüftemperatur durchgeführt wird. Die Amplitude der dabei aufgebrachten Schub-Deformation wird innerhalb des Verlaufs von 3100 Lastzyklen linear von 0% auf 30% gesteigert. Die Maximalwerte der Schubdeformation γ_{\max} und der Schubspannung τ_{\max} werden sekundlich (entspricht alle 10 Lastzyklen) aufgezeichnet und daraus, wie in Abschnitt 1.3.2 beschrieben, der Betrag des komplexen Schubmoduls und der Phasenverschiebungswinkel abgeleitet [35].

Durch Anwendung des viskoelastischen Kontinuum-Schadensmodells (VECD) in Form der zugehörigen Formeln aus AASTHO TP101 [35], können gemeinsam mit dem α -Parameter aus dem 1. Prüfabschnitt (Frequenz-Sweep) und den Funktionsgraphen für $|G^*|$ und δ aus dem 2. Prüfabschnitt (Amplituden-Sweep), die Schadensakkumulation zum Versagenszeitpunkt D_f und im nächsten Schritt die beiden Modellparameter A und B (siehe Gleichung (12) und Gleichung (13)) ermittelt werden.

$$A = \frac{f \cdot (D_f)^k}{k \cdot (\pi \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha} \quad (12)$$

$$B = 2 \cdot \alpha \quad (13)$$

Mit:

- f im zweiten Prüfschritt aufgebrachte Frequenz (f = 10 Hz)
- D_f Schadensakkumulation zum Versagenszeitpunkt
- k = $1 + (1 - C_2) \cdot \alpha$ (14)
- C_1, C_2 Ermüdungskoeffizienten gemäß AASTHO TP101-5

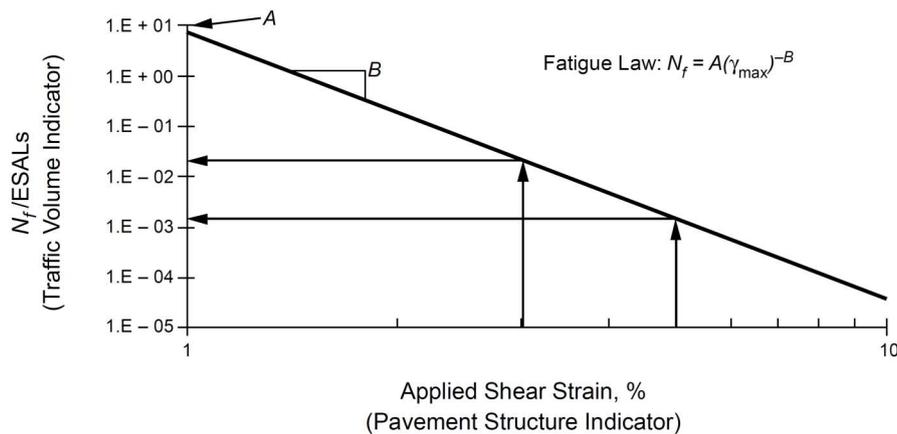
Mithilfe der Parameter A und B kann in weiterer Folge das Ermüdungsgesetz aus Gleichung (15) angewendet werden:

$$N_f = A \cdot (\gamma_{\max})^{-B} \quad (15)$$

Mit:

- N_f Kenngröße für Widerstand gegen Ermüdung
- A, B Modellparameter aus Anwendung des viskoelastischen Kontinuum-Schadensmodells
- γ_{\max} Maximal zu erwartende Schubdeformation im Bitumen einer gegebenen Asphaltstruktur

Durch Anwendung von Gleichung (15) lässt sich eine lineare Korrelation zwischen der Kenngröße N_f für den Widerstand gegen Ermüdung und der erwartbaren Schubdeformation γ_{\max} in Form einer Geradengleichung, mit der initialen γ -Verschiebung A und dem Gefälle B, darstellen (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Funktionsgraph von N_f in Abhängigkeit von γ_{max} [35]

2.3.2 Vorteile des Prüfverfahrens

- + Probekörper kann einfach, schnell und kostengünstig hergestellt werden
- + Variable Einstellungsmöglichkeiten betreffend die Regelung von Temperatur
- + Aus Versuchsdurchführung können bemessungsrelevante, physikalische Parameter (Komplexe Schubsteifigkeit, Phasenverschiebungswinkel) direkt ermittelt werden
- + Sehr rasche Versuchsdurchführung (ca. 15 min/Versuch)
- + Gute Korrelation zwischen Ergebnissen aus LAS-Prüfungen mit Daten zum Ermüdungsverhalten aus Langzeituntersuchungen an Versuchsstrecken [36].

2.3.3 Nachteile des Prüfverfahrens

- Ergebnisse von LAS-Prüfungen weisen nur geringe Korrelation mit den Ergebnissen aus vergleichenden VECD-modellierten-Ermüdungsprüfungen auf [24].
- Keine Nachbildung einer praxisnahen Beanspruchung

2.4 Multiple Stress Creep and Recovery Test (Kriechtest - MSCRT) – nach ÖNORM EN 16659 [37]

2.4.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Das Multiple Stress Creep and Recovery-Prüfverfahren (MSCR-Test) stellt einen mehrstufigen Kriech-Erholungsversuch dar mit dessen Hilfe die Rückformung und die Nachgiebigkeit von Bitumenprobekörpern, unter Verwendung des DSR, ermittelt werden können [37]. Obwohl das MSCR-Prüfverfahren hauptsächlich für die Beschreibung des Widerstands von Bitumenprobekörpern gegen plastische Verformungen bei hohen Temperaturen (Spurrinnenbildung) angewendet wird, gibt es erste Untersuchungen bezüglich der Verwendung dieses Verfahrens zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Bitumen. Beispielsweise wird in [24] geprüft ob der MSCR-Kennwert für die Rückformung als Parameter verwendet werden kann, um die zeitverzögerte, elastische Antwort von Bitumen zu beschreiben.

Während der Versuchsdurchführung wird der Bitumenprobekörper abwechselnd einer kurzzeitigen Schubbeanspruchung (Dauer $t = 1,0$ s) und einer nachfolgenden Erholungsphase (Dauer $t = 9,0$ s) ausgesetzt, wobei dieser Vorgang für jedes gewählte Spannungsniveau insgesamt zehn Mal (also 10 Be- und Entlastungszyklen) durchgeführt wird (siehe Abbildung 6 – 10 Lastzyklen).

Die für das jeweilige Spannungsniveau ermittelte Rückformung gibt Aufschluss über die elastische Materialantwort des Probekörpers und die ebenfalls für jede Spannungsstufe ermittelte Nachgiebigkeit beschreibt die Empfindlichkeit des Bitumenprobekörpers hinsichtlich bleibender Verformungen unter wiederholter Belastung [37].

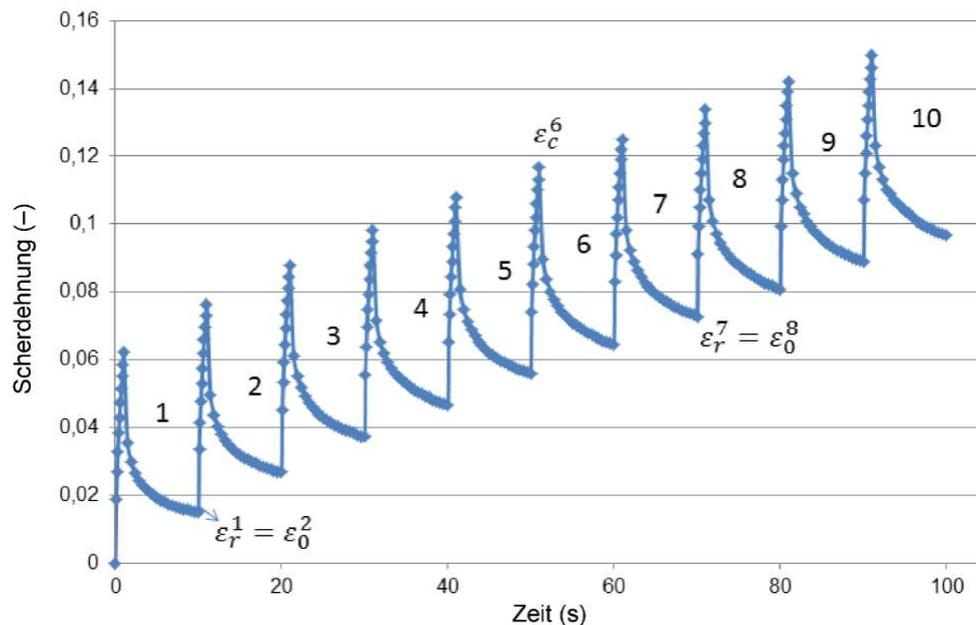


Abbildung 6: Exemplarische Kriech-Erholungskurve für 10 aufeinanderfolgende Lastzyklen [37]

Die MSCR-Prüfung gemäß ÖNORM EN 16659 [37] erfolgt bei einer konstanten Prüftemperatur, welche entweder 50°C, 60°C, 70°C oder 80°C betragen muss. Dabei wird innerhalb der ersten 10 Lastzyklen (d.h. 10 Last-/Erholungszyklen) ein Kriechspannungsniveau von $\sigma = 0,1$ kPa und innerhalb der darauffolgenden 10 Lastzyklen ein Spannungsniveau von $\sigma = 3,2$ kPa aufgebracht (siehe Abbildung 6). Als Probekörper kommt jeweils ein Bitumenplättchen mit einem Durchmesser von 25mm und einer Dicke von 1mm zur Anwendung.

Während der Versuchsdurchführung wird in geringen Zeitabständen der Spannungs- und Dehnungsverlauf des Probekörpers aufgezeichnet. Die dabei ermittelte Gesamtdehnung ϵ_{ges} pro Lastzyklus gliedert sich jeweils in einen elastischen bzw. rückformbaren Verformungsanteil ϵ_{el} und in einen bleibenden bzw. nicht rückformbaren Verformungsanteil ϵ_{pl} [37].

Der Kennwert der elastische Rückformung gemäß Gleichung (16) stellt für jeden Lastzyklus das Verhältnis des elastischen Verformungsanteils ϵ_{el} zur Gesamtdehnung ϵ_{ges} dar und ist ein Maß für die elastischen Verformungseigenschaften des Bitumenprobekörpers (siehe Abbildung 7) [37]:

$$\text{Rückformung} = \frac{\text{elastische Dehnung}}{\text{Gesamtdehnung}} = \frac{\varepsilon_{el}^N}{\varepsilon_{ges}^N} \cdot 100 \quad (16)$$

Bei der Berechnung des Kennwerts der elastischen Rückformung gemäß ÖNORM EN 16659 [37] wird zunächst für jeden Zyklus N die 0,1%-prozentige Rückformung $\%R_{\sigma}^N$, getrennt nach dem jeweiligen Kriechspannungsniveau $\sigma = 0,1\text{kPa}$ bzw. $3,2\text{kPa}$, ermittelt (siehe Gleichung (17)):

$$\%R_{0,1\text{kPa}}^N \text{ bzw. } \%R_{3,2\text{kPa}}^N = \frac{\varepsilon_{el}^N}{\varepsilon_{ges}^N} \cdot 100 = \frac{\varepsilon_1^N - \varepsilon_{10}^N}{\varepsilon_1^N} \cdot 100 \quad (17)$$

Mit:

$\%R_{0,1\text{kPa}}^N$ Rückformung bei Zyklus N infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 0,1\text{ kPa}$ in $[0,1\%]$

$\%R_{3,2\text{kPa}}^N$ Rückformung bei Zyklus N infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 3,2\text{ kPa}$ in $[0,1\%]$

ε_{el}^N der am Ende eines Zyklus N ermittelte elastische Dehnungsanteil

ε_{ges}^N der am Ende eines Zyklus N ermittelte gesamte Dehnungswert

ε_1^N der am Ende der Kriechphase eines Zyklus N (d.h. nach 1,0 s) ermittelte Dehnungswert

ε_{10}^N der am Ende der Erholungsphase eines Zyklus N (d.h. nach 10,0 s) ermittelte Dehnungswert

Im nächsten Schritt (siehe Gleichung (18) und Gleichung (19)) werden die ermittelten Rückformungen pro Zyklus $\%R_{\sigma}^N$ innerhalb des jeweiligen Spannungsniveaus σ aufsummiert und daraus ein Mittelwert für die durchschnittliche Rückformung $\%R_{\sigma}$ gebildet:

$$\%R_{0,1\text{kPa}} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{N=1}^{10} \%R_{0,1\text{kPa}}^N \quad (18)$$

$$\%R_{3,2\text{kPa}} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{N=1}^{10} \%R_{3,2\text{kPa}}^N \quad (19)$$

Mit:

$\%R_{0,1\text{kPa}}$ Durchschnittliche Rückformung infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 0,1\text{ kPa}$ in $[0,1\%]$

$\%R_{3,2\text{kPa}}$ Durchschnittliche Rückformung infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 3,2\text{ kPa}$ in $[0,1\%]$

Die Differenz zwischen den durchschnittlichen Rückformungen $\%R_{0,1\text{kPa}}$ und $\%R_{3,2\text{kPa}}$ errechnet sich gemäß Gleichung (20) zu:

$$R_{diff} = 100 \cdot \frac{\%R_{0,1\text{kPa}} - \%R_{3,2\text{kPa}}}{\%R_{0,1\text{kPa}}} \quad (20)$$

Durch den Vergleich von Ergebnissen für die Rückstellung aus unterschiedlichen Kriechspannungsniveaus können Rückschlüsse auf das spannungsabhängige Verhalten der untersuchten Bitumensorte gezogen werden [37].

Gemäß Gleichung (21) errechnet sich der Kennwert der Nachgiebigkeit für jeden Lastzyklus aus dem Verhältnis des nicht rückformbaren Verformungsanteils ε_{pl} zur aufgetragenen Belastung σ und lässt

dadurch Rückschlüsse hinsichtlich des Widerstands des Bitumenprobekörpers gegen bleibende Verformungen zu (siehe Abbildung 7):

$$\text{Nachgiebigkeit} = \frac{\text{bleibende Dehnung}}{\text{aufgebrachte Belastung}} = \frac{\varepsilon_{pl}^N}{\sigma} \quad (21)$$

Bei der Berechnung des Kennwerts der Nachgiebigkeit gemäß ÖNORM EN 16659 [37] wird zunächst für jeden Zyklus N die Nachgiebigkeit $J_{nr\sigma}^N$, getrennt nach dem jeweiligen Kriechspannungsniveau σ , ermittelt (siehe Gleichung (22)):

$$J_{nr0,1kPa}^N \text{ bzw. } J_{nr3,2kPa}^N = \frac{\varepsilon_{pl}^N}{\sigma} = \frac{\varepsilon_{10}^N}{\sigma} \quad (22)$$

Mit:

$J_{nr0,1kPa}^N$ Nachgiebigkeit bei Zyklus N infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 0,1$ kPa in $[\text{kPa}^{-1}]$

$J_{nr3,2kPa}^N$ Nachgiebigkeit bei Zyklus N infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 3,2$ kPa in $[\text{kPa}^{-1}]$

ε_{10}^N der am Ende der Erholungsphase jedes Zyklus N (d.h. nach 10,0 s) ermittelte Dehnungswert

σ eingebrachtes Kriechspannungsniveau

Im nächsten Schritt werden gemäß Gleichung (23) und Gleichung (24) die ermittelten Nachgiebigkeiten pro Zyklus $J_{nr\sigma}^N$ innerhalb des jeweiligen Spannungsniveaus σ aufsummiert und daraus ein Mittelwert für die durchschnittliche Rückformung $J_{nr\sigma}$ gebildet:

$$J_{nr0,1kPa} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{N=1}^{10} J_{nr0,1kPa}^N \quad (23)$$

$$J_{nr3,2kPa} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{N=1}^{10} J_{nr3,2kPa}^N \quad (24)$$

Mit:

$J_{nr0,1kPa}$ Durchschnittliche Nachgiebigkeit infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 0,1$ kPa in $[\text{kPa}^{-1}]$

$J_{nr3,2kPa}$ Durchschnittliche Nachgiebigkeit infolge Kriechspannungsniveau von $\sigma = 3,2$ kPa in $[\text{kPa}^{-1}]$

Die Differenz zwischen den durchschnittlichen Nachgiebigkeiten $J_{nr0,1kPa}$ und $J_{nr3,2kPa}$ errechnet sich gemäß Gleichung (25) zu:

$$J_{nr-diff} = 100 \cdot \frac{J_{nr3,2kPa} - J_{nr0,1kPa}}{J_{nr0,1kPa}} \quad (25)$$

Durch den Vergleich von Ergebnissen für die Nachgiebigkeit aus unterschiedlichen Kriechspannungsniveaus können Rückschlüsse auf das spannungsabhängige Verhalten der untersuchten Bitumensorte gezogen werden [37].

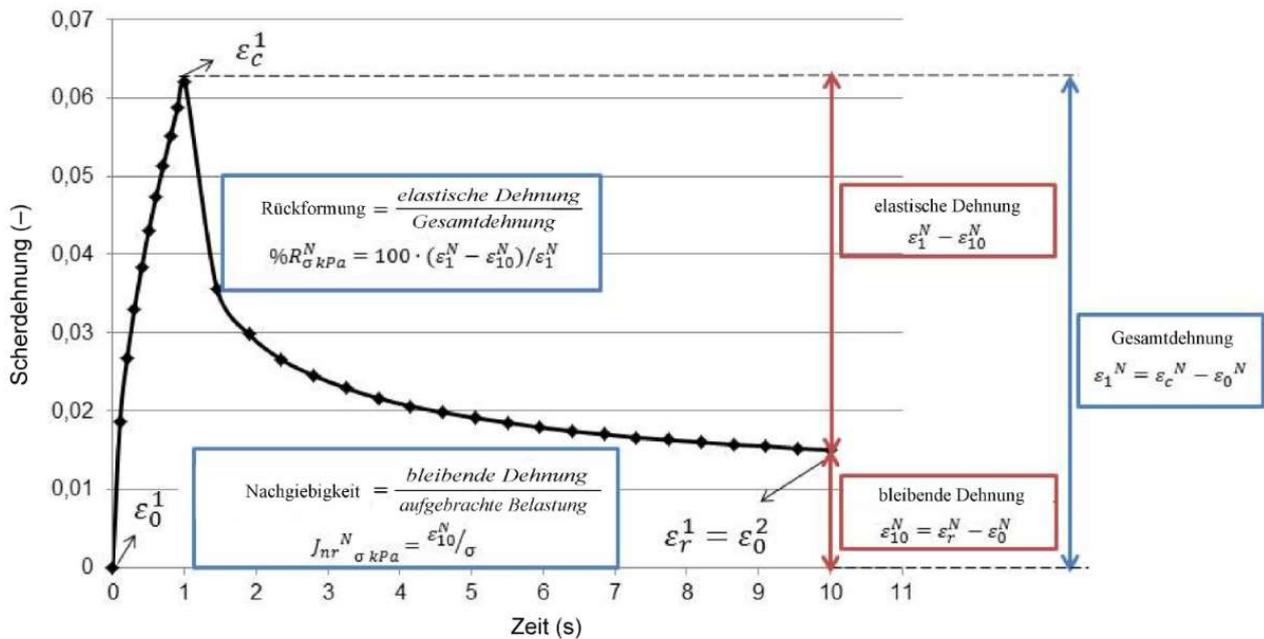


Abbildung 7: Ermittlung Nachgiebigkeit und Rückformung innerhalb eines Lastzyklus [37]

Beide Kennwerte werden innerhalb einer Spannungsstufe ermittelt. Dadurch können durch Vergleich der Ergebnisse aus unterschiedlichen Spannungsniveaus das spannungsabhängige Verhalten der untersuchten Bitumensorte untersucht werden [37].

Für die Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Bitumenprobekörpern soll der Kennwert der elastischen Rückformung dienen, welche ein Maß für die (zeitverzögerte) elastische Antwort des Bitumens darstellt. In der Forschung [24] wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender elastischer Rückformung auch der Widerstand des untersuchten Bitumenprobekörpers gegen Materialermüdung zunimmt.

In ÖNORM EN 16659 [37] werden aktuell noch keine Grenzwerte für die Nachgiebigkeit und die Rückstellung definiert. Speziell für die Anwendbarkeit des MSCR-Prüfverfahrens zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens bituminöser Probekörper müssen daher noch weitere Untersuchungen, vor allem für niedrigere Prüftemperaturen, erfolgen, um daraus entsprechende Grenzwerte zur Beschreibung von Materialermüdung ableiten und definieren zu können.

2.4.2 Vorteile des Prüfverfahrens

- + Verhältnismäßig rasche Versuchsdurchführung
- + Probekörper kann einfach, schnell und kostengünstig hergestellt werden
- + Variable Einstellungsmöglichkeiten betreffend die Regelung von Temperatur
- + Nachbildung einer praxisnahen Beanspruchung

2.4.3 Nachteile des Prüfverfahrens

- In der zugehörigen ÖNORM EN 16659 [37] werden für das MSCR-Prüfverfahren, hinsichtlich des Widerstands gegen Materialermüdung von Bitumen, aktuell noch keine Grenzwerte für Nachgiebigkeit und Rückstellung definiert.

- Geringe Anzahl an Untersuchungen betreffend die Verwendung des MSCR-Prüfverfahrens zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Bitumen
- Schlechte Korrelation zwischen Ergebnissen für Materialermüdung von Bitumen aus MSCR-Prüfverfahren mit jenen aus VECD-modellierten Ermüdungsprüfungen [24].
- Ermüdungsversagen tritt meist bei niedrigeren Temperaturen ($\sim 25^\circ\text{C}$) auf, welche unterhalb des typischen Prüftemperaturbereich des MSCR-Prüfverfahrens liegen

2.5 Zugversuch am zweiseitig gekerbten Bitumenstreifen (DENT) - nach MTO LS-299 [38]

2.5.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Beim DENT-Test werden definierte und an zwei Seiten eingekerbte sowie RTFOT und PAV gealterte Bitumenstreifen bei einer definierten Temperatur solange einer einaxialen Zugbeanspruchung mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit ausgesetzt bis im eingekerbten Querschnittsbereich ein Materialversagen auftritt. Während des Zugversuchs werden die aufgebrachte Kraft P und die Verformung d des Bitumenstreifens aufgezeichnet. Für jeden Bitumentyp muss dieser Versuch 3x durchgeführt werden, wobei die Bitumenprobekörper für jeden dieser drei Versuche eine unterschiedliche aber genormte Länge der Einkerbung L aufweisen müssen [38].

Die infolge der Zugbeanspruchung auftretende Normalspannung in dem jeweiligen Bitumenprobestreifen lässt sich gemäß Gleichung (26) für jeden Zeitpunkt als Verhältnis der aufgebrachten Kraft P zur Querschnittsfläche des Streifens A ermitteln:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (26)$$

Die zugehörige Dehnung ε wird gemäß Gleichung (27) aus der Längenänderung d mit Bezug auf die ursprüngliche Länge des Probestreifens L_0 ermittelt:

$$\varepsilon = \frac{d}{L_0} \quad (27)$$

Der Verläufe der ermittelten Spannungen und Dehnungen werden anschließend in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm gegenübergestellt.

Nach dem Versagenseintritt wird für jeden Bitumenprobestreifen der Gesamtwert der bis zum Versagen geleisteten mech. Arbeit W_t gemäß Gleichung (28) ermittelt. Dieser Wert entspricht dabei der Fläche unterhalb des Funktionsgraphen im zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

$$W_t = \int_0^{t_{crack}} P \cdot d \, dt \quad (28)$$

Im Anschluss wird mittels Division durch das Produkt aus der Kerblänge L und der Querschnittsdicke B des jeweiligen Bitumenprobestreifens eine spezifische Gesamtversagensarbeit w_t ermittelt (siehe Gleichung (29)).

$$w_t = \frac{W_t}{L \cdot B} \quad (29)$$

Die errechneten Werte für die spezifische Gesamtarbeit w_t werden gemeinsam mit den zugehörigen Kerblänge L in einem w_t - L -Diagramm aufgetragen. Mit Hilfe dieses Diagramms kann eine möglichst passende Korrelation zwischen w_t und L in Form eines linearen Funktionsgraphen ermittelt werden. Mit Hilfe dieses Funktionsgraphen können im Anschluss Werte für die spezifische elastische Versagensarbeit w_e und für den Term βw_p ermittelt werden.

Die spezifische elastische Versagensarbeit w_e entspricht dem Wert des Funktionsgraphen von w_t bei einer Kerblänge von $L=0\text{m}$. Diese Arbeit beschreibt jene Energie die erforderlich ist um eine dünne Bitumenfaser, welche Teil eines eingebauten Asphaltbetonverbunds ist, auf eine duktile Art und Weise aufzutrennen bzw. aufzureißen.

Der Term βw_p beschreibt die plastischen, dissipativen Verformungen im Bitumen und entspricht der Steigung des Funktionsgraphen gemäß folgender Gleichung (30):

$$w_t = w_e + \beta \cdot w_p \cdot L \quad (30)$$

Im letzten Schritt wird durch das Verhältnis der spezifischen elastischen Versagensarbeit w_e zu der Netto-Querschnittsspannung des Bitumenprobestreifens mit der kürzesten Länge $\sigma_{nt,5\text{mm}}$ die kritische Rissbreitenaufweitung CTOD gemäß Gleichung (31) näherungsweise ermittelt.

$$CTOD = \frac{w_e}{\sigma_{nt,5\text{mm}}} \quad (31)$$

Die kritische Rissbreitenaufweitung CTOD liefert eine näherungsweise Beschreibung der Verformungsverträglichkeit von Bitumen im duktilen/elastischen Bereich infolge starker Zugbeanspruchung. Mit dem Prüfverfahren an sich und mittels der Auswertung eines CTOD-Werts wird also beschrieben wie stark sich dünne bituminöse Fasern zwischen den Zuschlägen im Asphaltbeton auf Zug beanspruchen lassen, bis Materialversagen in den Fasern eintritt [39].

Durch weiterführende Untersuchungen wurde eine Korrelation zwischen der kritischen Rissbreitenaufweitung CTOD und dem Widerstand gegen Ermüdungsrissbildung von Bitumen festgestellt. Bei der Verwendung von Bitumensorten, welche sich bei Vorhandensein einer starken Zwangsbeanspruchung besser ausdehnen können (also einen größeren CTOD-Wert besitzen), traten im untersuchten Asphalt weniger Ermüdungserscheinungen auf [39].

2.5.2 Vorteile des Prüfverfahrens

- + Gemäß Untersuchungen der US-amerikanischen Federal Highway Administration gute Korrelationen zwischen den Ergebnissen aus DENT-Prüfungen von Bitumen, welches in einer Teststrecke verwendetet wurde, und der beobachteten Ermüdungsrissbildung an dieser Teststrecke [40].
- + Im Zuge von Vergleichsuntersuchungen gute Korrelation zwischen Ergebnissen aus DENT-Prüfungen und Ergebnissen aus vergleichenden VECD-modellierten Ermüdungsprüfungen festgestellt [24].
- + Probekörper kann einfach, schnell und kostengünstig hergestellt werden
- + Verhältnismäßig rasche Versuchsdurchführung

2.5.3 Nachteile des Prüfverfahrens

- Potenzial des Prüfverfahrens noch nicht ausgenutzt. In Richtlinien bisher ausschließlich ein einziger Grenzwert für die maximal zulässige, kritische Risspitzenaufweitung (CTOD) festgelegt. Andere ebenfalls ermittelte Parameter, wie Anteil der elastischen bzw. plastischen Arbeit, finden derzeit praktisch noch keine Anwendung [41].
- Bei instabiler Struktur des Bitumens bildet der CTOD-Wert bzw. der Term der elastischen Arbeit die auftretenden Verformungen nur unzureichend ab [41].
- In europäischen Ländern aktuell noch wenig Praxisrelevanz und daher wenig Erfahrung mit Prüfverfahren.
- Im Vergleich zu Prüfungen am DSR größere Mengen an Probenmaterial notwendig
- Spezielles Prüfgerät notwendig

3 Ausgewählte Prüfmethoden zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens auf Asphaltmastix-/Asphalteebene

3.1 Dynamisch-mechanische Analyseprüfung (DMA)

3.1.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Die dynamisch-mechanische Analyseprüfung ist ein Verfahren, welches in unterschiedlichsten Bereichen (z.B. Chemie, Medizin, etc.) dazu angewandt wird, das Materialverhalten von hauptsächlich viskoelastischen Materialien zu beschreiben. Weiters findet dieses Verfahren auch zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von bituminösen Materialkompositionen seine Anwendung. Beispielsweise verwendete Kim et al. [42] die DMA-Prüfung zur Beschreibung bzw. Modellierung des Ermüdungsverhaltens von Probekörpern aus einem Bitumen-Sand-Gemisch sowie Castelo Branco et al. [43] zur Untersuchung einer, von der Belastungsart unabhängigen Ermüdungscharakterisierung von Asphalt.

Das DMA-Prüfgerät ähnelt hinsichtlich seines Aufbaus und seiner Prüfcharakteristik stark dem dynamischen Scherrheometer (DSR). Aufgrund seiner, im Vergleich zum DSR größeren Gerätedimensionen kann mit Hilfe des DMA-Prüfgeräts das Ermüdungsverhalten von zylindrischen Asphalt- bzw. Asphaltmastixprobekörpern mit verhältnismäßig großen Abmessungen (z.B. typische Probekörperabmessungen Höhe x Durchmesser = 50 x 12 mm) geprüft werden.

Aufgrund der flexiblen Einstellungsmöglichkeiten am Prüfgerät können mit dem DMA-Prüfverfahren, ähnlich wie bei der Verwendung eines DSR, unterschiedliche Prüfansätze verfolgt werden. Häufig wird der Probekörper zwischen zwei Platten fixiert und bei einer konstanten Prüftemperatur bzw. Prüffrequenz oder innerhalb eines vorgegebenen Temperatur- bzw. Frequenzbereichs einer vorgegebenen Schubbeanspruchung (spannungsgesteuert) oder einer vorgegebenen Dehnung (dehnungsgesteuert) ausgesetzt.

Beim DMA-Prüfverfahren werden während der gesamten Prüfdauer die Verläufe des komplexen Schubmoduls $[G^*]$ und des Phasenverschiebungswinkel δ aufgezeichnet. Die verfahrensbezogenen, analytischen Zusammenhänge zwischen den eingebrachten Spannungen bzw. Dehnungen und den abgeleiteten Werten für den Betrag des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ und den Phasenverschiebungswinkel δ sind dabei identisch zu jenen des DSR, die in den Abschnitt 1.3.2 beschrieben werden.

3.1.2 Vorteile des Prüfverfahrens

- + Variable Einstellungsmöglichkeiten betreffend die Regelung von Temperatur, Frequenz, Art der Versuchsdurchführung (dehnungs- oder belastungsgesteuert), usw.
- + Direkte Prüfung von Probekörpern aus Asphalt- bzw. Asphaltmastix möglich
- + Nachbildung einer praxisnahen Beanspruchung
- + Aus Versuchsdurchführung können bemessungsrelevante, physikalische Parameter (Komplexe Schubsteifigkeit, Phasenverschiebungswinkel) direkt ermittelt werden

3.1.3 Nachteile des Prüfverfahrens

- Aufwendige Prüfkörperherstellung.

3.2 Vierpunkt-Biegebalken-Versuch am prismatischen Probekörper (4PB-PR) nach ÖNORM EN 12697-24 [44]

3.2.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Der 4-Punkt-Biegebalken-Versuch am prismatischen Probekörper (4PB-PR) wird unter anderem dazu verwendet das Ermüdungsverhalten von prismatischen Asphaltprobekörpern mit definierten Abmessungen zu beschreiben. Dazu wird der Probekörper bis zum Ermüdungseintritt, unter Anwendung des $G^*(50\%)$ -Ermüdungskriteriums gemäß Abschnitt 9.2.1, einer periodischen 4-Punkt-Biegebelastung unterzogen.

Gemäß ÖNORM EN 12697-24 [44] werden spezielle Ansprüche an die Probekörpergeometrie gestellt. So müssen die Breite B und die Höhe H des prismatischen Probekörpers mindestens das Dreifache der maximalen Korngröße der Gesteinskörnung D des verwendeten Asphaltmischguts betragen. An die Schlankheit des Probekörpers wird die Forderung gestellt, dass die Probekörperlänge L zwischen den beiden Außenklemmen mindestens das Sechsfache der Höchstwerte für B und H betragen muss.

Innerhalb der Prüfmaschine wird der jeweilige Probekörper symmetrisch zwischen vier Klemmen situiert. Die zwei Außen-Klemmen dienen als Endlager und müssen eine vertikale Verschiebung des Probekörpers verhindern. Die inneren beiden Klemmen dienen als Lastangriffspunkte, durch welche die sinusförmige Belastung längs und quer zur Längsachse des Probekörpers auf diesen übertragen wird. Infolge dieser Versuchsanordnung treten zwischen den beiden inneren Klemmen ein konstantes Biegemoment und eine konstante Dehnung auf.

Bei Durchführung der Prüfungen kann, neben der Prüftemperatur und der Prüffrequenz, zusätzlich noch zwischen zwei unterschiedlichen Belastungsarten gewählt werden. So kann der jeweilige Probekörper entweder mit einer konstanten Durchbiegung oder mit einer konstanten Last beaufschlagt werden.

Nach den ersten 100 Zyklen und in definierten Zeitabschnitten während der gesamten Prüfdauer werden die eingebrachte Last, die Durchbiegung und die Phasenverzögerung aufgezeichnet. Aus den ermittelten Parametern für den 100. Lastzyklus lässt sich in weiterer Folge die anfängliche Dehnungsamplitude sowie der Anfangswert des berechneten Moduls S_{mix} ermitteln.

Um das Ermüdungsverhalten der untersuchten Asphaltorte hinreichend genau beschreiben zu können, müssen mehrere Einzelprüfungen mit unterschiedlichen Spannungsniveaus bei gleichbleibender Frequenz und Temperatur durchgeführt und deren Ergebnisse in einer Ermüdungskurve zusammengefasst werden. Diese Ermüdungskurve beschreibt dann das Ermüdungsverhalten der geprüften Asphaltmischung für die gewählten Prüfparameter. Die Dauerhaftigkeiten müssen bei mindestens drei unterschiedlichen Laststufen und mit mindestens sechs Wiederholungen pro Laststufe ermittelt werden.

Aus den erhaltenen Wöhlerkurven lassen sich gemäß ÖNORM EN 12697-24 [44] folgende Werte berechnen:

- Stufe Q der 10^6 Lastzyklen entsprechenden Lastart-Prüfbedingung für die Dauerhaftigkeit entsprechend den gewählten Versagenskriterien
- Anstieg p der im doppellogarithmischen Koordinatensystem aufgetragenen Ermüdungskurve
- Schätzwert der Standardabweichung der Restverteilung der natürlichen Logarithmen der Dauerhaftigkeiten $S_{x/y}$

Aus diesen ermittelten Werten lassen sich die Zusammenhänge zwischen der Lebensdauer $\log(N_i)$ und der anfänglichen Dehnungsamplitude $\log(\varepsilon_i)$ gemäß Gleichung (32) beschreiben:

$$\log(N_i) = A_0 + A_1 \cdot \log(\varepsilon_i) \quad (32)$$

Mit:

Schätzwert von A_0 ermittelt aus Anstieg p

Schätzwert von A_1 ermittelt aus Q

3.2.2 Vorteile des Prüfverfahrens

- + Variable Einstellungsmöglichkeiten betreffend die Regelung von Temperatur und Frequenz
- + Nachbildung einer praxisnahen Beanspruchung
- + Aus Versuchsdurchführung können bemessungsrelevante, physikalische Parameter direkt ermittelt werden

3.2.3 Nachteile des Prüfverfahrens

- Sehr aufwendige Probekörperherstellung
- Sehr lange Versuchsdauer (oft mehrere Stunden bzw. Tage pro Versuch)
- Anpassung Probekörpergeometrie notwendig

4 Anwendbarkeit der Prüfverfahren zur Prüfung von Asphaltmastix

Die Anwendbarkeit der in Abschnitt 2 und 3 angeführten Prüfverfahren zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix wird in der nachfolgenden tabellarischen Übersicht (Tabelle 1) behandelt. Darin werden die Prüfverfahren hinsichtlich der Herstellung von Prüfkörpern aus Asphaltmastix und der Verfügbarkeit der notwendigen Prüfgerätschaften beschrieben. Weiters wird der verfahrensspezifische Anpassungsaufwand abgeschätzt, der erforderlich ist um die Mitwirkung des Füllers bzw. der Feianteile zu erfassen, welche deutliche Veränderungen im Materialverhalten von Asphaltmastix im Vergleich zu jenem von reinem Bitumen zur Folge haben. Abschließend wird die Anwendbarkeit des jeweiligen Prüfverfahrens, unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Charakteristiken und unter Einbeziehung der Aussagekraft der Prüfergebnisse, abgeschätzt.

Tabelle 1: Abschätzung der Anwendbarkeit der Prüfverfahren

Prüfverfahren	Herstellung von Prüfkörpern aus Asphaltmastix	Verfügbarkeit der notwendigen Prüfgerätschaften	Erforderliche Anpassung des Prüfverfahrens	Anwendbarkeit
PG-Grading	Einfache Herstellung mittels Gussformen. Geringe Mengen an Probenmaterial notwendig	DSR weit verbreitetes Prüfgerät	Einfache Anpassung durch Veränderung der Prüfparameter	Aufgrund eingeschränkter Aussagekraft von $G^* \sin \delta$ eher nicht geeignet
Time-Sweep	Einfache Herstellung mittels Gussformen. Geringe Mengen an Probenmaterial notwendig	DSR weit verbreitetes Prüfgerät	Einfache Anpassung durch Veränderung der Prüfparameter Eventuell spezielle Probekörpergeometrie notwendig	Potentiell sehr gute Eignung Weitere Untersuchungen sinnvoll
LAS	Einfache Herstellung mittels Gussformen. Geringe Mengen an Probenmaterial notwendig	DSR weit verbreitetes Prüfgerät	In engen Grenzen genormtes Prüfverfahren. Auswirkungen von geänderten Materialeigenschaften und Prüfparametern unklar Zusätzlicher Untersuchungsaufwand notwendig	Potentiell sehr gute Eignung Weitere Untersuchungen sinnvoll
MSCR	Einfache Herstellung mittels Gussformen. Geringe Mengen an	DSR weit verbreitetes Prüfgerät	Anpassung und Abstimmung der	Aktuell eher ungeeignet, da grundsätzliche Aussagekraft der

	Probenmaterial notwendig		Belastungs- und Entlastungsdauer Hoher zusätzlicher Untersuchungsaufwand notwendig	Nachgiebigkeit für Ermüdungsverhalten noch zu wenig untersucht wurde
DENT	Einfache Herstellung mittels Gussformen. Große Mengen an Probenmaterial notwendig	Adaptierung der Gerätschaften für direkten Zugversuch (DTT) Spezielle Prüfgeräte erforderlich	Einfache Anpassung durch Veränderung der Prüfparameter	Grundsätzlich geeignet. In Europa bisher jedoch nicht relevant
DMA	Komplizierte Herstellung von Probekörpern Sehr große Menge an Probenmaterial notwendig	DMA im Straßenbau weniger weit verbreitet als DSR	Einfache Anpassung durch Veränderung der Prüfparameter	Gute Eignung, wird bereits zur Ermüdungsprüfung von Asphaltmastix verwendet
4PBB	Komplizierte Herstellung von Asphaltmastixprobekörpern nicht sinnvoll	4PBB weniger weit verbreitete als DSR	Auswirkungen von geänderten Materialeigenschaften und Prüfparametern unklar Jedenfalls Anpassung bei Probekörpergeometrie notwendig	Eignung möglich Anpassung des Verfahrens infolge geänderter Probekörpergeometrie muss noch untersucht werden

5 Materialauswahl und Probekörpereigenschaften

5.1 Materialauswahl

Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wurden insgesamt drei unterschiedliche Mastixsorten hinsichtlich ihrer Ermüdungseigenschaften untersucht.

Als Füller wurde mit Kalksteinmehl und Quarzpulver zwei Materialien verwendet, welche in Österreich dem Asphaltmischgut häufig als Füller zugemischt (Kalksteinmehl) bzw. landläufig als ungünstiges Füllermaterial (Quarzpulver) beschrieben werden. Zusätzlich wurde eine Mastixsorte mit indischem Marmorpulver hergestellt, welches im Zuge der Marmorplattenherstellung in Indien als Abfall entsteht und als möglicher Füller seine Anwendung findet.

Zur Mischung der drei Mastixsorten wurde jeweils das im österreichischen Straßenbau häufig verwendete Bitumen 70/100 in ungealterter Form verwendet.

Im Zuge des Mischvorgangs wurden die jeweiligen Füller/Feinteile im Ofen bei 180°C in Gefäßen getrocknet und anschließend mit dem ebenfalls auf 180°C erwärmten Bitumen im Mischungsverhältnis Bitumen:Füller = 1:1,5 vermengt. Danach wurden die drei Mastixsorten solange mit einem Rührstabes verrührt, bis eine hinreichend homogene Vermischung der Mastix-Komponenten festzustellen war. Die anschließende Lagerung der Probenbehälter erfolgte im Kühlschrank bei Temperaturen von < 10°C.

Eine Übersicht über die Zusammensetzungen der einzelnen Mastixsorten ist in Tabelle 2 ersichtlich.

Tabelle 2: Zusammensetzung der zu untersuchenden Mastixsorten

Labor-Code	Bitumen		Masse	Füller/Feinanteile		Kornklasse	Masse
MX0037	B136A	OMV 70/100	200g	F099	Kalksteinmehl (Limberg)	0/0,125	300g
MX0038	B136A	OMV 70/100	200g	F041	Quarzpulver	0/0,125	300g
MX0039	B136A	OMV 70/100	133,3g	F151	Marmorpulver (Indien)	0/0,125	200g

5.2 Probekörpergeometrie

Bei Prüfverfahren zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix, die in einem DSR durchgeführt werden, finden hauptsächlich zylindrische Mastixprobekörper mit einem Durchmesser von $D = 8$ mm und einer Höhe von $H = 2$ mm ihre Anwendung.

Im Zuge einer Forschungsarbeit der TU Wien, betreffend die Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix [12], wurde eine hyperbolische Probekörpergeometrie entwickelt (siehe Abbildung 8 - links). Bedingt durch diese spezielle Probekörperform tritt Materialversagen infolge Ermüdung ausschließlich im Bereich des kleinsten Querschnitts in der Probekörpermitte ein (siehe Abbildung 8 rechts). Ein Adhäsions-Versagen an der Trennfläche zwischen der oszillierenden DSR-Platte und dem Probekörper, welches bei der

Verwendung von zylindrischen Probekörpern häufig auftrat und falsche Messergebnissen zur Folge hatte, kann formbedingt nicht mehr auftreten [12].

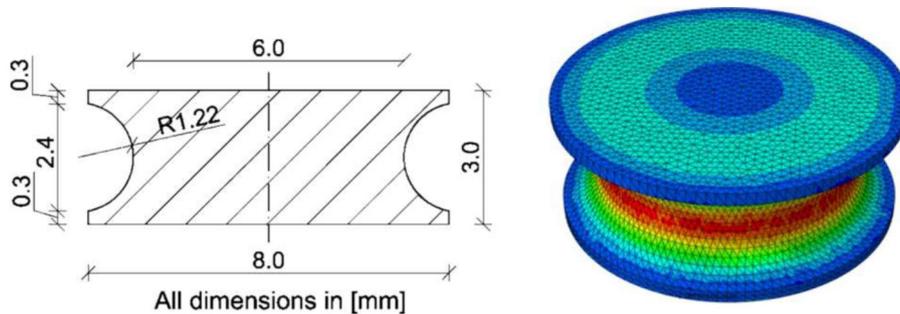


Abbildung 8: Hyperbolische Probekörpergeometrie (links) und definierter Versagensquerschnitt (rechts) [12]

In der gegenständlichen Arbeit wurden sämtliche untersuchte Prüfverfahren mit beiden Probekörperformen (zylindrisch und hyperbolisch) an der Platte-Platte-Prüfgeometrie PP08 durchgeführt. Die Prüfergebnisse und deren Korrelation in Abhängigkeit der jeweiligen Probekörperform werden in Abschnitt 10 und Abschnitt 11 erläutert.

5.3 Probekörperherstellung

5.3.1 Zylindrischer Probekörper

Die Herstellung der zylindrischen Probekörper erfolgt außerhalb des DSR-Geräts mithilfe von Silikongussformen (siehe Abbildung 9 links und Mitte). Dabei wird eine Mastixprobe aus dem jeweiligen Probebehälter entnommen, auf eine Temperatur von 180°C erwärmt und anschließend in diese Silikongussformen gegossen. Nach einer Abkühlzeit von ca. 10 min wird der zylindrische Probekörper in die DSR-Prüfvorrichtung eingebaut und anschließend getrimmt (siehe Abbildung 9 - rechts).



Abbildung 9: Links und Mitte: Silikongussform zur Herstellung zylindrischer Mastixprobekörper (ohne und mit hergestellten Probekörper); Rechts: in DSR eingebauter zylindrischer Probekörper, nach dem Trimmen

5.3.2 Hyperbolischer Probekörper

Die Herstellung hyperbolischer Probekörper erfolgt mithilfe spezieller Silikongussformen, die mit einem Gummiring gesichert (siehe Abbildung 10 links) und bereits vor der Probekörperherstellung auf der unteren, temperierten Platte des verwendeten DSR-Prüfgeräts eingebaut werden müssen (siehe Abbildung 10 Mitte). Im Anschluss wird die auf 180°C erhitzte Asphaltmastix mit einem geeigneten

Eingussgefäß in die eingebaute Silikonform gegossen, welche nach einer Abkühlung auf 10°C und einer anschließenden Wartezeit von 10min wieder aus der Prüfmaschine entnommen wird, bevor mit der Beanspruchung des Probekörpers begonnen werden kann (siehe Abbildung 10 rechts).



Abbildung 10: Links: Silikonform zur Herstellung hyperbolischer Mastixprobekörper; Mitte: Eingebaute Silikonform nach dem Einfüllvorgang; Rechts: in DSR eingebaute hyperbolischer Probekörper, nach Entfernung der Silikonform

6 Prüfgerät

Aufgrund der höheren initialen Steifigkeit von Asphaltmastix im Vergleich zu reinem Bitumen, werden an das verwendete DSR-Prüfgerät höhere Ansprüche notwendig. Beispielsweise muss es in der Lage sein eine betragsmäßig große Momentenbeanspruchung bereitzustellen und diese auch über mehrere Stunden aufrecht zu erhalten ohne dabei zu Überhitzen.

Für die durchgeführten Ermüdungsprüfungen wurden zwei baugleiche Geräte vom Typ MCR 302 der Fa. Anton Paar verwendet (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Verwendete Messgeräte – Anton Paar MCR302 BJ2012 (links) und Anton Paar MCR302 BJ2019 (rechts)

7 Bestimmung linear-viskoelastische Bereiche (LVE)

7.1 Allgemeines

In der gegenständlichen Arbeit wurde für jede der drei untersuchten Mastixsorten der linear-viskoelastische Bereich, sowohl für eine zylindrische als auch für eine hyperbolische Probekörpergeometrie, mittels durchgeführter Prüfungen im DSR, ermittelt. Die Auswertung dieser Versuche ist in den folgenden Abschnitten 7.2 bis 7.4 beschrieben. Betreffend die Grenzwertdefinitionen aus Abschnitt 1.3.3, wurde in dieser Auswertung jene aus der DIN 53019-4 [10] angewendet. Demnach endet der linear-viskoelastische Bereich bei jenem Punkt, an dem Betrag des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ auf 95% seines Ausgangswerts abgesunken ist.

7.2 Lineare Viskoelastizität zylindrischer Probekörper

In Abbildung 12 bis Abbildung 14 ist jeweils die Auswertung des linear-viskoelastischen Bereichs für eine zylindrische Probekörpergeometrie der drei untersuchten Mastixsorten MX0037, MX0038 und MX0039 ersichtlich. Dabei lässt sich erkennen, dass die Mastixsorte MX0037 mit einem komplexen Schubmodul von $|G^*| = 213,8$ MPa den ausgeprägtesten LVE-Bereich besitzt. An zweiter Stelle folgt die Mastixsorte MX0038 mit $|G^*| = 203,3$ MPa gefolgt von Mastixsorte MX0039 mit $|G^*| = 197,6$ MPa.

Weiters zeigen Abbildung 12 bis Abbildung 14, dass bei der Mastixsorte MX0039 das größte Verformungs- bzw. Spannungsniveau aufgebracht werden kann, ehe der $G^*(95\%)$ -Grenzwert des LVE-Bereichs erreicht wird. Dagegen erreicht MX0038 den $G^*(95\%)$ -Grenzwert bereits bei den geringsten Verformungs- bzw. Spannungsniveaus aller untersuchten Mastixsorten.

Eine Zusammenfassung der ermittelten LVE Kennwerte für zylindrische Probekörper ist in Tabelle 3 ersichtlich.

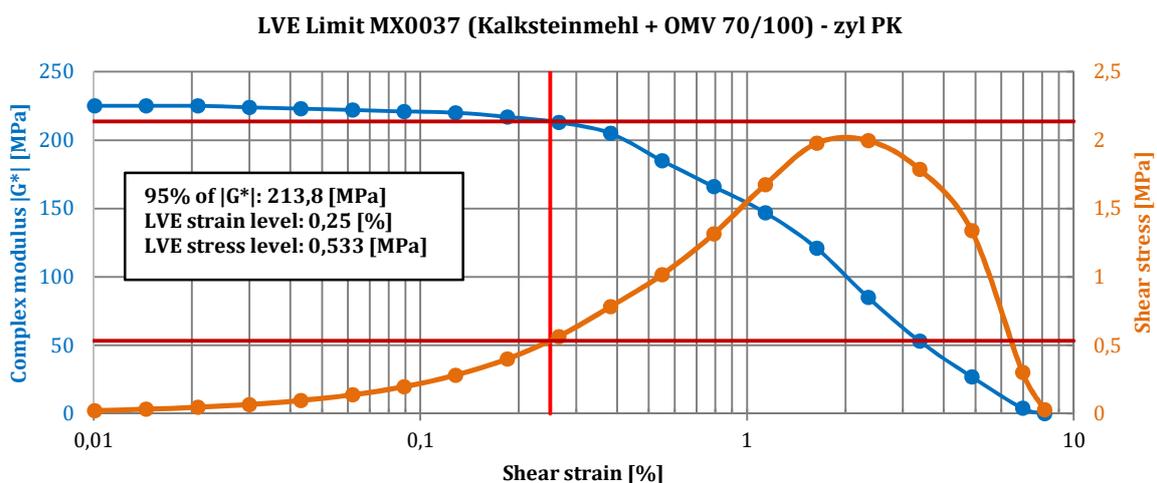


Abbildung 12: Lineare Viskoelastizität – MX0037 (zylindrischer Probekörper)

LVE MX0038 (Quarzpulver + OMV 70/100) - zyl PK

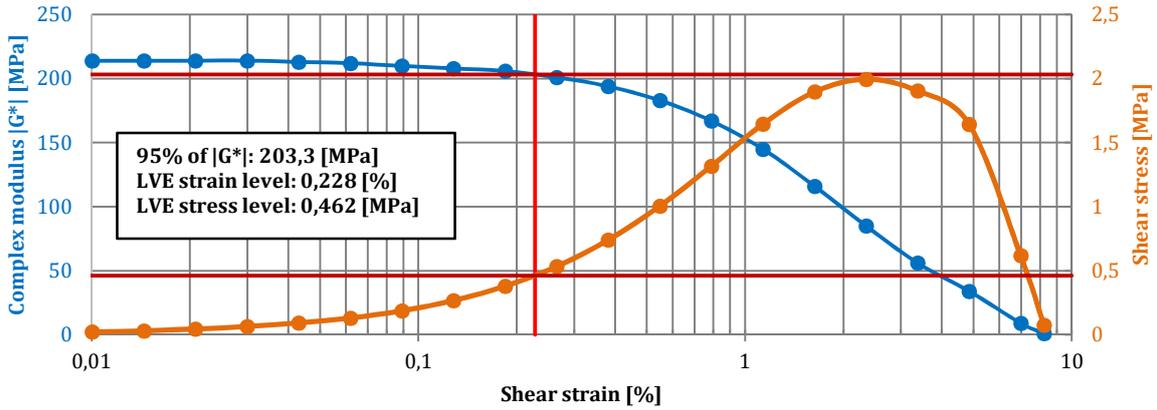


Abbildung 13: Lineare Viskoelastizität – MX0038 (zylindrischer Probekörper)

LVE MX0039 (Marmorpulver + OMV 70/100) - zyl PK

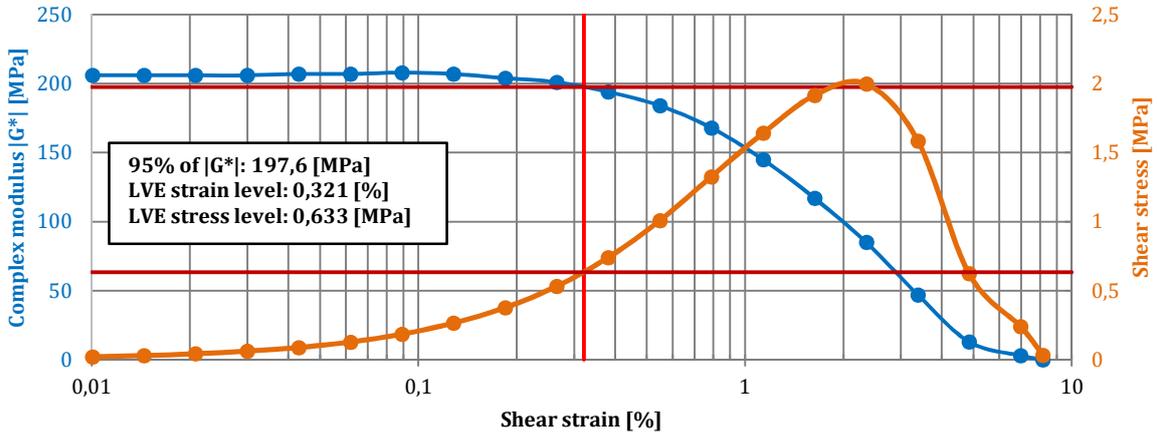


Abbildung 14: Lineare Viskoelastizität – MX0039 (zylindrischer Probekörper)

Tabelle 3: Auflistung der LVE Kennwerte für zylindrische Probekörpergeometrie

	MX0037 (Kalksteinmehl + OMV 70/100)	MX0038 (Quarzpulver + OMV 70/100)	MX0039 (Marmorpulver + OMV 70/100)
$ G^* $ (95%) in [MPa]	213,8	203,3	197,6
LVE Dehnungsniveau in [%]	0,25	0,228	0,321
LVE Spannungsniveau in [MPa]	0,533	0,462	0,633

7.3 Lineare Viskoelastizität hyperbolischer Probekörper

In Abbildung 15 bis Abbildung 17 sind die Auswertungen des linear-viskoelastischen Bereichs für die hyperbolische Probekörpergeometrie der drei untersuchten Mastixsorten MX0037, MX0038 und MX0039 ersichtlich. Dabei lässt sich erkennen, dass die Mastixsorte MX0039 mit einem komplexen Schubmodul von $|G^*| = 87,4$ MPa den ausgeprägtesten LVE-Bereich besitzt. An zweiter Stelle folgt die Mastixsorte MX0037 mit $|G^*| = 86,5$ MPa gefolgt von Mastixsorte MX0038 mit $|G^*| = 85,5$ MPa.

Weiters zeigen Abbildung 15 bis Abbildung 17, dass bei der Mastixsorte MX0037 das größte Verformungs- bzw. Spannungsniveau aufgebracht werden kann, ehe der $G^*(95\%)$ -Grenzwert des LVE-Bereichs erreicht wird. Dagegen erreicht MX0038 den $G^*(95\%)$ -Grenzwert bereits bei den geringsten Verformungs- bzw. Spannungsniveaus aller untersuchten Mastixsorten.

Eine Zusammenfassung der ermittelten LVE Kennwerte für hyperbolische Probekörper ist in Tabelle 4 ersichtlich.

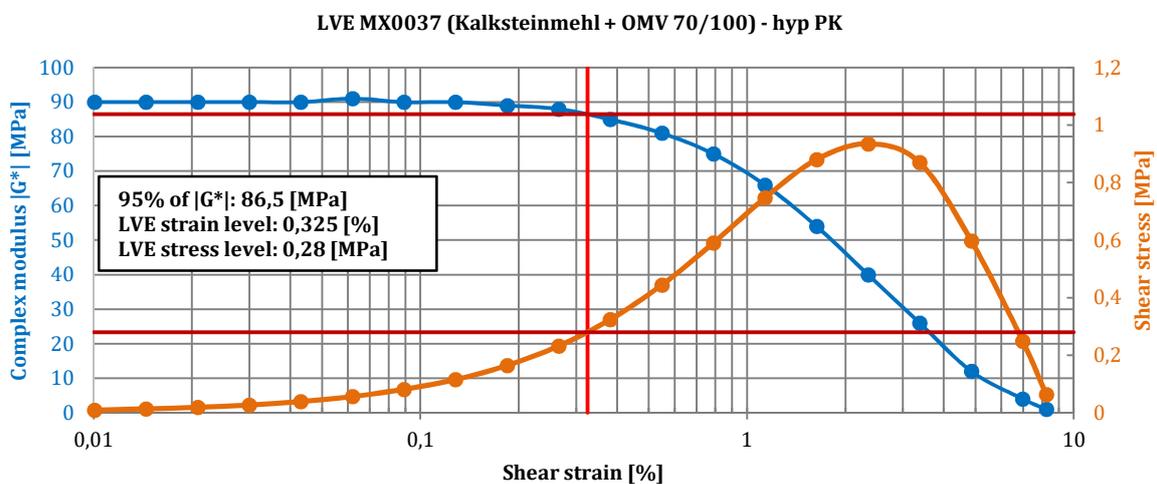


Abbildung 15: Lineare Viskoelastizität – MX0037 (hyperbolischer Probekörper)

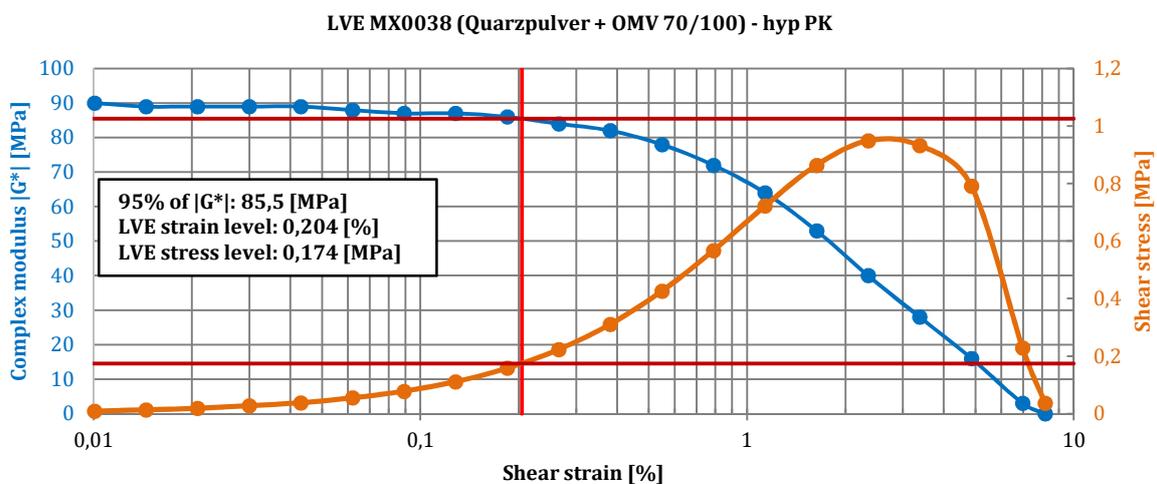


Abbildung 16: Lineare Viskoelastizität – MX0038 (hyperbolischer Probekörper)

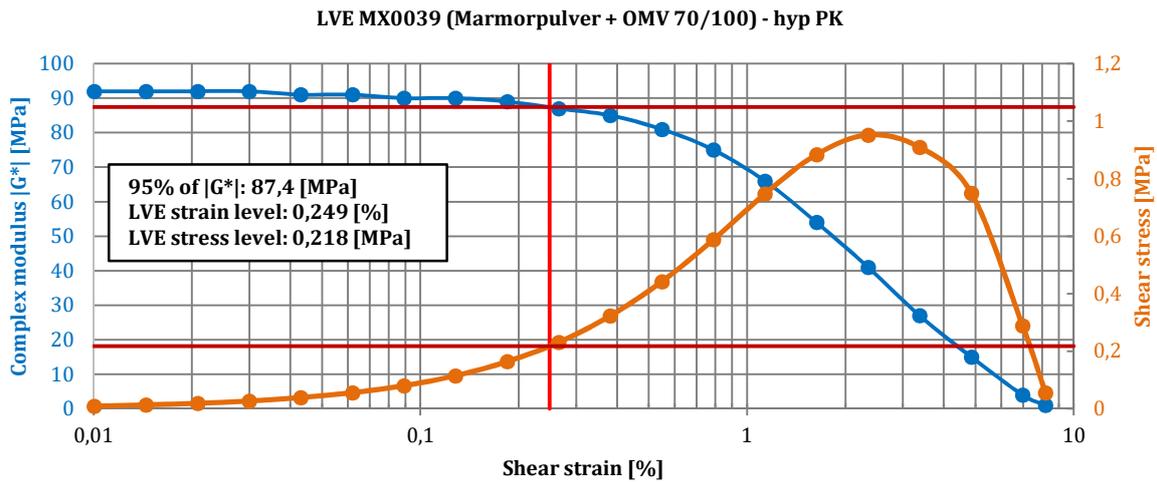


Abbildung 17: Lineare Viskoelastizität – MX0039 (hyperbolischer Probekörper)

Tabelle 4: Auflistung der LVE Kennwerte für hyperbolische Probekörpergeometrie

	MX0037 (Kalksteinmehl + OMV 70/100)	MX0038 (Quarzpulver + OMV 70/100)	MX0039 (Marmorpulver + OMV 70/100)
$ G^* $ (95%) in [MPa]	86,5	85,5	87,4
LVE Dehnungsniveau in [%]	0,325	0,204	0,249
LVE Spannungsniveau in [MPa]	0,280	0,174	0,218

7.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Beim Vergleich der LVE-Kennwerte der untersuchten Mastixsorten aus Abbildung 12 bis Abbildung 17 bzw. Tabelle 3 und Tabelle 4, lässt sich erkennen, dass die $G^*(95\%)$ -Grenzwerte der hyperbolischen Probekörpergeometrie betragsmäßig deutlich unter jenen der zylindrischen Probekörpergeometrie liegen. Dies lässt sich wiederum auf die geometriebedingt erhöhte Schubbeanspruchbarkeit der zylindrischen Probekörpergeometrie zurückführen.

Im Gegensatz zu den $G^*(95\%)$ -Grenzwerten liegen die Beträge der maximal aufzubringenden Verformungs- bzw. Spannungsniveaus von zylindrischen und hyperbolischen Probekörpern erwartungsgemäß in derselben Größenordnung.

Der Vergleich der ermittelten LVE Kennwerte innerhalb der drei untersuchten Mastixsorten weist jedoch Abweichungen im jeweiligen Ranking zwischen zylindrischer und hyperbolischer Probekörpergeometrie auf (siehe Tabelle 5). Dies lässt eine mangelnde Anwendbarkeit des durchgeführten Verfahrens zur Ermittlung von LVE-Kennwerte hyperbolischer Probekörper vermuten.

Tabelle 5: Vergleich der LVE-Kennwerte

Probekörper- geometrie	MX0037 (Kalksteinmehl + OMV 70/100)		MX0038 (Quarzpulver + OMV 70/100)		MX0039 (Marmorpulver + OMV 70/100)	
	ZYL	HYP	ZYL	HYP	ZYL	HYP
$ G^* $ (95%) in [MPa]	+	○	○	-	-	+
LVE Verformungs- niveau in [%]	○	+	-	-	+	○
LVE Spannungs- niveau in [MPa]	○	+	-	-	+	○
Legende: + = höchster Wert, ○ = zweithöchster Wert, - = niedrigster Wert						

8 Angewendete Prüfverfahren zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix

Aus den Abschnitten 2 und 3 wurden die folgenden drei gängigen Ermüdungs-Prüfverfahren ausgewählt um die Prüfverfahren selbst, deren Ergebnisse und ihre Anwendbarkeit für die Prüfung von Asphaltmastix zu analysieren.

- Time-Sweep-Prüfverfahren (verschiebungsgesteuert)
- Time Sweep-Test (spannungsgesteuert)
- LAS-Prüfverfahren

8.1 Time-Sweep-Prüfverfahren (verschiebungsgesteuert)

8.1.1 Prüfparameter

Die verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen wurden bei einer konstanten Prüftemperatur von +10°C durchgeführt. Dabei wurden die Probekörper mit einer konstanten Prüffrequenz von 30 Hz sowie mit drei unterschiedlichen Verformungsniveaus beaufschlagt. Die Beträge der drei Verformungsniveaus wurden so gewählt, dass jeweils eine kurze (ca. 15 min), eine mittlere (ca. 60 min) und eine lange (mehrere Stunden) Belastungsdauer bis zum Ermüdungseintritt erreicht wurde. Dadurch können die Einflüsse des Beanspruchungsniveaus auf das Ermüdungsverhalten der unterschiedlichen Mastixsorten bei unterschiedlichen Probekörpergeometrien über eine hinreichend große Bandbreite an Beanspruchungsniveaus untersucht werden. Um statistische Schwankungen in den Messwerten zu berücksichtigen, wurden an jeder Mastixsorte und jeder Probekörpergeometrie pro Verformungsniveau drei Prüfungen durchgeführt (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Prüfparameter für Time-Sweep-Prüfverfahren (verschiebungsgesteuert)

Mastixsorte	MX0037		MX0038		MX0039	
	Hyperbolisch	Zylindrisch	Hyperbolisch	Zylindrisch	Hyperbolisch	Zylindrisch
Prüftemperatur	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C
Prüffrequenz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz
Verformungsniveau „kurz Dauer“	1,0% (3x)	1,0% (3x)	1,0% (3x)	1,0% (3x)	1,0% (3x)	1,0% (3x)
Verformungsniveau „mittlere Dauer“	0,75% (3x)	0,75% (3x)	0,75% (3x)	0,75% (3x)	0,75% (3x)	0,75% (3x)
Verformungsniveau „lange Dauer“	0,5% (3x)	0,5% (3x)	0,5% (3x)	0,5% (3x)	0,5% (3x)	0,5% (3x)

8.1.2 Prüfablauf

Die Eingabe der Prüfparameter und die schrittweise Durchführung der Prüfung erfolgte mittels Anwendung der Prüfsoftware „Anton Paar RheoCompass“. In Abhängigkeit der zu untersuchenden

Probekörpergeometrie wurden bei jeder durchgeführten Prüfung mit diesem Prüfprogramm die vorprogrammierten Prüfschritte gemäß Anhang A (verschiebungsgesteuerte Time-Sweep-Prüfungen am zylindrischen Probekörper) und Anhang B (verschiebungsgesteuerte Time-Sweep-Prüfungen am hyperbolischen Probekörper) der Reihe nach durchlaufen.

8.2 Time-Sweep-Prüfverfahren (spannungsgesteuert)

8.2.1 Prüfparameter

Die spannungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen wurden bei einer konstanten Prüftemperatur von +10°C durchgeführt. Dabei wurden die Probekörper mit einer konstanten Prüffrequenz von 30 Hz sowie mit drei unterschiedlichen Spannungsniveaus beaufschlagt. Die Beträge der drei Spannungsniveaus wurden so gewählt, dass jeweils eine kurze (ca. 15 min), eine mittlere (ca. 60 min) und eine lange (mehrere Stunden) Belastungsdauer bis zum Ermüdungseintritt erreicht wurde. Dadurch können die Einflüsse des Beanspruchungsniveaus auf das Ermüdungsverhalten der unterschiedlichen Mastixsorten und Probekörpergeometrien über eine hinreichend große Bandbreite an Beanspruchungsniveaus untersucht werden. Um statistische Schwankungen in den Messwerten zu berücksichtigen, wurden an jeder Mastixsorte und jeder Probekörpergeometrie pro Verformungsniveau drei Prüfungen durchgeführt (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Prüfparameter für Time-Sweep-Prüfung (spannungsgesteuert)

Mastixsorte	MX0037		MX0038		MX0039	
	Hyperbolisch	Zylindrisch	Hyperbolisch	Zylindrisch	Hyperbolisch	Zylindrisch
Prüftemperatur	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C
Prüffrequenz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz	30Hz
Spannungsniveau „kurz Dauer“	500kPa (3x)	1200kPa (3x)	500kPa (3x)	1200kPa (3x)	500kPa (3x)	1200kPa (3x)
Spannungsniveau „mittlere Dauer“	400kPa (3x)	1000kPa (3x)	400kPa (3x)	1000kPa (3x)	400kPa (3x)	1000kPa (3x)
Spannungsniveau „lange Dauer“	300kPa (3x)	700kPa (3x)	300kPa (3x)	700kPa (3x)	300kPa (3x)	700kPa (3x)

8.2.2 Prüfablauf

Die Eingabe der Prüfparameter und die schrittweise Durchführung der Prüfung erfolgte mittels Anwendung der Prüfsoftware „Anton Paar RheoCompass“. In Abhängigkeit der zu untersuchenden Probekörpergeometrie wurden mit diesem Prüfprogramm bei jeder durchgeführten Prüfung die vorprogrammierten Prüfschritte gemäß Anhang C (spannungsgesteuerte Time-Sweep-Prüfungen am zylindrischen Probekörper) und Anhang D (spannungsgesteuerte Time-Sweep-Prüfungen am hyperbolischen Probekörper) der Reihe nach durchlaufen.

8.3 LAS-Prüfverfahren

8.3.1 Prüfparameter

Der erste Abschnitt des LAS-Prüfverfahrens (Frequenz-Sweep) wurde bei einer konstanten Prüftemperatur von $T = +10^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Dabei wurden die Probekörper gemäß AASHTO TP101 [AASHTO] mit einem konstanten Verschiebungsniveau von $\gamma = 0,1\%$ und innerhalb eines Frequenzbands von $f = 0,2$ bis 30 Hz beaufschlagt. Im direkt anschließend stattfindenden zweiten Abschnitt des LAS-Prüfverfahrens (verschiebungsgesteuert) wurden die Probekörper bei einer gleichbleibenden Prüftemperatur von $T = +10^{\circ}\text{C}$ und einer konstanten Prüffrequenz von $f = 10$ Hz innerhalb von 3100 Lastspielen mit gemäß AASHTO TP101 [AASHTO] zunehmenden Verschiebungsniveaus von 0 bis 30% beaufschlagt. Um statistische Schwankungen in den Messwerten zu berücksichtigen, wurden an jeder Mastixsorte und jeder Probekörpergeometrie je drei Prüfungen durchgeführt (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Prüfparameter für LAS Prüfverfahren

Mastixsorte	MX0037		MX0038		MX0039	
	Hyperbolisch	Zylindrisch	Hyperbolisch	Zylindrisch	Hyperbolisch	Zylindrisch
1. Abschnitt (Frequenz-Sweep)						
Prüftemperatur	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C
Prüffrequenz	0,2 – 30Hz					
Verformungsniveau	0,1% (3x)	1,0% (3x)				
2. Abschnitt (verschiebungsgesteuert)						
Prüftemperatur	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C	10°C
Prüffrequenz	10Hz	10Hz	10Hz	10Hz	10Hz	10Hz
Verformungsniveau	0 - 30% (3x)					

8.3.2 Prüfablauf

Die schrittweise Durchführung der Prüfung erfolgte mittels Anwendung der Prüfsoftware „Anton Paar RheoCompass“. In Abhängigkeit der zu untersuchenden Probekörpergeometrie wurden mit diesem Prüfprogramm die vorprogrammierten Prüfschritte gemäß Anhang E (LAS-Prüfungen am zylindrischen Probekörper) und Anhang F (LAS-Prüfungen am hyperbolischen Probekörper) bei jeder durchgeführten Prüfung der Reihe nach durchlaufen.

9 Ermüdungskriterien

9.1 Übersicht

Die im DSR durchgeführte Beaufschlagung von Probekörpern aus Asphaltmastix mittels oszillierender Verformungen oder Spannungen führt zu zeitversetzten Materialantworten welche vom DSR-Prüfgerät aufgezeichnet und in Form von zeitlichen Verläufen des Betrags des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ sowie des Phasenverschiebungswinkels δ widergegeben werden. Die zeitlichen Verläufe von $|G^*|$ und δ folgen zwar grundsätzlich den in Abschnitt 1.3.4 angeführten Phasen der Ermüdung, letztere treten jedoch, vor allem in Abhängigkeit des gewählten Prüfverfahrens, in unterschiedlichen Zeiträumen und unterschiedlicher Ausprägung auf. Während beispielsweise bei Verläufen von $|G^*|$ und δ infolge spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen der Eintritt des Materialversagens infolge Ermüdung relativ klar ersichtlich ist (siehe Abbildung 18) weisen die Verläufe infolge verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen oftmals keinen eindeutigen Ermüdungseintritt auf (siehe Abbildung 19). Für die Auswertung der Prüfergebnisse sind deshalb Kriterien festzulegen, welche den Ermüdungseintritt möglichst realitätsnah beschreiben und definieren.

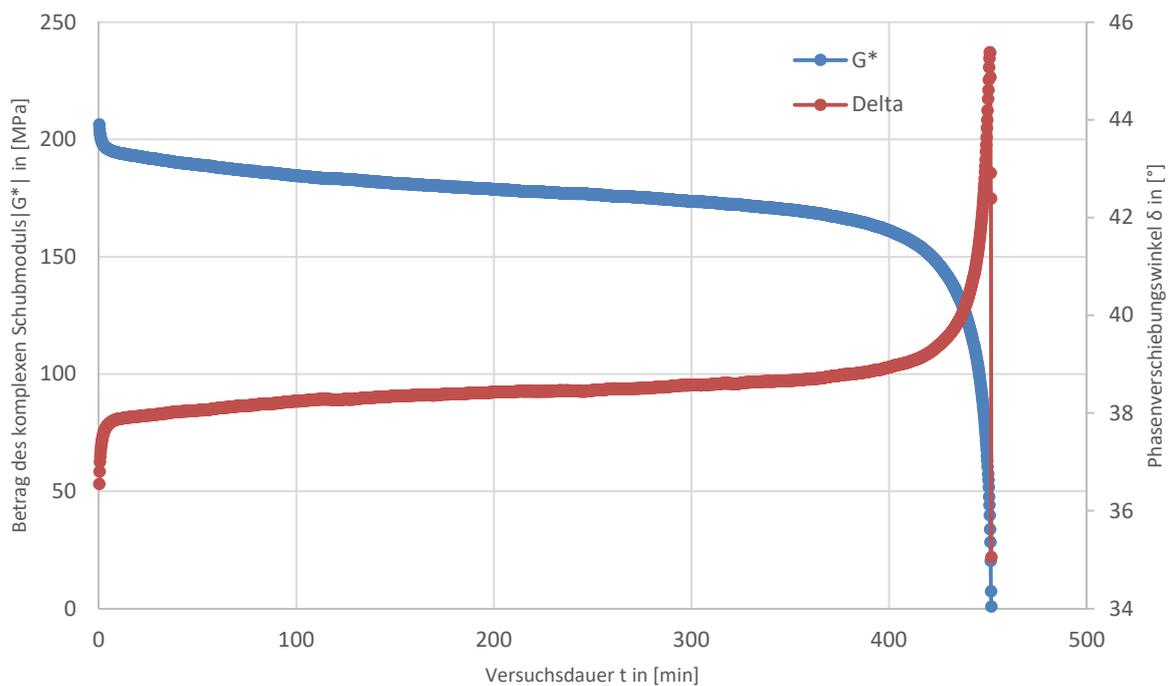


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf von $|G^*|$ und δ bei spannungsgesteuerter TS-Prüfung

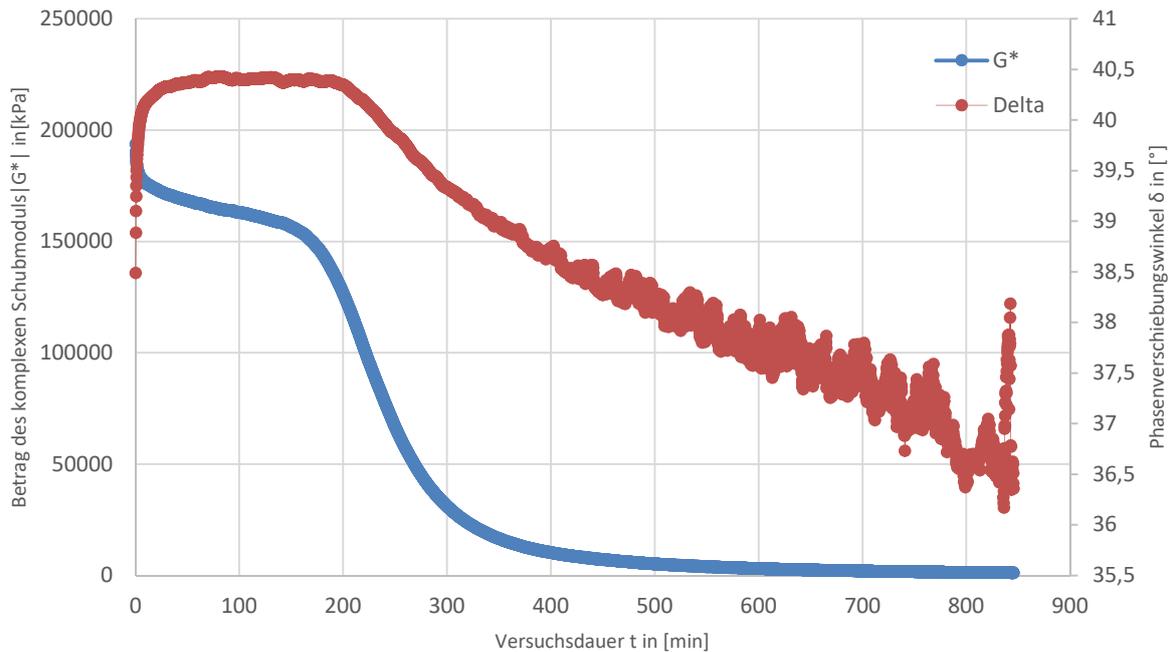


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf von $|G^*|$ und δ bei verschiebungsgesteuerter TS-Prüfung

Zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Bitumenprobekörpern existieren in der Forschung unterschiedliche Definitionen ab wann Ermüdung eintritt. Nachfolgend werden einige häufig verwendete Konzepte angeführt, auf deren Basis konkrete Ermüdungskriterien definiert wurden:

- Absinken des Betrags des komplexen Schubmoduls auf 50% seines Ausgangswerts [33],[49]-[51].
- Erreichen des maximalen Phasenverschiebungswinkels [45]
- Eintreten des kompletten Versagens des Bitumenprobekörpers
- Erreichen eines definierten Risswachstumsindex [43]
- Änderung bzw. Zunahme der dissipativen Energie bei fortschreitender Lastspielanzahl [19],[46]-[48].

9.2 Angewendete Ermüdungskriterien

Im Zuge der Auswertung der Prüfergebnisse der spannungs- und verschiebungsgesteuerten Time-Sweep Prüfungen (siehe Abschnitt 10.2 und 10.3) wurden die drei nachfolgenden, in der Forschung häufig zum Einsatz kommenden Ermüdungskriterien angewendet. Für die Auswertung der Prüfergebnisse der LAS-Prüfungen (siehe Abschnitt 10.4) wurde das Auswerteverfahren gemäß AASHTO TP101-5 [35] verwendet.

9.2.1 Abfall des Betrags des komplexen Schubmoduls auf 50% des Ausgangswerts ($G^*(50\%)$ -Kriterium)

Das $G^*(50\%)$ -Kriterium definiert den Ermüdungseintritt bei jener Lastspielzahl, bei der Betrag des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ auf 50% seines Initialwerts $|G^*_{init}|$ abgesunken ist (siehe Abbildung 20). Dieses Kriterium wurde unter anderem von Kim et al. [49], Hicks et al. [50] oder Williams [51] genutzt,

um Ermüdung unabhängig vom Belastungsmodus (spannungs- oder verschiebungsgesteuert) beschreiben zu können. Obwohl dieses Ermüdungskriterium aufgrund seiner einfachen Anwendung verhältnismäßig oft verwendet wird, basiert seine Definition auf einem willkürlich gewählten Kriterium und weist daher keinen Zusammenhang mit der Schadensakkumulation infolge Ermüdung auf [33],[46].

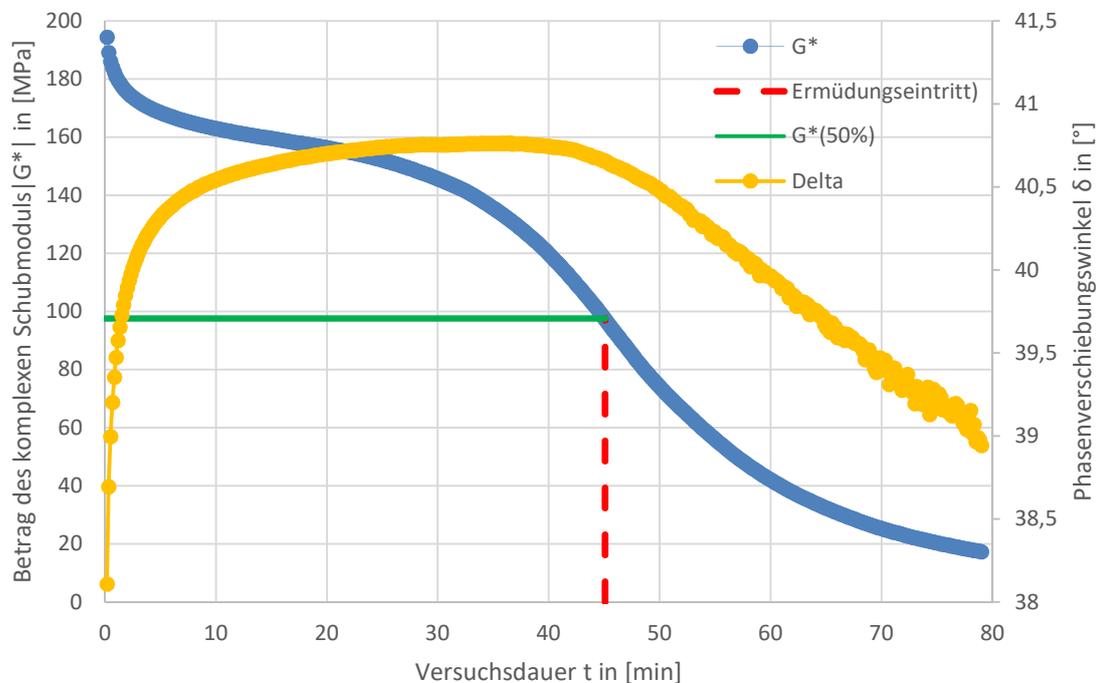


Abbildung 20: Anwendung des $G^*(50\%)$ -Kriterium bei verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfung

9.2.2 Erreichen des maximalen Phasenverschiebungswinkels (δ_{\max} Kriterium)

Das δ_{\max} Kriterium definiert den Ermüdungseintritt bei jener Lastspielzahl, bei der der Verlauf des Phasenverschiebungswinkels sein Maximum erreicht (siehe Abbildung 21). Seine Definition folgt dabei aus der Annahme, dass ab Erreichen des maximalen Phasenverschiebungswinkels schrittweise eine Schädigung infolge Ermüdung eintritt [15],[45]. Obwohl das δ_{\max} Kriterium grundsätzlich sowohl für die Auswertung spannungs- als auch verschiebungsgesteuerter Prüfmodi angewendet werden könnte, zeigt sich in den nachfolgenden Auswertungen (siehe Abschnitt 10.2 und 10.3) dass dieses Kriterium Schwächen bei der Auswertung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen aufweist und daher für die Auswertung dieser Art von Versuchen nicht geeignet ist.

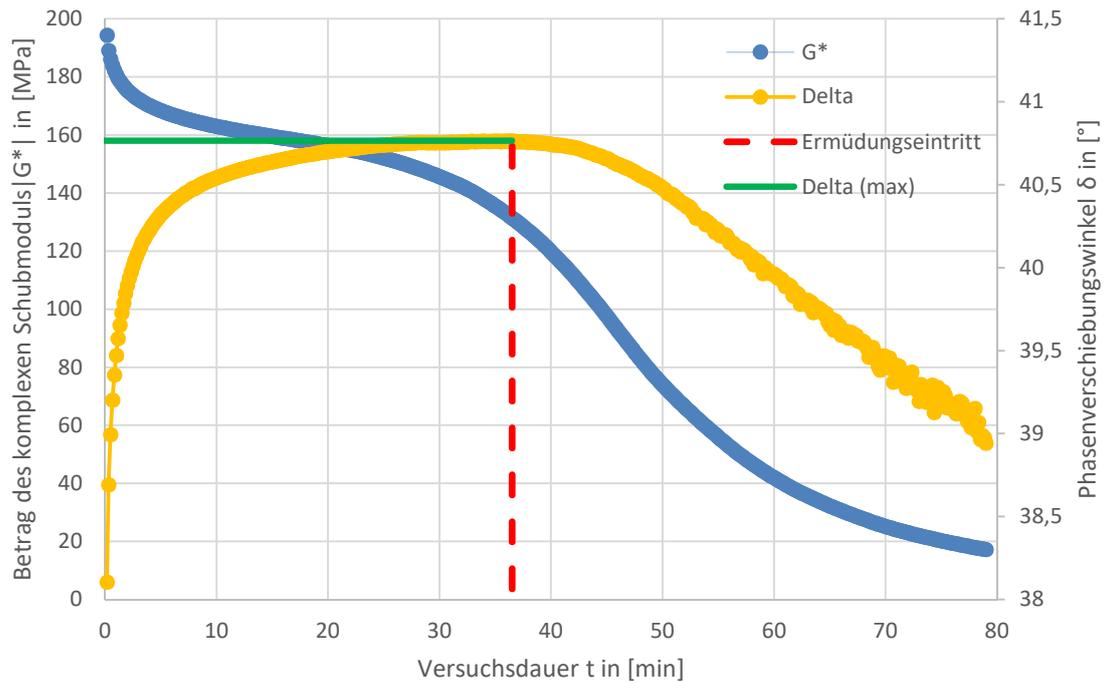


Abbildung 21: Anwendung des δ_{\max} -Kriterium bei verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfung

9.2.3 Änderung bzw. Zunahme der dissipativen Energie bei fortschreitender Lastspielanzahl (DER-Kriterium)

Gemäß den Erläuterungen aus Abschnitt 1.3.4 lässt sich der Ermüdungsfortschritt bei Asphalt in die Einschwingphase, die Phase des Anwachsens von Mikrorissen, die Phase des Anwachsens von Makrorissen und der Phase des Materialversagens einteilen. Untersuchungen von Pronk [47],[48] und Ghuzlan und Carpenter [46] zeigten, dass die Zeitpunkte des Erreichens der Phasen 2 und 3 realitätsnahe Ermüdungskriterien darstellen können. Weiterführende Untersuchungen von Bonetti et al. [19] bzw. Wang, et al. [52] resultierten in der Definition des DER-Kriteriums, demnach sowohl bei spannungs- als auch verschiebungsgesteuerter Versuchsdurchführung Ermüdung bei jener Lastspielzahl N_{p20} eintritt, bei der der Funktionsgraph des dissipierten Energieverhältnisses (DER) in den nichtlinearen Bereich übergeht. Der Übergang in den nicht linearen Bereich wurde dabei an jenem Punkt definiert, an dem der Verlauf des ermittelten dissipativen Energieverhältnisses DER um mehr als 20% vom Verlauf einer angenäherten, linearen Anfangsgerade abweicht (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23).

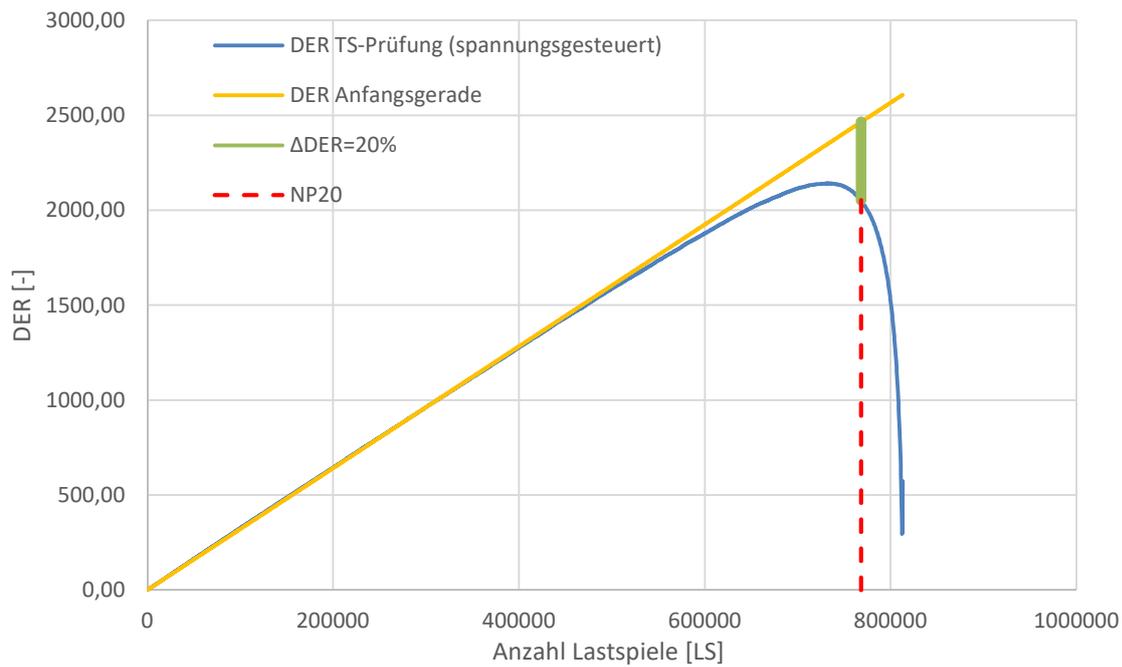


Abbildung 22: Anwendung des DER-Kriteriums zur Auswertung spannungsgesteuerter TS-Prüfung

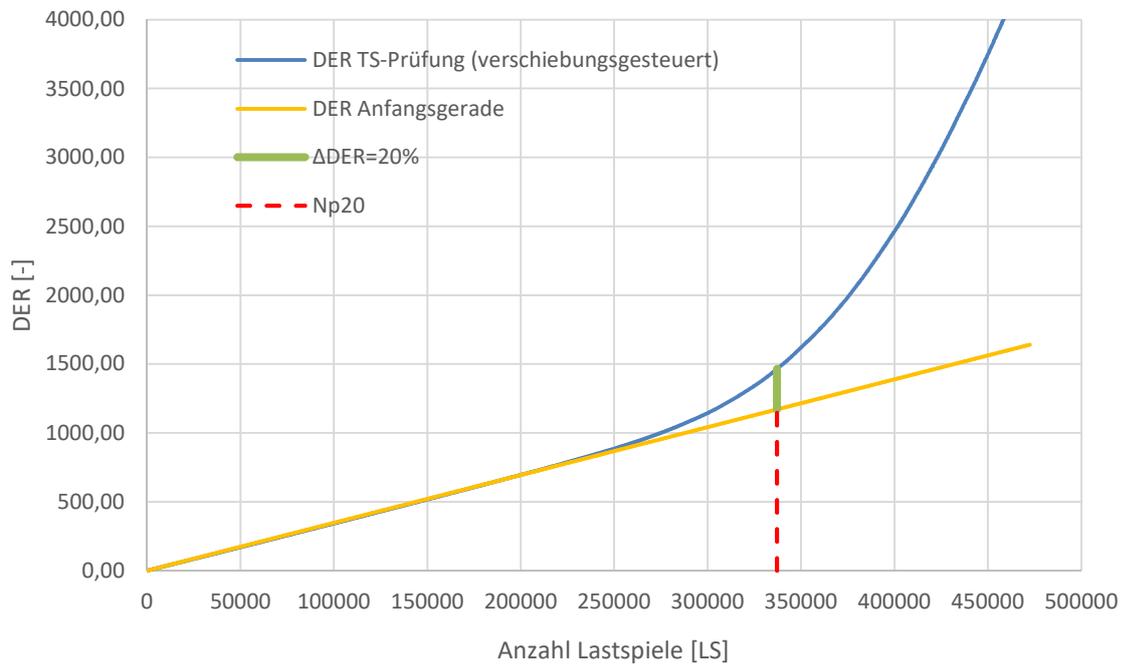


Abbildung 23: Anwendung des DER-Kriteriums zur Auswertung verschiebungsgesteuerter TS-Prüfung

Das Verhältnis der dissipierten Energie (DER) errechnet sich dabei gemäß Gleichung (33) aus der bis zum Lastzyklus n aufsummierte dissipative Energie pro Lastzyklus $\sum W_i$ und der dissipierten Energie des n -ten Lastzyklus W_n .

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_n} \quad (33)$$

Die dissipative Energie pro Lastzyklus W_i errechnet sich dabei gemäß Gleichung (34).

$$W_i = \pi \cdot \gamma_{0,i}^2 \cdot |G_i^*| \cdot \sin(\delta_i) \quad (34)$$

Mit:

- W_i dissipative Energie pro Lastzyklus i
- $|G_i^*|$ Spannungsamplitude bei Lastzyklus i
- γ_i Schubdehnungsamplitude bei Lastzyklus i
- δ_i Phasenverschiebungswinkel bei Lastzyklus i
- W_n dissipative Energie des n -ten Lastzyklus (entspricht W_i bei Lastzyklus $i = n$)

10 Auswertung und Analyse der Prüfergebnisse

10.1 Allgemeines

Die Auswertung der Prüfergebnisse der durchgeführten Time-Sweep-Prüfungen (spannungs- bzw. verschiebungsgesteuert) zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens der untersuchten Mastixsorten erfolgt durch Gegenüberstellung des jeweils aufgebrauchten Beanspruchungsniveaus mit der ermittelten Ermüdungs-Lastspielzahl. Die Ermittlung der Anzahl der Lastspiele bis zum Eintritt der Ermüdung erfolgt durch Anwendung von drei unterschiedlichen Ermüdungskriterien ($G^*(50\%)$, DER, δ_{\max}), welche den Zeitpunkt des Ermüdungseintritts unterschiedlich definieren. Die Auswertung der Prüfergebnisse aus den durchgeführten LAS-Versuche erfolgt mit Hilfe der Auswertearithmetik der US-amerikanischen Norm AASTHO TP101 [35].

Die Analyse des Ermüdungsverhaltens der drei untersuchten Mastixsorten MX0037 (*Kalksteinmehl + OMV 70/100*), MX0038 (*Quarzpulver + OMV 70/100*) und MX0039 (*Marmorpulver + OMV 70/100*) erfolgt, unterteilt nach den gewählten Prüfverfahren (Time-Sweep last- bzw. verschiebungsgesteuert sowie LAS-Prüfverfahren) sowohl für die zylindrische als auch die hyperbolische Probekörpergeometrie, durch Abbildung der ausgewerteten Einzel-Prüfergebnisse in mastixsortenspezifischen, logarithmischen Wöhlerkurven (siehe Abschnitt 1.3.5). Diese Wöhlerkurven werden hinsichtlich ihrer Verläufe und ihrer Korrelation mit den zugehörigen Einzelprüfungen analysiert und miteinander verglichen. Daraus wird die Widerstandsfähigkeit der einzelnen Mastixsorten gegen Materialermüdung abgeleitet und innerhalb des jeweiligen Prüfverfahrens bewertet.

10.2 Ermüdung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen

10.2.1 Allgemeines

Die ausgewerteten Prüfergebnisse aus den verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen an zylindrischen und hyperbolischen Probekörpern, sowie die daraus abgeleiteten Wöhlerkurven zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens der drei untersuchten Mastixsorten, werden nach dem jeweils angewendeten Ermüdungskriterium unterteilt und in Abbildung 24 bis Abbildung 30 dargestellt.

10.2.2 Anwendung Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$

Abbildung 24 und Abbildung 25 stellen das jeweils aufgebrauchte Dehnungsniveau der ermittelten Anzahl an Lastspielen bis zum Auftreten von Materialermüdung unter dem Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$ gegenüber. Dieses definiert Ermüdung als jene Lastspielzahl, bei der der Betrag des komplexen Schubmoduls auf 50% seines Ausgangswertes abgesunken ist (siehe Abschnitt 9.2.1).

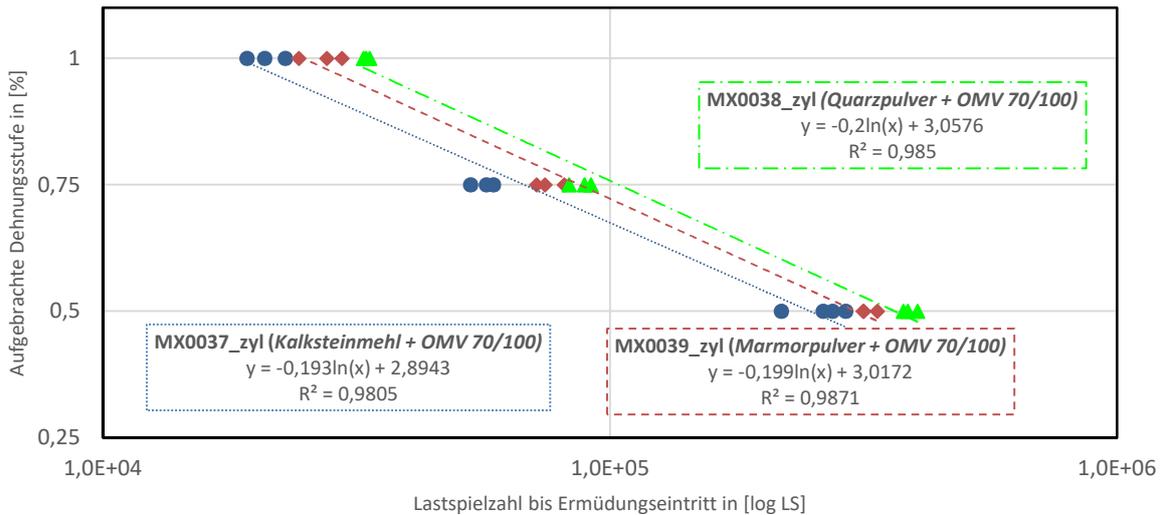


Abbildung 24: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium $G^*50\%$

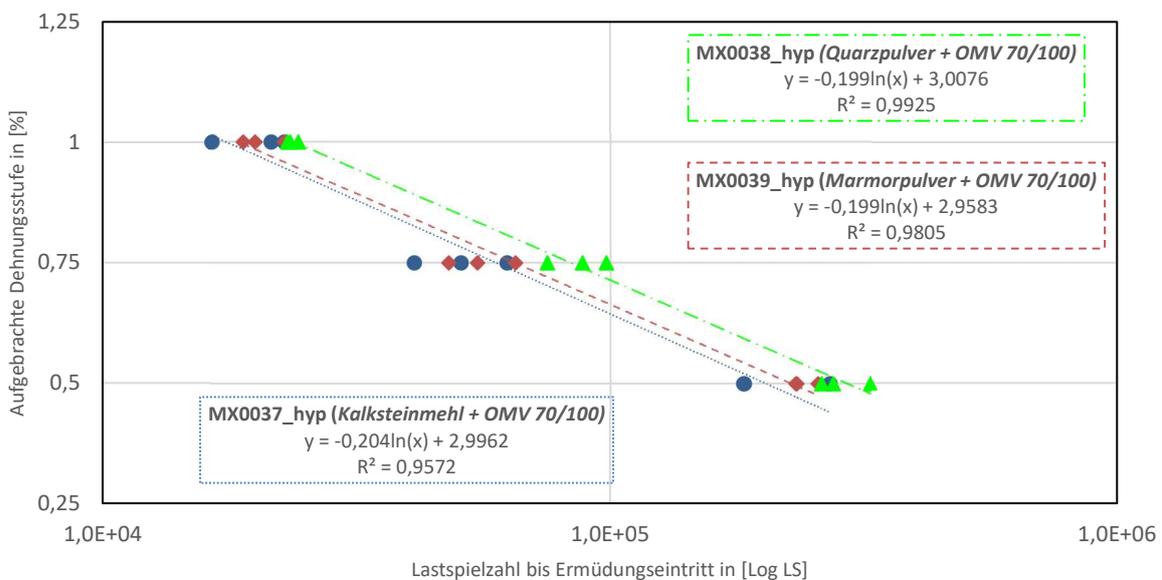


Abbildung 25: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium $G^*50\%$

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Da die Bestimmtheitsmaße (R^2) der drei untersuchten Mastixsorten sowohl bei Prüfungen mit zylindrischen als auch mit hyperbolischen Probekörpern allesamt bei $R^2 > 0,95$ und daher sehr nahe bei 1,0 liegen, weisen die drei Mastixsorten eine gute Korrelation zwischen den einzelnen Prüfergebnissen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven auf.

Neigung der Ermüdungskurve:

Sowohl Abbildung 24 als auch Abbildung 25 zeigen einen annähernd parallelen Verlauf der drei Wöhlerkurven. Daraus lässt sich ableiten, dass bei Anwendung des $G^*(50\%)$ -Ermüdungskriteriums sich bei allen drei Mastixsorten der Zeitpunkt des Ermüdungseintritts bei Veränderung des aufgebrachten Dehnungsniveaus ähnlich stark verschiebt.

Ermüdungsbeständigkeit:

Aus Abbildung 24 und Abbildung 25 lässt sich ableiten, dass bei Anwendung des Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$ für Prüfungen an beiden Probekörpergeometrien die Mastixsorte MX0038 (*Quarzpulver + OMV 70/100*) die besten Ermüdungseigenschaften aufweist, gefolgt von der Mastixsorte MX0039 (*Marmorpulver + OMV 70/100*). Die Mastixsorte MX0037 (*Kalksteinmehl + OMV 70/100*) weist die geringste Ermüdungsbeständigkeit aller untersuchten Mastixsorten auf.

10.2.3 Anwendung Ermüdungskriterium δ_{\max} :

In den Auswertungen gemäß Abbildung 26 und Abbildung 27 findet das Ermüdungskriterium δ_{\max} zur Bestimmung des Ermüdungseintritts seine Anwendung. Dieses Kriterium definiert Ermüdung bei jener Lastspielzahl, bei der während des Prüfversuchs der Maximalwert des Phasenverschiebungswinkels auftritt (siehe Abschnitt 9.2.2).

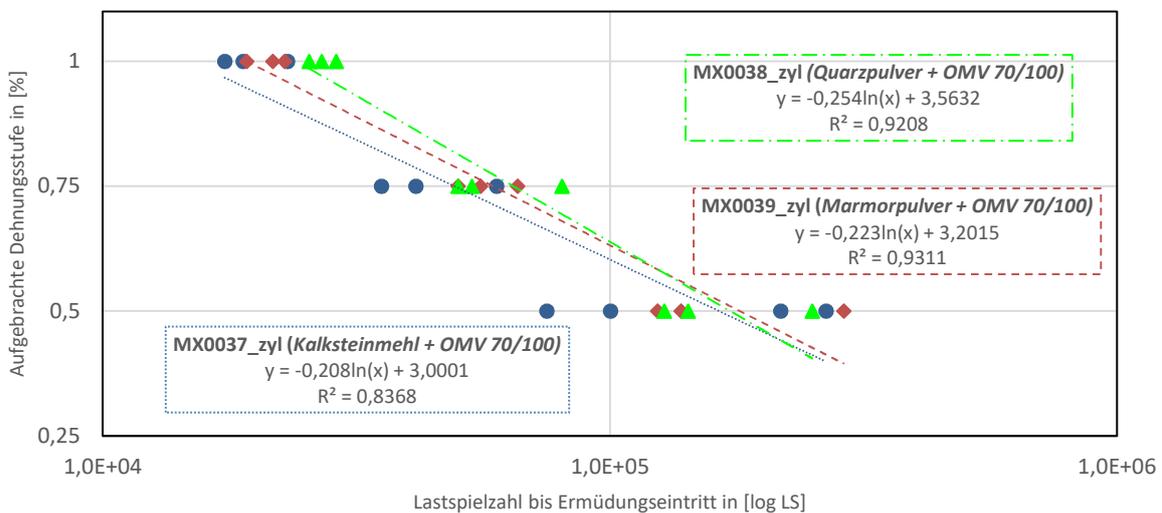


Abbildung 26: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{\max}

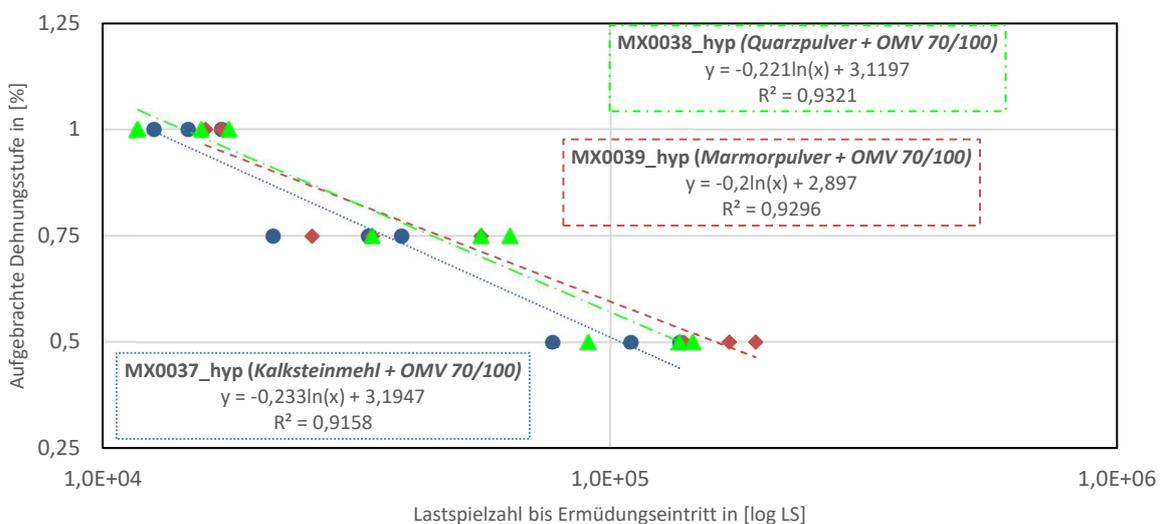


Abbildung 27: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{\max}

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der drei untersuchten Mastixsorten liegen gemäß Abbildung 26 und Abbildung 27 zwischen $0,84 \leq R^2 \leq 0,93$ und weisen daher innerhalb der untersuchten Mastixsorten auf mittelmäßige bis gute Korrelationen zwischen den einzelnen Prüfergebnissen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven hin. Die Bestimmtheitsmaße liegen, aufgrund größerer Streubreiten in den ermittelten Anzahlen der Ermüdungslastspiele je Dehnungsstufe, bei beiden Probekörpergeometrien betragsmäßig unter jenen aus Abschnitt 10.2.2. Diese Streuungen lassen sich auf die annähernd waagrechten Verläufe der Phasenverschiebungswinkel zurückführen, wie sie speziell bei geringen Dehnungsstufen ($\gamma < 0,75\%$) über einen längeren Zeitraum auftreten (siehe

Abbildung 28). Innerhalb dieses waagrechten Abschnitts sind betragsmäßig nur sehr geringe Schwankungen im Verlauf des Phasenverschiebungswinkels erkennbar. Unter anderem dadurch kann die Verwendung des Ermüdungskriteriums δ_{\max} bei der Auswertung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen dazu führen, dass je nach Lage des maximalen δ -Ausfalls, innerhalb dieses waagrechten Abschnitts, der definierte δ_{\max} -Ermüdungszeitpunkt den tatsächlichen Zeitpunkt des Ermüdungseintritts unterschätzt, wodurch größere Abweichungen in den Ergebnissen für Ermüdungslastspielzahlen innerhalb gleichartig durchgeführter Versuche auftreten können.

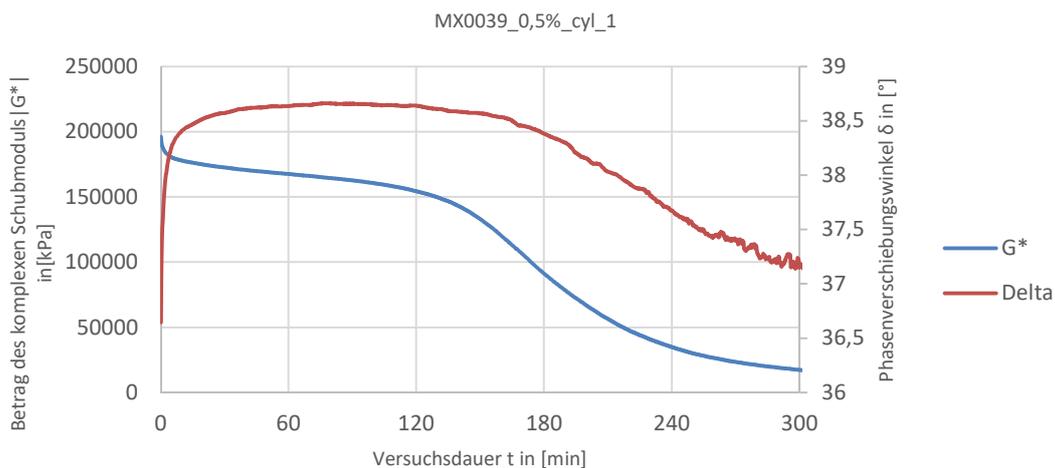


Abbildung 28: Abschnittsweise annähernd waagrechter Verlauf des Phasenverschiebungswinkels δ bei Durchführung einer verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfung an einem zylindrischen Mastixprobekörper bei einem geringen Beanspruchungsniveau ($\gamma=0,5\%$)

Neigung der Ermüdungskurve:

Sowohl in Abbildung 26 als auch in Abbildung 27 lassen sich keine parallelen Verläufe in den Wöhlerkurven der drei Mastixsorten erkennen. Infolge Prüfungen an zylindrischen Probekörpern (siehe Abbildung 26) weist der Verlauf von MX0038 ein deutlich größeres Gefälle als die beiden anderen Mastixsorten. Die Auswertung von Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern (siehe Abbildung 27) lässt dagegen bei MX0039 das größte Gefälle erkennen. Daraus lässt sich ableiten, dass bei Anwendung des δ_{\max} -Ermüdungskriteriums sich der Zeitpunkt des Ermüdungseintritts bei Veränderung des aufgebrachtten Dehnungsniveaus unterschiedlich stark verschiebt.

Ermüdungsbeständigkeit:

Bei größeren Dehnungsstufen ($\gamma > 0,75\%$) weist bei beiden Probekörperformen die Mastixsorte MX0038 (*Quarzpulver + OMV 70/100*) das beste Ermüdungsverhalten auf, während sie bei niedrigeren Dehnungsstufen ($\gamma < 0,50\%$) rascher ermüdet als die Mastixsorte MX0039 (*Marmorpulver + OMV 70/100*), welche bei niedrigeren Beanspruchungen die höchste Ermüdungsbeständigkeit aufweist. Die Mastixsorte MX0037 (*Kalksteinmehl + OMV 70/100*) zeigt nach Anwendung des δ_{\max} -Kriteriums sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Dehnungsstufen das schwächste Ermüdungsverhalten.

10.2.4 Anwendung Ermüdungskriterium DER:

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen die Beschreibung der Ermüdungsbeständigkeit der drei Mastixsorten unter Anwendung des DER-Ermüdungskriterium. Dieses Kriterium definiert Ermüdung bei jener Lastspielzahl N_{p20} bei der der Wert des dissipativen Energieverhältnisses des untersuchten Probekörpers um mehr als 20% vom Wert des dissipativen Energieverhältnisses der Anfangstangente abweicht (siehe Abschnitt 9.2.3).

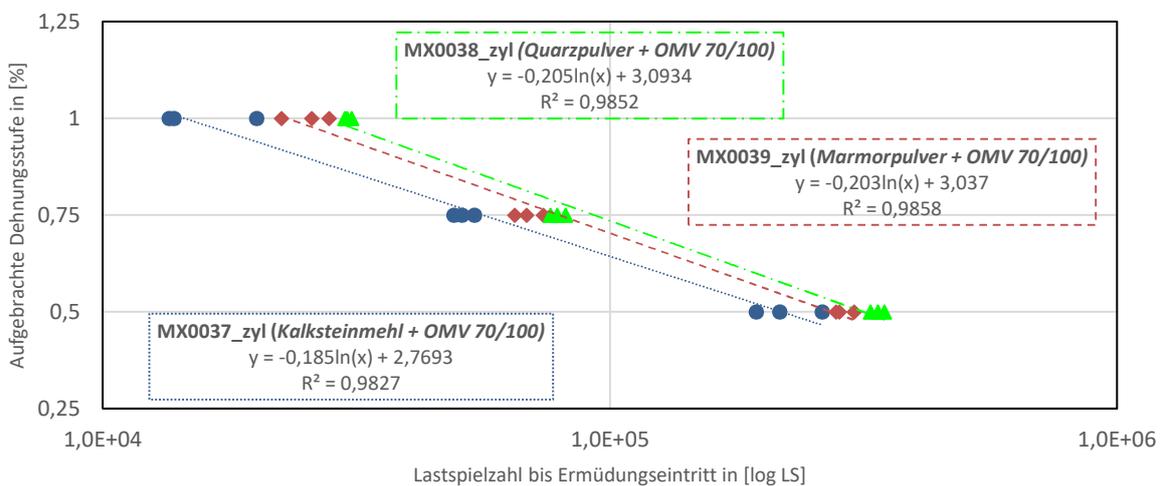


Abbildung 29: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER

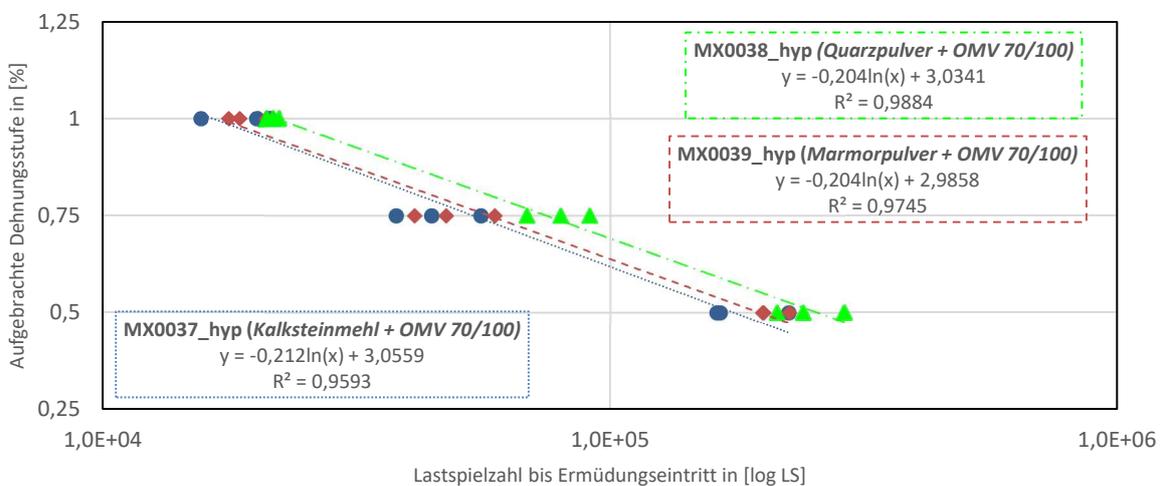


Abbildung 30: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Da die Bestimmtheitsmaße (R^2) der drei untersuchten Mastixsorten sowohl bei Prüfungen mit zylindrischen (siehe Abbildung 29) als auch mit hyperbolischen Probekörpern (siehe Abbildung 30) allesamt bei $R^2 > 0,95$ und daher sehr nahe bei 1,0 liegen, weisen die drei Mastixsorten eine gute Korrelation zwischen den einzelnen Prüfergebnissen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven auf.

Neigung der Ermüdungskurve:

Sowohl Abbildung 29 als auch Abbildung 30 zeigen einen annähernd parallelen Verlauf der drei Wöhlerkurven. Einzig die Ermüdungskurve zylindrischer Probekörper der Mastixsorte MX0037 weist gemäß Abbildung 29 im Verhältnis zu den übrigen Mastixsorten ein etwas größeres Gefälle auf. Dennoch lässt sich aus Abbildung 29 und Abbildung 30 ableiten, dass bei Anwendung des DER-Ermüdungskriteriums sich bei allen drei Mastixsorten der Zeitpunkt des Ermüdungseintritts bei Veränderung des aufgetragenen Dehnungsniveaus ähnlich stark verschiebt.

Ermüdungsbeständigkeit:

Aus Abbildung 29 und Abbildung 30 lässt sich ableiten, dass auch bei der Verwendung des DER-Kriteriums die Mastixsorte MX0038 (*Quarzpulver + OMV 70/100*) die besten Ermüdungseigenschaften aufweist, gefolgt von der Mastixsorte MX0039 (*Marmorpulver + OMV 70/100*). Die Mastixsorte MX0037 (*Kalksteinmehl + OMV 70/100*) weist von den drei untersuchten Mastixsorten die geringste Ermüdungsbeständigkeit auf.

10.2.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Auswertungen der Ergebnisse der verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen gemäß Abbildung 24 bis Abbildung 30 zeigen, dass bei Verwendung der Ermüdungskriterien $G^*(50\%)$ und DER, sowohl bei zylindrischer als auch für hyperbolischer Probekörpergeometrie, die Wöhlerkurven aller drei untersuchten Mastixsorten MX0037, MX0038 und MX0039 annähernd parallele Verläufe aufweisen. Daraus lässt sich ableiten, dass die drei untersuchten Mastixsorten hinsichtlich der Veränderung des Zeitpunkts des Ermüdungseintritts in einem ähnlichen Ausmaß auf Änderungen im aufgetragenen Spannungsniveau reagieren. Bei Anwendung des Ermüdungskriteriums δ_{\max} weist die Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0038 bei zylindrischer Probekörpergeometrie dagegen einen deutlich steileren Verlauf und bei hyperbolischen Probekörpern die Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0039 einen deutlich flacheren Verlauf als die beiden jeweils anderen untersuchten Mastixsorten auf.

Beim Vergleich der Wöhlerkurven der untersuchten Mastixsorten aus Abbildung 24 bis Abbildung 30, lässt sich weiters erkennen, dass bei verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen die hyperbolischen Probekörper, trotz Aufbringung einer identischen Dehnungsstufe, ermüdungsbedingt früher versagen als zylindrische Probekörper. Dies lässt sich auf die geometriebedingt deutlich größere Widerstandsfähigkeit des zylindrischen Probekörpers gegen Schubbeanspruchung zurückführen, welche sich unter anderem in deutlich größeren Anfangswerten für den Betrag des komplexen Schubmoduls widerspiegelt (siehe Tabelle 9 und Abbildung 31).

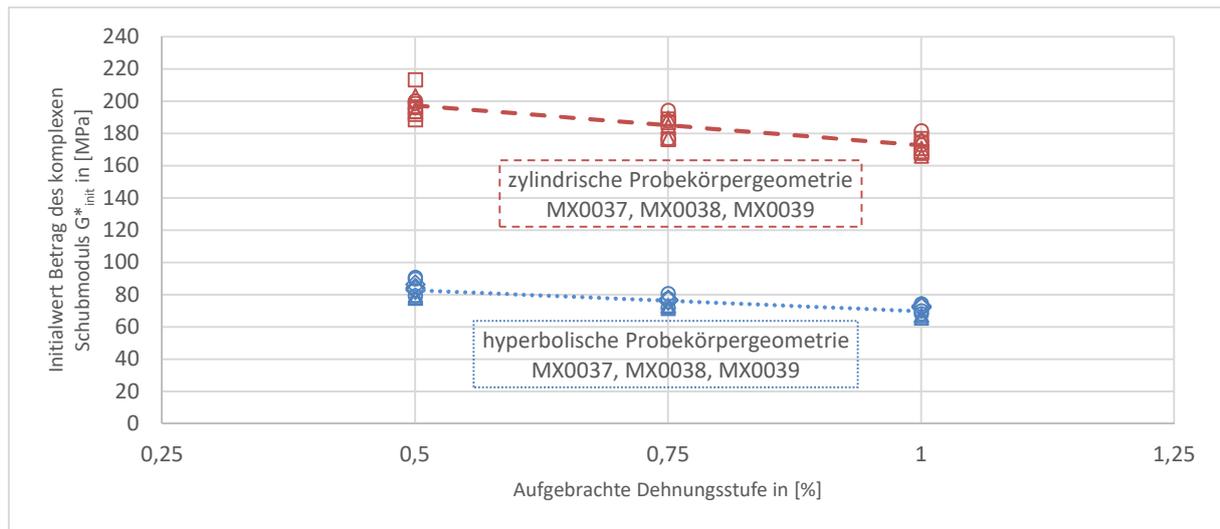


Abbildung 31: Initialwert des Betrags des komplexen Schubmoduls zyl. und hyp. PK (TS verschiebungsgesteuert)

Tabelle 9: Verhältnis der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls (TS-verschiebungsgesteuert)

Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert)	MX0037 <i>Kalksteinmehl + OMV 70/100</i>	MX0038 <i>Quarzpulver + OMV 70/100</i>	MX0039 <i>Marmorpulver + OMV 70/100</i>
Zylindrische Probekörpergeometrie: Mittelwert der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls $ G^*_{init,zyl} $	184,5 MPa	184,1 MPa	187,2 MPa
Hyperbolische Probekörpergeometrie: Mittelwert der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls $ G^*_{init,hyp} $	90,8 MPa	72,7 MPa	78,1 MPa
Verhältnis $ G^*_{init,zyl} / G^*_{init,hyp} $	2,04	2,53	2,40

Hinsichtlich der Bewertung des Ermüdungsverhaltens zeigen die Ergebnisse der verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen sowohl für zylindrische als auch für hyperbolische Probekörper, dass die Mastixsorte MX0038 (*Quarzpulver + OMV 70/100*), bei Verwendung der Ermüdungskriterien $G^*(50\%)$ und DER, innerhalb des Untersuchungsbereichs ($0,5\% \leq \gamma \leq 1,0\%$) das beste Ermüdungsverhalten aller untersuchten Mastixsorten aufweist. Einzig bei Anwendung des Ermüdungskriteriums δ_{max} verfügt MX0038 bei geringeren Dehnungsniveaus (bei hyperbolischen Probekörpern ab ca. $\gamma \leq 0,75\%$ und bei zylindrischen Probekörpern ab ca. $\gamma \leq 0,5\%$) über ein schlechteres Ermüdungsverhalten als MX0039. Aufgrund der fragwürdigen Anwendbarkeit dieses Kriteriums für verschiebungsgesteuerte Time-Sweep-Prüfungen (siehe Abschnitt 10.2.3) werden diese Abweichungen gemäß Ermüdungskriterium δ_{max} bei der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens vernachlässigt. Nach der Mastixsorte MX0038 weist die Mastixsorte MX0039 (*Marmorpulver + OMV 70/100*) das zweitbeste Ermüdungsverhalten auf, gefolgt von der Mastixsorte MX0037, welche unabhängig von Probekörpergeometrie und verwendetem Ermüdungskriterium stets das schlechteste Ermüdungsverhalten aufweist (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Reihung der Mastixsorten hinsichtlich Ermüdungsverhalten (TS-verschiebungsgesteuert)

Aufgebrachtes Verformungs-niveau	Reihung der untersuchten Mastixsorten nach dem Ermüdungsverhalten (Prüfverfahren: Time-Sweep - verschiebungsgesteuert)		
	MX0037 <i>Kalksteinmehl + OMV 70/100</i>	MX0038 <i>Quarzpulver + OMV 70/100</i>	MX0039 <i>Marmorpulver + OMV 70/100</i>
1,0%	-	+	○
0,75%	-	+	○
0,5%	-	+	○

Legende: + = Bestes Ermüdungsverhalten, ○ = zweitbestes Ermüdungsverhalten, - = schlechtestes Ermüdungsverhalten

10.3 Ermüdung spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen

10.3.1 Allgemeines

Die ausgewerteten Prüfergebnisse aus den spannungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen an zylindrischen und hyperbolischen Probekörpern, sowie die daraus abgeleiteten Wöhlerkurven zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens der drei untersuchten Mastixsorten, werden, unterteilt nach dem jeweils angewendeten Ermüdungskriterium, in Abbildung 32 bis Abbildung 37 dargestellt.

10.3.2 Anwendung Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$

Abbildung 32 und Abbildung 33 stellen das jeweils aufgebrachte Spannungsniveau der ermittelten Anzahl an Lastspielen bis zum Auftreten von Materialermüdung unter dem Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$ gegenüber. Dieses definiert Ermüdung bei jener Lastspielzahl, bei der der Betrag des komplexen Schubmoduls auf 50% seines Ausgangswertes abgesunken ist (siehe Abschnitt 9.2.1).

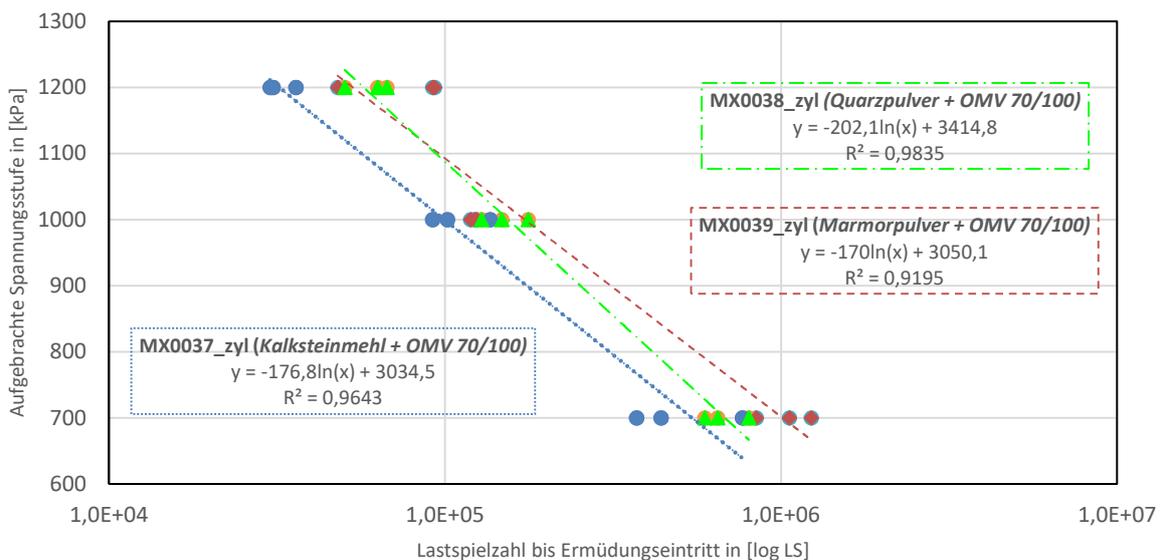


Abbildung 32: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$

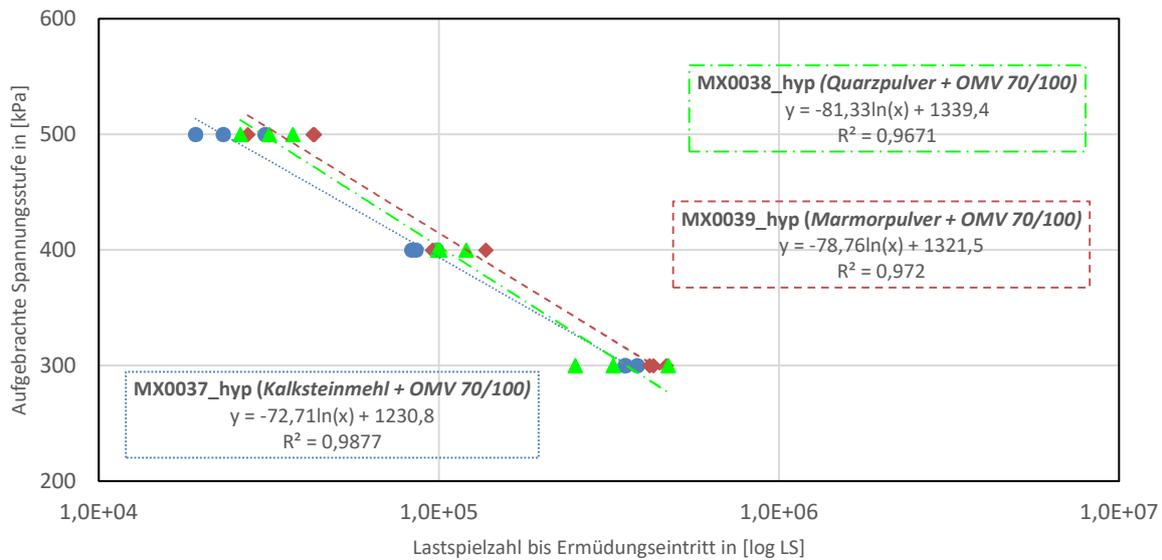


Abbildung 33: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium G*50%

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Da die Bestimmtheitsmaße (R^2) der drei untersuchten Mastixsorten sowohl bei Prüfungen mit zylindrischen (siehe Abbildung 32) als auch mit hyperbolischen Probekörpern (siehe Abbildung 33) allesamt bei $R^2 > 0,91$ und daher sehr nahe bei 1,0 liegen, weisen die drei Mastixsorten eine gute Korrelation zwischen den einzelnen Prüfergebnissen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven auf.

Neigung der Ermüdungskurve:

Sowohl in Abbildung 32 als auch in Abbildung 33 weisen nur die beiden Mastixsorten MX0037 und MX0039 einen annähernd parallelen Verlauf ihrer Wöhlerkurven auf. Daraus ist abzuleiten, dass bei Anwendung des $G^*(50\%)$ -Ermüdungskriteriums, sich bei diesen beiden Mastixsorten die Zeitpunkte des Ermüdungseintritts infolge Veränderung des aufgebrachten Spannungsniveaus in einem ähnlichen Verhältnis verändern. Der Verlauf der Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0038 weist dagegen ein deutlich stärkeres Gefälle als die beiden anderen Mastixsorten auf. Dies führt dazu, dass sich die Lastspielzahl bis zum Ermüdungseintritt von MX0039 bei gleichzeitiger Zunahme der aufgebrachten Spannungsstufe weniger stark reduziert als bei den beiden anderen Mastixsorten MX0037 und MX0039.

Ermüdungsbeständigkeit:

Bei größeren Laststufen ($\tau > 1200\text{kPa}$ bei zylindrischen Probekörpern sowie $\tau \gg 500\text{kPa}$ bei hyperbolischen Probekörpern) weist die Mastixsorte MX0038 (Quarzpulver + OMV 70/100) bei Anwendung des Ermüdungskriterium $G^*(50\%)$ das beste Ermüdungsverhalten auf, während sie bei niedrigeren Laststufen ($\tau \ll 700\text{kPa}$ bei zylindrischen Probekörpern sowie $\tau < 300\text{kPa}$ bei hyperbolischen Probekörpern) am schnellsten ermüdet. Das Ermüdungsverhalten der Mastixsorte MX0039 (Marmorpulver + OMV 70/100), welche bei niedrigeren Beanspruchungen die höchste Ermüdungsbeständigkeit aufweist, ist zusätzlich über das gesamte Prüfspektrum besser zu beurteilen als jenes der Mastixsorte MX0037 (Kalksteinmehl + OMV 70/100), die bei großen Laststufen das schlechteste Ermüdungsverhalten aller untersuchten Mastixsorten zeigt.

10.3.3 Anwendung Ermüdungskriterium δ_{\max} :

In den Auswertungen gemäß Abbildung 34 und Abbildung 35 findet das Ermüdungskriterium δ_{\max} zur Bestimmung des Ermüdungseintritts seine Anwendung. Dieses Kriterium definiert Ermüdung bei jener Lastspielzahl, bei der während des Prüfversuchs der Maximalwert des Phasenverschiebungswinkels auftritt (siehe Abschnitt 9.2.2).

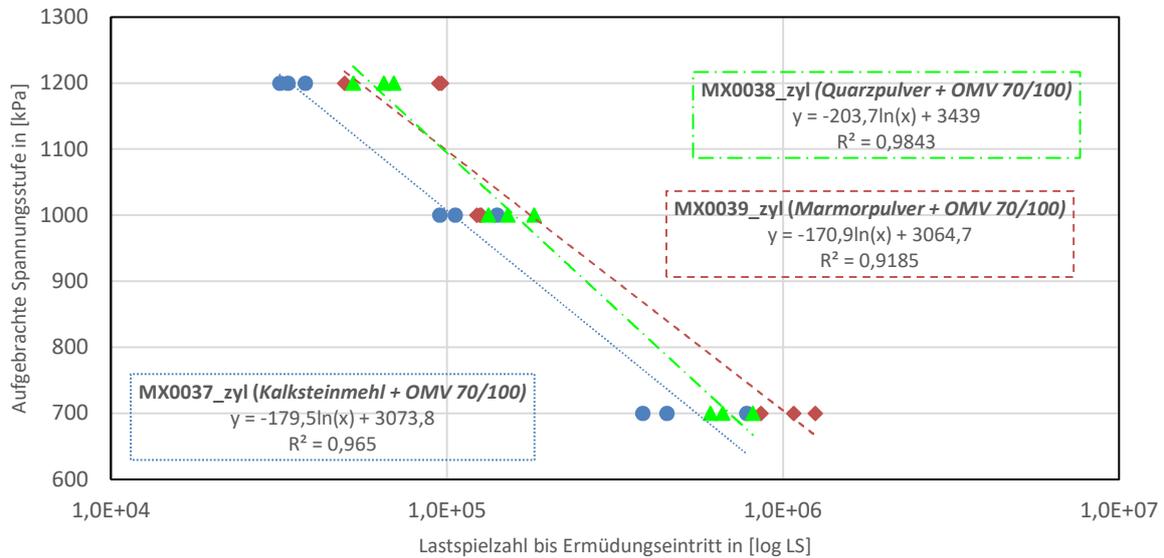


Abbildung 34: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{\max}

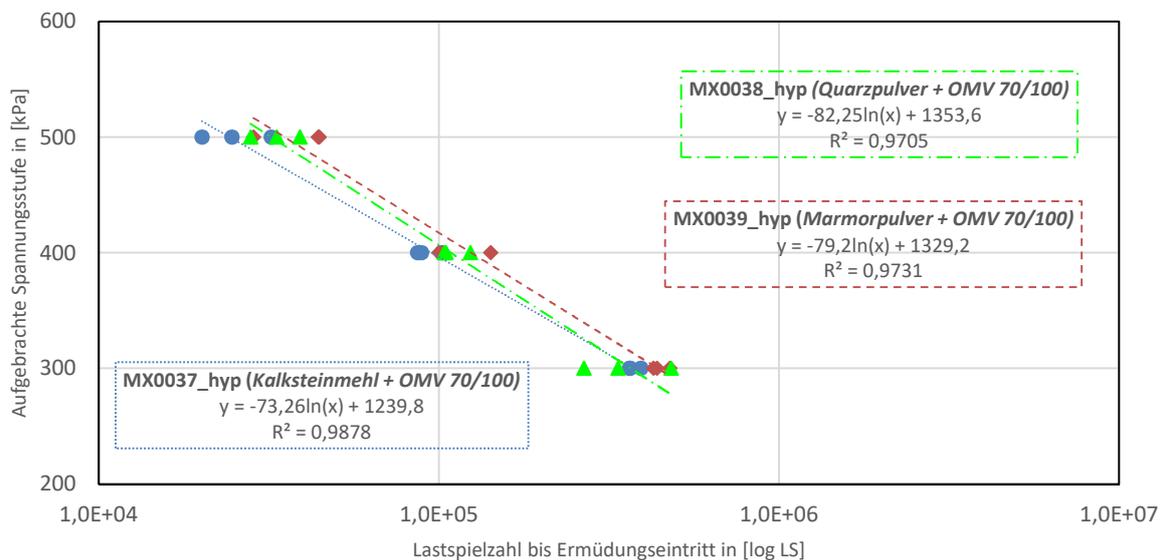


Abbildung 35: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{\max}

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Da die Bestimmtheitsmaße (R^2) der drei untersuchten Mastixsorten sowohl bei Prüfungen mit zylindrischen (siehe Abbildung 34) als auch mit hyperbolischen Probekörpern (siehe Abbildung 35)

allesamt bei $R^2 > 0,91$ und daher sehr nahe bei 1,0 liegen, weisen die drei Mastixsorten eine gute Korrelation zwischen den einzelnen Prüfergebnissen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven auf.

Neigung der Ermüdungskurve:

Sowohl in Abbildung 34 als auch in Abbildung 35 weisen die beiden Mastixsorten MX0037 und MX0039 einen annähernd parallelen Verlauf ihrer Wöhlerkurven auf. Daraus ist abzuleiten, dass auch bei Anwendung des δ_{\max} -Ermüdungskriteriums, sich bei diesen beiden Mastixsorten die Zeitpunkte des Ermüdungseintritts infolge Variation des aufgetragenen Spannungsniveaus in einem ähnlichen Verhältnis verändern. Der Verlauf der Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0038 weist dagegen ein deutlich stärkeres Gefälle als die beiden anderen Mastixsorten auf. Dies führt dazu, dass sich die Lastspielzahl bis zum Ermüdungseintritt von MX0039 bei gleichzeitiger Zunahme der aufgetragenen Spannungsstufe weniger stark reduziert als bei den beiden anderen Mastixsorten MX0037 und MX0039.

Ermüdungsbeständigkeit:

Bei größeren Laststufen ($\tau > 1200\text{kPa}$ bei zylindrischen Probekörpern sowie $\tau \gg 500\text{kPa}$ bei hyperbolischen Probekörpern) weist die Mastixsorte MX0038 (*Quarzpulver + OMV 70/100*) bei Anwendung des Ermüdungskriterium δ_{\max} das beste Ermüdungsverhalten auf, während sie bei niedrigeren Laststufen ($\tau \ll 700\text{kPa}$ bei zylindrischen Probekörpern sowie $\tau < 300\text{kPa}$ bei hyperbolischen Probekörpern) am schnellsten ermüdet. Das Ermüdungsverhalten der Mastixsorte MX0039 (*Marmorpulver + OMV 70/100*), welche bei niedrigeren Beanspruchungen die höchste Ermüdungsbeständigkeit aufweist, ist zusätzlich über das gesamte Prüfspektrum besser zu beurteilen als jenes der Mastixsorte MX0037 (*Kalksteinmehl + OMV 70/100*), die bei großen Laststufen das schlechteste Ermüdungsverhalten aller untersuchten Mastixsorten zeigt.

10.3.4 Anwendung Ermüdungskriterium DER:

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen die Beschreibung der Ermüdungsbeständigkeit der drei Mastixsorten unter Anwendung des DER-Ermüdungskriterium. Dieses Kriterium definiert Ermüdung bei jener Lastspielzahl N_{p20} bei der der Wert des dissipativen Energieverhältnisses des untersuchten Probekörpers um mehr als 20% vom Wert des dissipativen Energieverhältnisses der Anfangstangente abweicht (siehe Abschnitt 9.2.3).

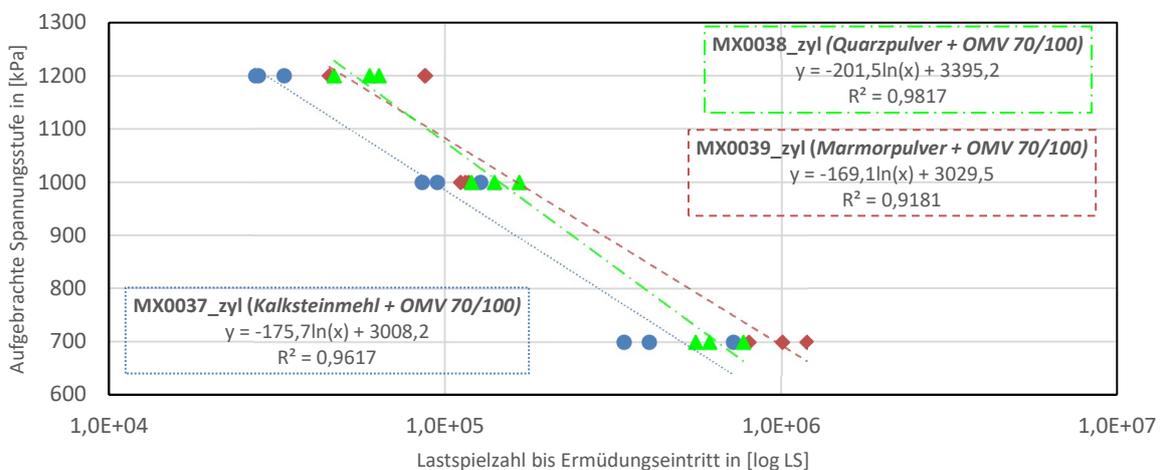


Abbildung 36: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER

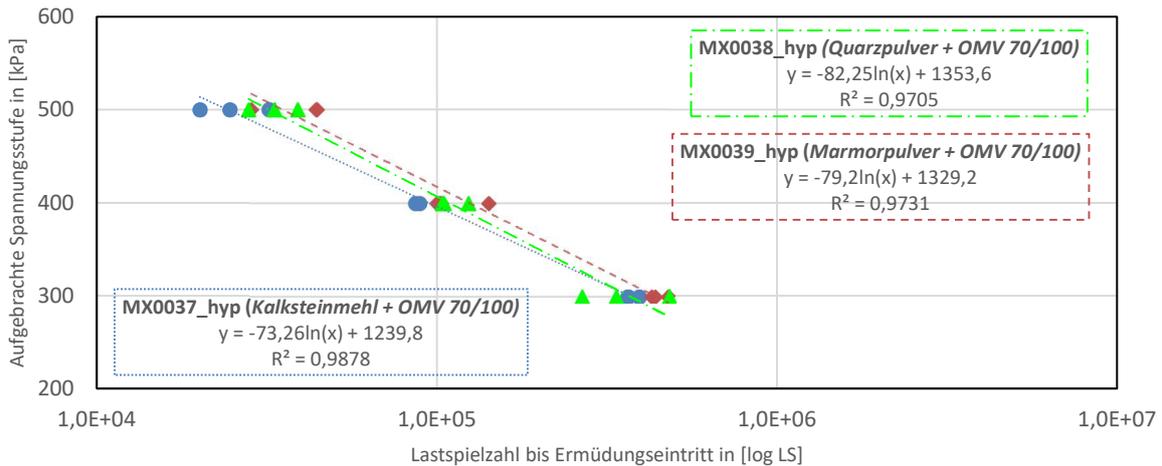


Abbildung 37: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Da die Bestimmtheitsmaße (R^2) der drei untersuchten Mastixsorten sowohl bei Prüfungen mit zylindrischen (siehe Abbildung 36) als auch mit hyperbolischen Probekörpern (siehe Abbildung 37) allesamt bei $R^2 > 0,91$ und daher sehr nahe bei 1,0 liegen, weisen die drei Mastixsorten eine gute Korrelation zwischen den einzelnen Prüfergebnissen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven auf.

Verlauf der Ermüdungskurve:

Sowohl in Abbildung 36 als auch in Abbildung 37 weisen die beiden Mastixsorten MX0037 und MX0039 einen annähernd parallelen Verlauf ihrer Wöhlerkurven auf. Daraus ist abzuleiten, dass auch bei Anwendung des DER-Ermüdungskriteriums, sich bei diesen beiden Mastixsorten die Zeitpunkte des Ermüdungseintritts infolge Variation des aufgebrachten Spannungsniveaus in einem ähnlichen Verhältnis verändern. Der Verlauf der Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0038 weist dagegen ein deutlich stärkeres Gefälle als die beiden anderen Mastixsorten auf. Dies führt dazu, dass sich die Lastspielzahl bis zum Ermüdungseintritt von MX0039 bei gleichzeitiger Zunahme der aufgebrachten Spannungsstufe weniger stark reduziert als bei den beiden anderen Mastixsorten MX0037 und MX0039.

Ermüdungsbeständigkeit:

Hinsichtlich der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens lässt sich infolge der Verwendung hyperbolischer Probekörper und der Anwendung des Ermüdungskriteriums DER feststellen, dass die Mastixsorte MX0039 im untersuchten Beanspruchungsbereich ($300 \text{ kPa} \leq \sigma \leq 500 \text{ kPa}$) durchgehend über das beste Ermüdungsverhalten verfügt. Während bis zu einer Prüfbelastung von ca. $\sigma \geq 300 \text{ kPa}$ bei Mastixsorte MX0037 das schwächste Ermüdungsverhalten erkennbar ist, weist bei Beanspruchungen von ca. $\sigma \leq 300 \text{ kPa}$ die Mastixsorte MX0038, auf Basis ihrer größeren Wöhlerkurven-Neigung, das schlechteste Ermüdungsverhalten aller untersuchten Mastixsorten auf.

Bei Verwendung zylindrischer Probekörper zeigt sich, unter anderem bedingt durch wesentlich höhere Prüfbelastungen (siehe Abschnitt 8.2.1), dass die Mastixsorte MX0038 innerhalb des Untersuchungsbereichs, bei Beanspruchungen ab ca. $\sigma \geq 1200 \text{ kPa}$ über das beste Ermüdungsverhalten verfügt, während ab Beanspruchungen von ca. $\sigma \leq 1200 \text{ kPa}$ die Mastixsorte MX0039 das beste Ermüdungsverhalten aller untersuchten Mastixsorten aufweist. Die Mastixsorte

MX0037 weist bei der Verwendung zylindrischer Probekörper und des Ermüdungskriteriums DER über den gesamten Prüfbereich die schlechtesten Ermüdungseigenschaften auf.

10.3.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Auswertungen der Ergebnisse der spannungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen gemäß Abbildung 32 bis Abbildung 37 zeigen, dass die Wöhlerkurven der Mastixsorten MX0037 und MX0039 annähernd parallele Verläufe aufweisen. Daraus lässt sich ableiten, dass diese beiden Mastixsorten hinsichtlich der Veränderung des Zeitpunkts des Ermüdungseintritts, in einem ähnlichen Ausmaß auf Änderungen im aufgetragenen Spannungsniveau reagieren. Die Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0038 weist dagegen bei beiden Probekörpergeometrien und unabhängig vom verwendeten Ermüdungskriterium die größte Neigung aller untersuchten Mastixsorten auf.

Gemäß Abbildung 32 bis Abbildung 37 weisen die Wöhlerkurven zylindrischer Probekörper zudem deutlich größere Neigungen als jene der hyperbolischen Probekörper auf. Dies lässt sich auf die geometriebedingt höheren Spannungsniveaus zurückführen (siehe Abschnitt 8.2.1), welche bei zylindrischen Probekörpern aufgebracht werden müssen um aussagekräftige Prüfdauern zu gewährleisten.

Innerhalb der untersuchten Asphaltmastixsorten zeigen sich gemäß Abbildung 32 bis Abbildung 37, zwischen zylindrischer und hyperbolischer Probekörpergeometrie deutliche Unterschiede bei den ermittelten Ermüdungslastspielzahlen. Diese lassen sich jedoch, aufgrund der unterschiedlichen Beträge der aufgetragenen Spannungsniveaus, nur bedingt vergleichen. Dennoch lässt sich aus Abbildung 38 bzw. Tabelle 11 ableiten, dass die Initialwerte der Beträge des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ der zylindrischen Probekörpergeometrie geometriebedingt deutlich über jenen der hyperbolischen Probekörpergeometrie liegen, wodurch in weiterer Folge auch höhere Lastspielzahlen bis zum Ermüdungseintritt angenommen werden können.

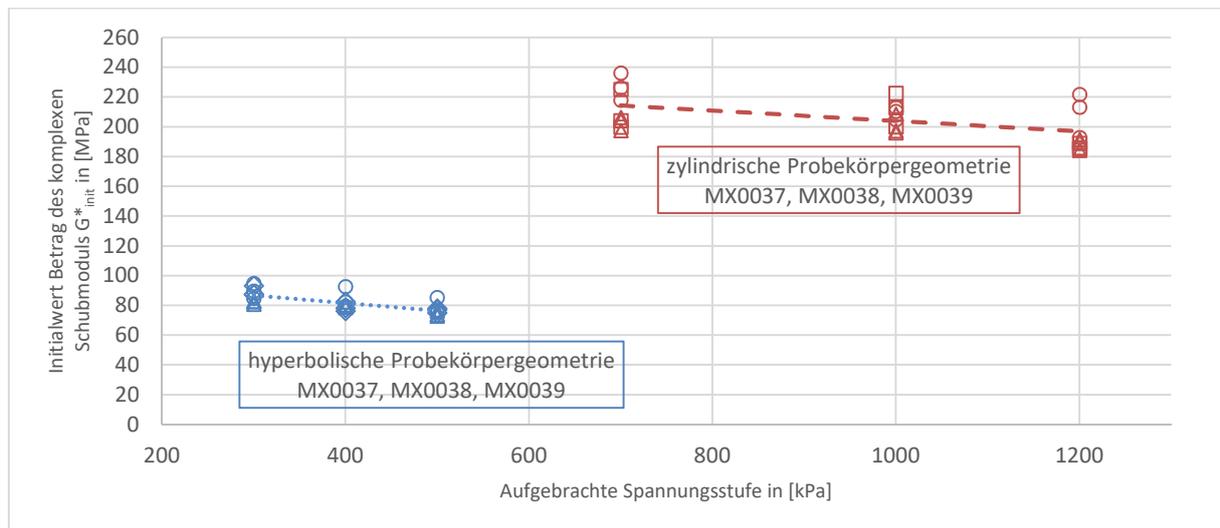


Abbildung 38: Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls zyl. und hyp. PK (TS spannungsgesteuert)

Tabelle 11: Verhältnis der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls (TS-spannungsgesteuert)

Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert)	MX0037 <i>Kalksteinmehl + OMV 70/100</i>	MX0038 <i>Quarzpulver + OMV 70/100</i>	MX0039 <i>Marmorpulver + OMV 70/100</i>
Zylindrische Probekörpergeometrie: Mittelwert der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls $ G^*_{init,zyl} $	202,8 MPa	197,3 MPa	215,2 MPa
Hyperbolische Probekörpergeometrie: Mittelwert der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls $ G^*_{init,hyp} $	84,6 MPa	78,7 MPa	81,8 MPa
Verhältnis $ G^*_{init,zyl} / G^*_{init,hyp} $	Aufgrund unterschiedlicher Spannungsniveaus nicht direkt vergleichbar		

Hinsichtlich der Bewertung des Ermüdungsverhaltens lassen sich die Ergebnisse aus den spannungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen gemäß Abbildung 32 bis Abbildung 37, aufgrund ähnlicher Verläufe der jeweiligen, sortenspezifischen Wöhlerkurven und trotz Unterschiede in den aufgebrachten Spannungsniveaus zwischen zylindrischen ($700 \text{ kPa} \leq \sigma \leq 1200 \text{ kPa}$) und hyperbolischen Probekörpern ($300 \text{ kPa} \leq \sigma \leq 500 \text{ kPa}$), miteinander verknüpfen. Dadurch zeigt sich, dass unabhängig vom verwendeten Ermüdungskriterium die Mastixsorte MX0038 bei höheren Belastungen über das beste und bei niedrigeren Belastungen über das schlechteste Ermüdungsverhalten aller untersuchten Mastixsorten verfügt. Die Mastixsorte MX0039 weist in weiterer Folge bei mittleren und niedrigeren Beanspruchungen das beste Ermüdungsverhalten sowie die Mastixsorte MX0037 bei hohen und mittelgroßen Beanspruchungen das schlechteste Ermüdungsverhalten auf (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Reihung der Mastixsorten hinsichtlich Ermüdungsverhalten (TS-spannungsgesteuert)

Legende: + = Bestes Ermüdungsverhalten, ○ = zweitbestes Ermüdungsverhalten, - = schlechtestes Ermüdungsverhalten			
aufgebrachtes Spannungsniveau	Reihung der untersuchten Mastixsorten nach dem Ermüdungsverhalten (Prüfverfahren: Time-Sweep - spannungsgesteuert)		
	MX0037 <i>Kalksteinmehl + OMV 70/100</i>	MX0038 <i>Quarzpulver + OMV 70/100</i>	MX0039 <i>Marmorpulver + OMV 70/100</i>
hoch	-	+	○
mittelgroß	-	○	+
niedrig	○	-	+

Legende: + = Bestes Ermüdungsverhalten, ○ = zweitbestes Ermüdungsverhalten, - = schlechtestes Ermüdungsverhalten

10.4 Ermüdung gemäß Linear-Amplitude-Sweep-Test (LAS)

10.4.1 Allgemeines

Die ausgewerteten Prüfergebnisse aus den durchgeführten LAS-Prüfungen an zylindrischen und hyperbolischen Probekörpern, sowie die daraus abgeleiteten Wöhlerkurven zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens der drei untersuchten Mastixsorten, werden in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt.

Der aus der Modellbildung des Linear-Amplitude-Sweep-Prüfverfahren abgeleitete Formelapparat zur Auswertung dieses Prüfverfahrens gemäß AASTHO TP101 [35], bezieht sich auf die Verwendung einer definierten, zylindrischen Probekörpergeometrie (siehe Abschnitt 2.3). Die Anwendbarkeit dieser Auswertarithmetik auf Prüfergebnisse, die infolge der Verwendung hyperbolischer Probekörpergeometrie ermittelt wurden, ist daher voraussichtlich nur in eingeschränktem Maße gegeben. Genauere Untersuchungen zur Anwendbarkeit dieser Auswertarithmetik bzw. zu deren Adaptierung für die Möglichkeit der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von hyperbolischen Probekörpern, müssen zukünftig noch genauer untersucht werden und sind nicht Teil der gegenständlichen Arbeit. Dennoch wurden LAS-Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern durchgeführt und gemäß AASTHO TP101 [35] ausgewertet, um etwaig vorhandene Korrelationen zu den Prüfungsergebnissen an zylindrischen Probekörpern zumindest ansatzweise aufzeigen zu können.

10.4.2 Prüfungen mit zylindrischen Probekörpern

Abbildung 39 zeigt die Darstellung der LAS-Wöhlerkurven der drei untersuchten Mastixsorten unter Anwendung der Auswertarithmetik gemäß AASTHO TP101 [35] und unter Verwendung der darin definierten, zylindrischen Probekörpergeometrie. In diesem Diagramm wird die Anzahl der Lastspiele bis zum Ermüdungseintritt infolge einer oszillierenden Beanspruchung mit einer Dehnungsamplitude von $\gamma = 2,5\%$ bzw. $5,0\%$ aus jenen Kennwerten rückgerechnet, die während der frequenz- bzw. dehnungsgesteuerten Versuchsdurchführung (siehe Abschnitt 2.3) ermittelt wurden.

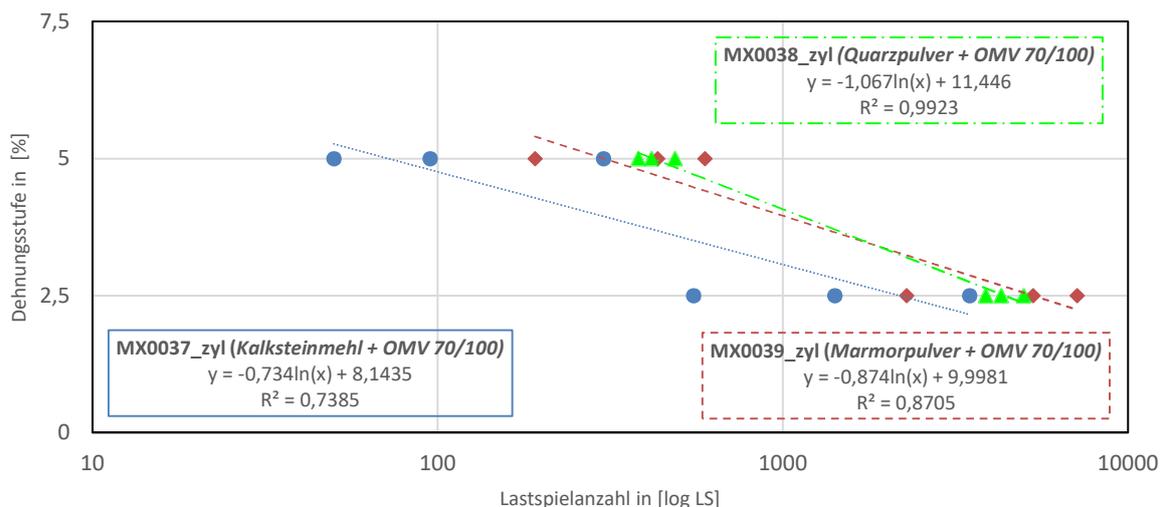


Abbildung 39: Auswertung der LAS-Prüfungen am zylindrischen Probekörper

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Wöhlerkurven der drei untersuchten Mastixsorten schwanken zwischen $R^2 = 0,74$ (MX0037) und $R^2 = 0,99$ (MX0038) und weisen daher nur auf eine eingeschränkte Korrelation zwischen den einzelnen Prüfergebnissen und den daraus abgeleiteten Wöhlerkurven hin.

Verlauf der Ermüdungskurve:

Gemäß Abbildung 39 weisen die beiden Mastixsorten MX0037 und MX0039 einen annähernd parallelen Verlauf ihrer Wöhlerkurven auf, d.h. beide Mastixsorten reagieren hinsichtlich der Veränderung des Zeitpunkts des Ermüdungseintritts in einem ähnlichen Ausmaß auf Änderungen in der aufgebrachtten Beanspruchung. Der Verlauf der Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0038 weist dagegen ein stärkeres Gefälle als jenes der beiden anderen Mastixsorten auf.

Ermüdungsbeständigkeit:

Hinsichtlich der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens lässt sich feststellen, dass die Mastixsorte MX0038 im höheren Beanspruchungsbereich ($\gamma = 5,0\%$) über das beste Ermüdungsverhalten verfügt, während im niedrigeren Beanspruchungsbereich ($\gamma = 2,5\%$) die Mastixsorte MX0039 die ausgeprägteste Ermüdungsresistenz besitzt. Die Mastixsorte MX0037 weist dagegen bei beiden Beanspruchungsniveaus das schlechteste Ermüdungsverhalten auf.

10.4.3 Prüfungen mit hyperbolischen Probekörpern

Abbildung 40 zeigt die Darstellung der LAS-Wöhlerkurven der drei untersuchten Mastixsorten unter Anwendung der Auswertarithmetik gemäß AASTHO TP101 [35] und unter Verwendung einer hyperbolischen Probekörpergeometrie. Darin wird die Anzahl der Lastspiele bis zum Ermüdungseintritt infolge einer oszillierenden Beanspruchung mit einer Dehnungsamplitude von $\gamma = 2,5\%$ bzw. $5,0\%$ aus jenen Kennwerten berechnet, die während der frequenz- bzw. dehnungsgesteuerten Versuchsdurchführung (siehe Abschnitt 2.3) ermittelt wurden.

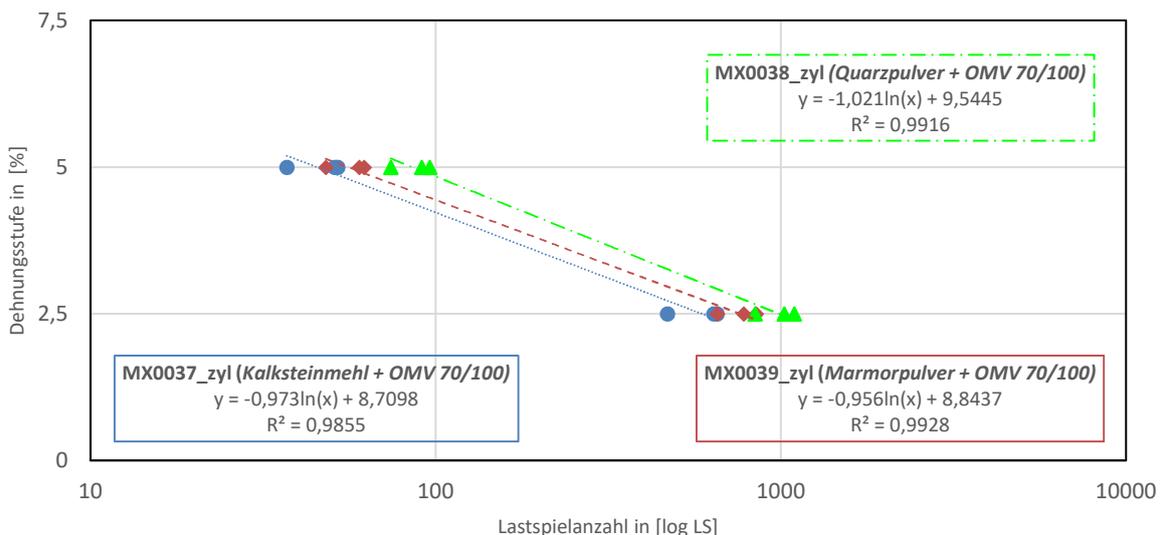


Abbildung 40: Auswertung der LAS-Prüfungen am hyperbolischen Probekörper

Bestimmtheitsmaß/Korrelation:

Da die Bestimmtheitsmaße (R^2) der drei untersuchten Mastixsorten MX0037, MX0038 und MX0039 allesamt bei $R^2 > 0,98$ und daher sehr nahe bei 1,0 liegen, weisen die abgeleiteten Wöhlerkurven der drei Mastixsorten eine gute Korrelation zu den einzelnen Prüfergebnissen auf.

Verlauf der Ermüdungskurve:

Gemäß Abbildung 40 weisen alle drei untersuchten Mastixsorten MX0037, MX0038 und MX0039 einen annähernd parallelen Verlauf ihrer Wöhlerkurven auf, d.h. die drei Mastixsorten reagieren hinsichtlich der Veränderung des Zeitpunkts des Ermüdungseintritts in einem ähnlichen Ausmaß auf Änderungen in der aufgebrachten Beanspruchung.

Ermüdungsbeständigkeit:

Hinsichtlich der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens lässt sich feststellen, dass die Mastixsorte MX0038 sowohl höheren Beanspruchungsbereich ($\gamma = 5,0\%$) als auch im niedrigeren Beanspruchungsbereich ($\gamma = 2,5\%$) über das beste Ermüdungsverhalten verfügt. Die Mastixsorte MX0039 weist die das zweitbeste Ermüdungsverhalten auf, gefolgt von der Mastixsorte MX0037 die bei beiden Beanspruchungsniveaus das schlechteste Ermüdungsverhalten zeigt.

10.4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Auswertungen der Ergebnisse der LAS-Prüfungen an zylindrischer (Abbildung 39) und hyperbolischer Probekörpergeometrie (Abbildung 40) zeigen trotz der in Abschnitt 10.4.1 beschriebenen, eingeschränkten Anwendbarkeit der Auswertearithmetik teilweise ähnliche Wöhlerkurven-Verläufe.

So weisen die Wöhlerkurven der Mastixsorten MX0037 und MX0039 bei beiden Probekörpergeometrien annähernd parallele Verläufe auf, d.h. beide Mastixsorten reagieren hinsichtlich der Veränderung des Zeitpunkts des Ermüdungseintritts in einem ähnlichen Ausmaß auf Änderungen im aufgebrachten Beanspruchungsniveau. Die Ermüdungskurve der Mastixsorte MX0038 weist dagegen bei einer zylindrischen Probekörpergeometrie eine deutlich stärkere Neigung auf als jene der beiden übrigen Mastixsorten. Bei Verwendung der hyperbolischen Probekörpergeometrie weist die Ermüdungskurve von MX0038 dagegen einen annähernd parallelen Verlauf, in Bezug auf die Wöhlerkurven der Mastixsorten MX0037 und MX0039, auf.

Beim Vergleich der Wöhlerkurven der untersuchten Mastixsorten aus Abbildung 39 und Abbildung 40 lässt sich ebenfalls erkennen, dass bei LAS-Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern, trotz gleicher Versuchsdurchführung, ein ermüdungsbedingtes Versagen früher eintritt als bei Prüfungen an zylindrischen Probekörpern. Dies lässt sich auf die geometriebedingt deutlich größere Widerstandsfähigkeit des zylindrischen Probekörpers gegen Schubbeanspruchung zurückführen, welche sich unter anderem in deutlich größeren Anfangswerten für den Betrag des komplexen Schubmoduls widerspiegeln (siehe Abbildung 41 bzw. Tabelle 13).

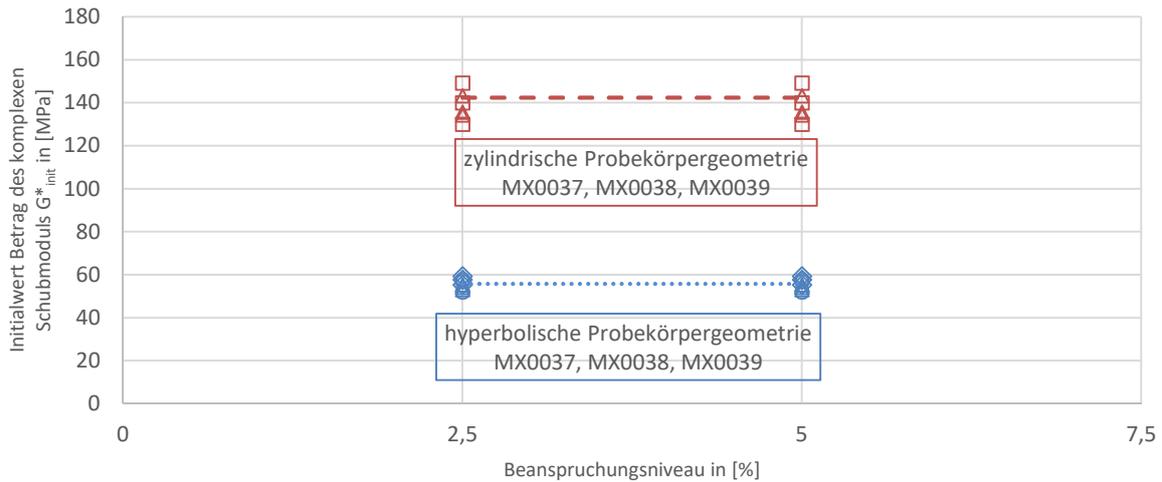


Abbildung 41: Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls zyl. und hyp. PK (LAS)

Tabelle 13: Verhältnis der Initialwerte des komplexen Schubmoduls (LAS-Prüfung)

Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert)	MX0037 <i>Kalksteinmehl + OMV 70/100</i>	MX0038 <i>Quarzpulver + OMV 70/100</i>	MX0039 <i>Marmorpulver + OMV 70/100</i>
Zylindrische Probekörpergeometrie: Mittelwert der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls $ G^*_{init,zyl} $	139,9 MPa	137,8 MPa	149,4 MPa
Hyperbolische Probekörpergeometrie: Mittelwert der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls $ G^*_{init,hyp} $	55,6 MPa	54,3 MPa	57,5 MPa
Verhältnis $ G^*_{init,zyl} / G^*_{init,hyp} $	2,52	2,54	2,60

Im Zuge der Bewertung des Ermüdungsverhaltens der untersuchten Mastixsorten infolge der Durchführung des LAS-Prüfverfahrens, zeigt sich gemäß Abbildung 39 und Abbildung 40, dass beim höheren Beanspruchungsniveau ($\gamma = 5,0\%$), unabhängig der Probekörpergeometrie, die Mastixsorte MX0037 über das schlechteste und die Mastixsorte MX0038 über das beste Ermüdungsverhalten verfügt. Bei der Betrachtung des niedrigeren Beanspruchungsniveaus ($\gamma = 2,5\%$) weisen die Auswertungen für die zylindrische und die hyperbolische Probekörpergeometrie jedoch unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Ermüdungsresistenz auf. Während gemäß der Auswertung von LAS-Versuchen an zylindrischen Probekörpern die Mastixsorte MX0039 über das beste Ermüdungsverhalten verfügt, weist als Ergebnis der Auswertung der Versuche an hyperbolischen Probekörpern die Mastixsorte MX0038 den größten Widerstand gegen Materialermüdung auf.

Aufgrund der eingeschränkten Anwendbarkeit der Auswertearithmetik gemäß AASTHO TP101 [35] auf LAS-Prüfungen mit hyperbolischer Probekörpergeometrie, werden in der nachfolgenden Reihung der untersuchten Mastixsorten nach dem Ermüdungsverhalten (siehe Tabelle 14) nur die Ergebnisse aus Abbildung 39 (Prüfungen an zylindrischer Probekörpergeometrie) berücksichtigt.

Tabelle 14: Reihung der Mastixsorten hinsichtlich Ermüdungsverhalten (LAS)

aufgebrachtes Verformungs- niveau	Reihung der untersuchten Mastixsorten nach dem Ermüdungsverhalten (Prüfverfahren: LAS)		
	MX0037 <i>Kalksteinmehl + OMV 70/100</i>	MX0038 <i>Quarzpulver + OMV 70/100</i>	MX0039 <i>Marmorpulver + OMV 70/100</i>
5,0%	-	+	○
2,5%	-	○	+
Legende: + = Bestes Ermüdungsverhalten, ○ = zweitbestes Ermüdungsverhalten, - = schlechtestes Ermüdungsverhalten			

11 Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Die gegenständlichen Untersuchungen vergleichen das durch unterschiedliche Prüfverfahren an unterschiedlichen Probekörpergeometrien abgeleitete Ermüdungsverhalten von insgesamt drei unterschiedlichen Asphaltmastixsorten. Daraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Anwendung unterschiedlicher Ermüdungskriterien zur Definition des Ermüdungseintritts, führt zu nennenswerten Abweichungen zwischen den Verläufen der Wöhlerkurven, welche infolge der Auswertung spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen ermittelt wurden.
- Im Gegensatz dazu zeigen bei Auswertung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Versuchen die jeweiligen Wöhlerkurven nur dann ähnlichen Ergebnisse, wenn die Ermüdungskriterien $G^*(50\%)$ und DER angewendet werden. Die Annahme des Ermüdungseintritts bei Erreichen des Maximalwerts des Phasenverschiebungswinkels führt zu teilweise abweichenden Resultaten und kann daher als Ermüdungskriterium zur Auswertung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen nicht empfohlen werden.
- Bei allen drei untersuchten Prüfverfahren (Time-Sweep-Prüfverfahren spannungs- bzw. verschiebungsgesteuert sowie LAS-Prüfverfahren) verfügen die aus den Einzelprüfungen abgeleiteten Wöhlerkurven mit wenigen Ausnahmen über sehr hohe Anpassungswerte bzw. Bestimmtheitsmaße ($R^2 > 0,95$). Beim Vergleich der Verläufe einzelnen Wöhlerkurven zeigen sich zwischen den drei Prüfverfahren zum Teil gute Korrelationen. So weisen die LAS-Prüfungen und die spannungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen äquivalente Ergebnisse, betreffend das Ermüdungsverhalten der drei untersuchten Asphaltmastixsorten, auf. Die Ergebnisse der verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen zeigen dagegen für die Asphaltmastixsorte MX0038 ein von den anderen beiden Prüfverfahren abweichendes Ermüdungsverhalten auf.
- Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen zylindrischer und hyperbolischer Probekörpergeometrie lassen sich keine nennenswerten Abweichungen im Ermüdungsverhalten der untersuchten Asphaltmastixsorten feststellen. Zwar weisen die hyperbolischen Probekörper, unabhängig vom angewendeten Prüfverfahren, geometriebedingt niedrigere Anfangswerte für den Betrag des komplexen Schubmoduls auf, wodurch in weiterer Folge Ermüdung rascher eintritt als bei Verwendung zylindrischer Probekörper. Dennoch weisen die ausgewerteten Wöhlerkurven infolge hyperbolischer und zylindrischer Probekörpergeometrie untereinander ähnliche Verläufe auf. Dadurch lassen sich keine Rückschlüsse auf etwaige Adhäsionsversagen ziehen, welche bei vorangegangenen Untersuchungen [12] an der Grenzfläche zwischen der oberen, oszillierenden DSR-Platte und dem Probekörper auftraten.
- Da bei den untersuchten Time-Sweep-Prüfverfahren, infolge der Verwendung hyperbolischer Probekörper, niedrigere Anfangswerte für den Betrag des komplexen Schubmoduls (im Vergleich zu Prüfungen an zylindrischen Probekörpern) auftraten, mussten im Zuge der Versuchsdurchführung vom DSR auch deutlich geringere Schubspannungen aufgebracht werden. Da die Ergebnisse hinsichtlich der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens der untersuchten Asphaltmastixsorten, an beiden Probekörpergeometrien äquivalent sind, stellen die niedrigeren Anforderungen an, die vom DSR-Gerät einzubringenden Schubspannungen,

einen wesentlichen Vorteil zugunsten der Verwendung hyperbolischer Probekörper dar. In diesem Fall könnten auch noch ältere DSR-Geräte zur Prüfung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix verwendet werden, welche nur begrenzte Schubspannungen bzw. Drehmomente aufbringen können und daher für die Prüfung von zylindrischen Asphaltmastixprobekörpern ungeeignet wären. Aufgrund dessen wird bei spannungs- bzw. verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen, welche zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix durchgeführt werden, die Verwendung von hyperbolischen Probekörpern empfohlen. Im Gegensatz dazu wird bei Anwendung des LAS-Prüfverfahrens zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix, aufgrund der ungewissen Anwendbarkeit des zugehörigen Auswerteverfahrens auf eine hyperbolische Probekörpergeometrie, auch weiterhin die Verwendung zylindrischer Probekörper empfohlen. Die empfohlenen Probekörpergeometrien sind in Abhängigkeit der untersuchten Prüfverfahren in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Übersicht der empfohlenen Probekörpergeometrie

Untersuchtes Prüfverfahren:	Empfohlene Probekörpergeometrie:
Time-Sweep (verschiebungsgesteuert)	hyperbolisch
Time-Sweep (spannungsgesteuert)	hyperbolisch
Linear Amplitude Sweep (LAS)	zylindrisch

11.2 Ausblick

Die Ergebnisse der gegenständlichen Arbeit beschränken sich auf eine verwendete Bitumensorte (OMV 70/100) und drei verwendete Füllersorten (Kalksteinmehl, Marmorpulver und Quarzpulver). Weiterführende Untersuchungen an zusätzlichen Bitumen- und Füllersorten sind notwendig um die Anwendbarkeit der drei untersuchten Prüfverfahren hinsichtlich der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmastix besser beurteilen zu können. Vor allem die zum Teil vorhandenen Korrelationen zwischen den Ergebnissen der drei Prüfverfahren müssen an weiteren Asphaltmastixkompositionen und mit weiteren Beanspruchungsniveaus geprüft und zusätzlich mit den Ergebnissen vergleichender Prüfverfahren bzw. von Langzeituntersuchungen verglichen werden.

Weiters beziehen sich die Ergebnisse der gegenständlichen Arbeit auf die angewendeten Prüfparameter gemäß Abschnitt 8.1.1, 8.2.1 und 8.3.1. Zukünftig können weiterführende Untersuchungen mit davon abweichenden Prüfparametern durchgeführt werden, um beispielsweise die Beeinflussung der Prüfergebnisse durch geringere initiale Werte für den Betrag des komplexen Schubmoduls zu untersuchen.

12 Verzeichnisse

12.1 Literaturverzeichnis

- [1] M. HOSPODKA, B. HOFKO, R. BLAB: „Auswirkungen des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix – Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriteriums“, Wien, IVWS, 2017
- [2] M. LIAO, J. CHEN, K. ZHOU: „Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures“, Hainan, American Society of Civil Engineers Vol. 24, Nr. 7, S. 916-923, 2012
- [3] ÖNORM EN 933-10: „Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen - Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung).“, Wien, Austrian Standards Institute, 2009-08-15
- [4] BJ. SMITH, SAM. HESP: „Crack pinning in asphalt mastic and concrete: Regular fatigue studies.“, Kingston, Transportation Research Record, 1728(1), 75–81, 2000
- [5] YR. KIM, DN. LITTLE, IJ. SONG: „Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: Mechanistic evaluation“, College Station, Transportation Research Record, 1832(1), 1–8, 2003
- [6] W. MARTONO, H. BAHIA, J. D’ANGELO: „Effect of testing geometry on measuring fatigue of asphalt binders and mastics.“, Madison, Journal of Materials in Civil Engineering 19(9):746-752, 2007
- [7] R. BLAB, L. EBERHARDSTEINER: „Skriptum zur Vorlesung konstruktiver Straßenbau.“, Wien, TU Wien, 2016
- [8] ÖNORM EN 14770: „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR).“, Wien, Austrian Standards Institute, 2012-07-15
- [9] EN 14770: „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel –Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR).“, Brüssel, CEN Europäisches Komitee für Normung, 05/2012
- [10] DIN 53019-4: „Rheometrie - Messung von Fließeigenschaften mit Rotationsrheometern - Teil 4: Oszillationsrheologie.“, Berlin, Deutsches Institut für Normung e. V. , 10/2016
- [11] ASTM D7175: „Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.“, ASTM International, 2015-07-01
- [12] M. HOSPODKA, B. HOFKO, R. BLAB: „Introducing a new specimen shape to assess the fatigue performance of asphalt mastic by dynamic shear rheometer testing“, Wien, Springer, 2018
- [13] L. SHAN ET AL: „Separation of thixotropy from fatigue process of asphalt binder.“, Harbin, Transportation Research Record, 2207(1), 89–98, 2011
- [14] L. SHAN ET AL: „Application of thixotrophy to analyze fatigue and healing characteristics of Asphalt Binder.“, Harbin, Transportation Research Record, 2179(1), 85–92, 2010
- [15] YR. KIM, DN. LITTLE, RL. LYTON: „Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures“, College Station, Journal of Materials in Civil Engineering, Band 15, Ausgabe 1, 75-83, 2003

- [16] YR. KIM: „Evaluation of healing and constitutive modeling of asphalt concrete by means of the theory of nonlinear viscoelasticity and damage mechanics.“, College Station, Phd thesis, Texas A&M Univ., 1988
- [17] YR. KIM, SL. WHITMOYER, DN. LITTLE: „Healing in asphalt concrete pavements: is it real?“, College Station, Transportation Research Record 1454, 89–96., 1994
- [18] H. BAHIA, H. ZHAI, K. BONETTI, S. KOSE: „Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders.“, Madison, J. Assn. Asphalt Paving Technologists, 68, 1–34 , 1999
- [19] K. BONETTI, K. NAM, H. BAHIA: „Measuring and defining fatigue behavior of asphalt binders“, Madison, Transportation Research Record 1810, 33-43, 2002
- [20] AASHTO T315: „Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)“, Washington D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020
- [21] PAVEMENT INTERACTIVE: Verfügbar unter: <https://pavementinteractive.org>, (Zugriff am 11.08.2020)
- [22] AASHTO PROVISIONAL STANDARDS APRIL 2000 EDITION: „Standard specifications for transportation materials“, Washington D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials, 2000
- [23] C. JOHNSON, H. BAHIA: „Evaluation of an accelerated procedure for fatigue characterization of asphalt binders“, Madison, Dissertation University of Wisconsin-Madison, 2010
- [24] F. ZHOU, W. MOGAWER, H. LI, A. ANDRIESCU, A. COPELAND: „Evaluation of Fatigue Tests for Characterizing Asphalt Binders“, College Station, Journal of Materials in Civil Engineering 25(5):610-617, 2013
- [25] M. SABOURI, D. MIRZAIYAN, A. MONIRI: „Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance“, Teheran, Elsevier, 2018
- [26] KD. STUART, WS. MOGAWER, P. ROMERO: „Validation of the superpave asphalt binder fatigue cracking parameter using an accelerated loading facility.“, Dartmouth, Journal. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, 2000, pp. 116-146, 2002
- [27] JA. DEACON, ET AL.: „Influence of binder loss modulus on the fatigue performance of asphalt concrete pavements.“, Lexington, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 66, 633-668, 1997
- [28] H. BAHIA, ET AL.: „Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design“, Madison, Transportation Research Record (459), 176p, 2001
- [29] H. BAHIA, ET AL.: „Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior (with discussion)“, Madison, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (70), 442-470, 2001
- [30] A. ANDRIESCU, SAM. HESP, J. YOUTCHEFF: „Essential and Plastic Works of Ductile Fracture in Asphalt Binders“, Washington D.C., Transportation Research Record (1875), 1-7, 2004
- [31] BW. TSAI, ET AL.: „Influence of asphalt binder properties on the fatigue performance of asphalt concrete pavements“, Berkeley, urnal of the Association of Asphalt Paving Technologists (74), 733-789, 2005

- [32] C. HINTZ, H. BAHIA: „Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in the dynamic shear rheometer“, Madison, Road Mater Pavement Des 14, 231-251, 2013
- [33] DA. Anderson, ET AL.: „Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders“, State College, Transportation Research Record, 1766(1), 48–56, 2001
- [34] JP Planche, ET AL.: „Evaluation of fatigue properties of bituminous binders“, State College, Materials and Structures 37,356-359, 2004
- [35] AASHTO TP101: „Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep“, Washington D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012
- [36] C. HINTZ, ET AL.: „Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification“, Madison, Transportation Research Record, 2207(1), 99–106, 2011
- [37] ÖNORM EN 16659: „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test).“, Wien, Austrian Standards Institute, 2016-03-01
- [38] MTO LS-299: „Method of test for the determination of asphalt cement’s resistance to ductile failure using double edge notched tension test (DENT).“, Toronto, Ministry of Transportation, Ontario, Revision 27, 2001-04-12
- [39] I. OMARI, V. AGGARWAL, SAM HESP: „Investigation of two Warm Mix Asphalt additives“, Kingston, International Journal of Pavement Research and Technology, 2016
- [40] N. GIBSON, ET AL.: „Full-scaled accelerated performance testing for Superpave and structural validation“, Washington D.C., Federal Highway Administration FHWA-RT-01946, 2011
- [41] M. PALIUKAITE, ET AL.: „Implementation of the Double-Edge-Notched test for asphalt cement acceptance.“, Vilnius, Transportation in Developing Economies 3(1):6, 2017
- [42] YR. KIM, I. SONG, D. LITTLE: „Use of dynamic mechanical analysis to predict damage in asphalt mastic.“, Austin, International Center for Aggregates Research 11th Annual Symposium: Aggregates - Asphalt Concrete, Bases and Fines, 2003
- [43] VTF. CASTELO BRANCO, ET AL.: „Fatigue Analysis of Asphalt Mixtures Independent of Mode of Loading.“, College Station, Transportation Research Record, 2057(1), 149–156, 2008
- [44] ÖNORM EN 12697-24: „Asphalt - Prüfverfahren - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung.“, Wien, Austrian Standards Institute, 2019-04-01
- [45] R. REESE: „Properties of aged asphalt binder related to asphalt concrete fatigue life.“, Salt Lake City, Asphalt Paving Technology, 1997
- [46] KA. GHUZLAN, SH. CARPENTER: „An Energy-Derived/Damage-Based Failure Criteria for Fatigue Testing.“, Urbana, Transportation Research Record, 1723(1), 141–149, 2000
- [47] AC. PRONK, PC. HOPMAN: „Energy dissipation: the leading factor of fatigue.“, London, Highway Research: Sharing the Benefits. The United States Strategic Highway Research Program, 1990
- [48] AC. PRONK: „Evaluation of the dissipated energy concept for the interpretation of fatigue measurements in the crack initiation phase.“, Delft, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1997

- [49] YR. KIM, HJ. LEE, DN. LITTLE: „Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory (with discussion).“, College Station, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists 66, 1997
- [50] RG. HICKS, ET AL.: „Validation of SHRP binder specification through mix testing (with discussion).“, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists 62, 1993
- [51] DA. WILLIAMS: „Microdamage Healing in Asphalt Concretes: Relating Binder Composition and Surface Energy to Healing Rate.“, College Station, Dissertation Texas A&M University, 1998
- [52] H. WANG, ET AL.: „Fatigue performance of long-term aged crumb rubber modified bitumen containing warm-mix additives.“, Delft, Construction and Building Materials 239, 2020

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsweise des DSR [7]	3
Abbildung 2: Phasenverschiebungswinkel eines viskoelastischen Materials [7]	3
Abbildung 3: Ermüdungsphasen während spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfung	6
Abbildung 4: Resultat Abschnitt 1 - Frequenzabhängige Funktionsgraphen für $ G^* $ und δ [35].....	10
Abbildung 5: Funktionsgraph von N_f in Abhängigkeit von γ_{\max} [35]	12
Abbildung 6: Exemplarische Kriech-Erholungskurve für 10 aufeinanderfolgende Lastzyklen [37]	13
Abbildung 7: Ermittlung Nachgiebigkeit und Rückformung innerhalb eines Lastzyklus [37]	16
Abbildung 8: Hyperbolische Probekörpergeometrie (links) und definierter Versagensquerschnitt (rechts) [12]	26
Abbildung 9: Links und Mitte: Silikonform zur Herstellung zylindrischer Mastixprobekörper (ohne und mit hergestellten Probekörper); Rechts: in DSR eingebauter zylindrischer Probekörper, nach dem Trimmen	26
Abbildung 10: Links: Silikonform zur Herstellung hyperbolischer Mastixprobekörper; Mitte: Eingebaute Silikonform nach dem Einfüllvorgang; Rechts: in DSR eingebauter hyperbolischer Probekörper, nach Entfernung der Silikonform	27
Abbildung 11: Verwendete Messgeräte – Anton Paar MCR302 BJ2012 (links) und Anton Paar MCR302 BJ2019 (rechts)	28
Abbildung 12: Lineare Viskoelastizität – MX0037 (zylindrischer Probekörper)	29
Abbildung 13: Lineare Viskoelastizität – MX0038 (zylindrischer Probekörper)	30
Abbildung 14: Lineare Viskoelastizität – MX0039 (zylindrischer Probekörper)	30
Abbildung 15: Lineare Viskoelastizität – MX0037 (hyperbolischer Probekörper)	31
Abbildung 16: Lineare Viskoelastizität – MX0038 (hyperbolischer Probekörper)	31
Abbildung 17: Lineare Viskoelastizität – MX0039 (hyperbolischer Probekörper)	32
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf von $ G^* $ und δ bei spannungsgesteuerter TS-Prüfung	37
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf von $ G^* $ und δ bei verschiebungsgesteuerter TS-Prüfung	38
Abbildung 20: Anwendung des $G^*(50\%)$ -Kriterium bei verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfung	39
Abbildung 21: Anwendung des δ_{\max} -Kriterium bei verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfung ..	40
Abbildung 22: Anwendung des DER-Kriteriums zur Auswertung spannungsgesteuerter TS-Prüfung ..	41
Abbildung 23: Anwendung des DER-Kriteriums zur Auswertung verschiebungsgesteuerter TS-Prüfung	41
Abbildung 24: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium $G^*50\%$	44
Abbildung 25: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium $G^*50\%$	44
Abbildung 26: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{\max}	45
Abbildung 27: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{\max}	45
Abbildung 28: Abschnittsweise annähernd waagrecht Verlauf des Phasenverschiebungswinkels δ bei Durchführung einer verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfung an einem zylindrischen Mastixprobekörper bei einem geringen Beanspruchungsniveau ($\gamma=0,5\%$)	46
Abbildung 29: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER	47

Abbildung 30: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (verschiebungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER	47
Abbildung 31: Initialwert des Betrags des komplexen Schubmoduls zyl. und hyp. PK (TS verschiebungsgesteuert)	49
Abbildung 32: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium G^* (50%)	50
Abbildung 33: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium $G^*50\%$	51
Abbildung 34: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{max}	52
Abbildung 35: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium δ_{max}	52
Abbildung 36: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am zylindrischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER	53
Abbildung 37: Auswertung der Time-Sweep-Prüfungen (spannungsgesteuert) am hyperbolischen Probekörper mit Ermüdungskriterium DER	54
Abbildung 38: Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls zyl. und hyp. PK (TS spannungsgesteuert).....	55
Abbildung 39: Auswertung der LAS-Prüfungen am zylindrischen Probekörper	57
Abbildung 40: Auswertung der LAS-Prüfungen am hyperbolischen Probekörper.....	58
Abbildung 41: Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls zyl. und hyp. PK (LAS).....	60

12.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abschätzung der Anwendbarkeit der Prüfverfahren.....	23
Tabelle 2: Zusammensetzung der zu untersuchenden Mastixsorten	25
Tabelle 3: Auflistung der LVE Kennwerte für zylindrische Probekörpergeometrie	30
Tabelle 4: Auflistung der LVE Kennwerte für hyperbolische Probekörpergeometrie.....	32
Tabelle 5: Vergleich der LVE-Kennwerte	33
Tabelle 6: Prüfparameter für Time-Sweep-Prüfverfahren (verschiebungsgesteuert)	34
Tabelle 7: Prüfparameter für Time-Sweep-Prüfung (spannungsgesteuert).....	35
Tabelle 8: Prüfparameter für LAS Prüfverfahren	36
Tabelle 9: Verhältnis der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls (TS-verschiebungsgesteuert)	49
Tabelle 10: Reihung der Mastixsorten hinsichtlich Ermüdungsverhalten (TS-verschiebungsgesteuert)	50
Tabelle 11: Verhältnis der Initialwerte des Betrags des komplexen Schubmoduls (TS-spannungsgesteuert).....	56
Tabelle 12: Reihung der Mastixsorten hinsichtlich Ermüdungsverhalten (TS-spannungsgesteuert) ...	56
Tabelle 13: Verhältnis der Initialwerte des komplexen Schubmoduls (LAS-Prüfung).....	60
Tabelle 14: Reihung der Mastixsorten hinsichtlich Ermüdungsverhalten (LAS)	61
Tabelle 15: Übersicht der empfohlenen Probekörpergeometrie.....	63

13 Anhang

Anhang A: Prüfablauf der verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen an zylindrischen Probekörpern:

No.	Prüfschritt	Beschreibung
1	Start	<i>Start des Prüfprogramms und Eingabe der Projektdaten (Mastixbezeichnung, Projektnummer), der Betriebsart (verschiebungsgesteuert) sowie der Größe des eingebrachten Verformungsniveaus.</i>
2	Druckluftkontrolle	<i>Kontrolle ob an DSR-Prüfmaschine bereitgestellte Zuluftstrom $\geq 200\text{l/h}$.</i>
3	Initialisierung des Geräts	<i>Geräteinitialisierung (automatisch).</i>
4	Vorgeben Temperatur	<i>Temperierung auf vorgegebene Temperatur von 15°C (automatisch).</i>
5	Einbau der Prüfgeometrie PP08	<i>Einbau der Platte-Platte-Prüfgeometrie PP08 und anschließend Absenken der Temperierhaube.</i>
6	Nullspaltbestimmung	<i>Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0\text{mm}$) zwischen den beiden Prüfplatten bei 15°C (automatisch).</i>
7	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 600 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
8	Nullspaltbestimmung	<i>Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0\text{mm}$) zwischen den beiden Prüfplatten, bei der späteren Prüftemperatur von 10°C (automatisch).</i>
9	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Einbautemperatur von 60°C mit anschließender, 600 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
10	Bereitschaft Probeneinbau	<i>Wenn zylindrische Probekörper bereit zum Einbau sind, kann der nächste Schritt (Probeneinbau) durch manuelle Bestätigung gestartet werden.</i>

11	Probeneinbau	<i>Obere, bewegliche Prüfplatte wird ca. 10cm vertikal nach oben bewegt um Einbau des zylindrischen Probekörpers zu ermöglichen. Anschließend wird der zylindrische Probekörper auf die Unterseite der oberen Platte gedrückt.</i>
12	Messposition anfahren und trimmen	<i>Obere Prüfplatte bewegt sich wieder zurück in Nullspaltposition. Anschließend Temperierhaube anheben und mit dem Trimmvorgang starten. Nachdem zylindrischer Probekörper fertig getrimmt wurde, Temperierhaube wieder absenken und nächsten Schritt einleiten.</i>
13	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 1000 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
14	Prüfbeginn	<i>Beginn der Prüfung und Start der Aufzeichnung der Prüf- bzw. Messparameter (automatisch).</i>
15	Export/Tabelle	<i>Ende der Prüfung und Speichern der aufgezeichneten Prüf- bzw. Messparameter in Tabellenform (automatisch).</i>
16	Gerät/Zubehör ausschalten	<i>Prüfgerät schaltet sich aus.</i>
17	Prüfende	<i>Ende des Prüfprogramms erreicht.</i>

Anhang B: Prüfablauf der verschiebungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern:

No.	Prüfschritt	Beschreibung
1	Start	<i>Start des Prüfprogramms und Eingabe der Projektdaten (Mastixbezeichnung, Projektnummer), der Betriebsart (verschiebungsgesteuert) sowie der Größe des eingebrachten Verformungsniveaus.</i>
2	Druckluftkontrolle	<i>Kontrolle ob an DSR-Prüfmaschine bereitgestellte Zuluftstrom ≥ 200l/h.</i>
3	Initialisierung des Geräts	<i>Geräteinitialisierung (automatisch).</i>
4	Vorgeben Temperatur	<i>Temperierung auf vorgegebene Temperatur von 15°C (automatisch).</i>
5	Einbau der Prüfgeometrie PP08	<i>Einbau der Platte-Platte-Prüfgeometrie PP08 und anschließend Absenken der Temperierhaube.</i>
6	Nullspaltbestimmung	<i>Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0$mm) zwischen den beiden Prüfplatten bei 15°C (automatisch).</i>
7	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 600 sekündiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
8	Nullspaltbestimmung	<i>Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0$mm) zwischen den beiden Prüfplatten, bei der späteren Prüftemperatur von 10°C (automatisch).</i>
9	Einbau Silikonform	<i>Einlegen der mit einem Gummiring fixierten Silikonform</i>
10	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Einbautemperatur von 130°C mit anschließender, 600 sekündiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
11	Bereitschaft Probeneinbau	<i>Wenn die Mastixprobe auf 180°C erwärmt wurde und zum Eingießen bereit steht, kann der nächste Schritt (Probeneinbau) durch manuelle Bestätigung gestartet werden.</i>

12	Probeneinbau	<i>Obere, bewegliche Prüfplatte wird ca. 10cm vertikal nach oben bewegt um anschließend wird flüssige Mastixprobe in die Silikonform gegossen.</i>
13	Messposition anfahren und trimmen	<i>Obere Prüfplatte bewegt sich wieder zurück in Nullspaltposition. Anschließend Temperierhaube anheben und mit dem Trimmvorgang starten. Nach Trimmen Temperierhaube wieder absenken und nächsten Schritt einleiten.</i>
14	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 600 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
15	Entfernen der Silikonformen	<i>Silikonform entnehmen und Temperierhaube absenken.</i>
16	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 1000 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
17	Prüfbeginn	<i>Beginn der Prüfung und Start der Aufzeichnung der Prüf- bzw. Messparameter (automatisch).</i>
18	Export/Tabelle	<i>Ende der Prüfung und Speichern der aufgezeichneten Prüf- bzw. Messparameter in Tabellenform (automatisch).</i>
19	Gerät/Zubehör ausschalten	<i>Prüfgerät schaltet sich aus.</i>
20	Prüfende	<i>Ende des Prüfprogramms erreicht.</i>

Anhang C: Prüfablauf der spannungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen an zylindrischen Probekörpern:

Nr.	Prüfschritt	Beschreibung
1	Start	<i>Start des Prüfprogramms und Eingabe der Projektdaten (Mastixbezeichnung, Projektnummer), der Betriebsart (spannungsgesteuert) sowie der Größe des eingebrachten Spannungsniveaus.</i>

Die Prüfschritte Nr. 2 – 17 sind identisch zu jenen in Anhang A.

Anhang D: Prüfablauf der spannungsgesteuerten Time-Sweep-Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern:

Nr.	Prüfschritt	Beschreibung
1	Start	<i>Start des Prüfprogramms und Eingabe der Projektdaten (Mastixbezeichnung, Projektnummer), der Betriebsart (spannungsgesteuert) sowie der Größe des eingebrachten Spannungsniveaus.</i>

Die Prüfschritte Nr. 2 – 20 sind identisch zu jenen in Anhang B.

Anhang E: Prüfablauf der LAS-Prüfungen an zylindrischen Probekörpern:

No.	Prüfschritt	Beschreibung
1	Start	<i>Start des Prüfprogramms und Eingabe der Projektdaten (Mastixbezeichnung, Projektnummer), der Betriebsart (LAS) sowie der Größe des eingebrachten Verformungsniveaus.</i>
2	Druckluftkontrolle	<i>Kontrolle ob an DSR-Prüfmaschine bereitgestellte Zuluftstrom $\geq 200\text{l/h}$.</i>
3	Initialisierung des Geräts	<i>Geräteinitialisierung (automatisch).</i>
4	Vorgeben Temperatur	<i>Temperierung auf vorgegebene Temperatur von 15°C (automatisch).</i>
5	Einbau der Prüfgeometrie PP08	<i>Einbau der Platte-Platte-Prüfgeometrie PP08 und anschließend Absenken der Temperierhaube.</i>
6	Nullspaltbestimmung	<i>Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0\text{mm}$) zwischen den beiden Prüfplatten bei 15°C (automatisch).</i>
7	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 600 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
8	Nullspaltbestimmung	<i>Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0\text{mm}$) zwischen den beiden Prüfplatten, bei der späteren Prüftemperatur von 10°C (automatisch).</i>
9	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Einbautemperatur von 60°C mit anschließender, 600 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
10	Bereitschaft Probeneinbau	<i>Wenn zylindrische Probekörper bereit zum Einbau sind, kann der nächste Schritt (Probeneinbau) durch manuelle Bestätigung gestartet werden.</i>
11	Probeneinbau	<i>Obere, bewegliche Prüfplatte wird ca. 10cm vertikal nach oben bewegt um Einbau des zylindrischen Probekörpers zu ermöglichen. Anschließend wird der zylindrische Probekörper auf die Unterseite der oberen Platte gedrückt.</i>

12	Messposition anfahren und trimmen	<i>Obere Prüfplatte bewegt sich wieder zurück in Nullspaltposition. Anschließend Temperierhaube anheben und mit dem Trimmvorgang starten. Nach Trimmen Temperierhaube wieder absenken und nächsten Schritt einleiten.</i>
13	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 1000 sekündiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
14	Prüfbeginn fsweep	<i>Beginn der Prüfung und Start der Aufzeichnung der Prüf- bzw. Messparameter des 1. Prüfabschnitts (automatisch).</i>
15	Wartezeit	<i>Wartezeit von 5min zwischen Ende des 1. Prüfabschnitts und Start des 2. Prüfabschnitts (automatisch).</i>
16	Prüfbeginn LAS	<i>Beginn der Prüfung und Start der Aufzeichnung der Prüf- bzw. Messparameter des 2. Prüfabschnitts (automatisch).</i>
17	Export/Tabelle	<i>Ende der Prüfung und Speichern der aufgezeichneten Prüf- bzw. Messparameter in Tabellenform (automatisch).</i>
18	Gerät/Zubehör ausschalten	<i>Prüfgerät schaltet sich aus.</i>
19	Prüfende	<i>Ende des Prüfprogramms erreicht.</i>

Anhang F: Prüfablauf der LAS-Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern:

No.	Prüfschritt	Beschreibung
1	Start	Start des Prüfprogramms und Eingabe der Projektdaten (Mastixbezeichnung, Projektnummer) sowie der Betriebsart (LAS).
2	Druckluftkontrolle	Kontrolle ob an DSR-Prüfmaschine bereitgestellte Zuluftstrom $\geq 200\text{l/h}$.
3	Initialisierung des Geräts	Geräteinitialisierung (automatisch).
4	Vorgeben Temperatur	Temperierung auf vorgegebene Temperatur von 15°C (automatisch).
5	Einbau der Prüfgeometrie PP08	Einbau der Platte-Platte-Prüfgeometrie PP08 und anschließend Absenken der Temperierhaube.
6	Nullspaltbestimmung	Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0\text{mm}$) zwischen den beiden Prüfplatten bei 15°C (automatisch).
7	Vorgeben Temperatur	Anhaltende Temperierung auf vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 600 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).
8	Nullspaltbestimmung	Bestimmung des Nullspalts ($h=2,0\text{mm}$) zwischen den beiden Prüfplatten, bei der späteren Prüftemperatur von 10°C (automatisch).
9	Einbau Silikonform	Einlegen der mit einem Gummiring fixierten Silikonform
10	Vorgeben Temperatur	Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Einbautemperatur von 130°C mit anschließender, 600 sekundiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).
11	Bereitschaft Probeneinbau	Wenn die Mastixprobe auf 180°C erwärmt wurde und zum Eingießen bereit steht, kann der nächste Schritt (Probeneinbau) durch manuelle Bestätigung gestartet werden.

12	Probeneinbau	<i>Obere, bewegliche Prüfplatte wird ca. 10cm vertikal nach oben bewegt um anschließend wird flüssige Mastixprobe in die Silikonform gegossen.</i>
13	Messposition anfahren und trimmen	<i>Obere Prüfplatte bewegt sich wieder zurück in Nullspaltposition. Anschließend Temperierhaube anheben und mit dem Trimmvorgang starten. Nach Trimmen Temperierhaube wieder absenken und nächsten Schritt einleiten.</i>
14	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 600 sekündiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
15	Entfernen der Silikonformen	<i>Silikonform entnehmen und Temperierhaube absenken.</i>
16	Vorgeben Temperatur	<i>Anhaltende Temperierung auf die vorgegebene Prüftemperatur von 10°C mit anschließender, 1000 sekündiger Wartezeit ab Erreichen der Temperatur (automatisch).</i>
17	Prüfbeginn fsweep	<i>Beginn der Prüfung und Start der Aufzeichnung der Prüf- bzw. Messparameter des 1. Prüfabschnitts (automatisch).</i>
18	Wartezeit	<i>Wartezeit von 5min zwischen Ende des 1. Prüfabschnitts und Start des 2. Prüfabschnitts (automatisch).</i>
19	Prüfbeginn LAS	<i>Beginn der Prüfung und Start der Aufzeichnung der Prüf- bzw. Messparameter des 2. Prüfabschnitts (automatisch).</i>
20	Export/Tabelle	<i>Ende der Prüfung und Speichern der aufgezeichneten Prüf- bzw. Messparameter in Tabellenform (automatisch).</i>
21	Gerät/Zubehör ausschalten	<i>Prüfgerät schaltet sich aus.</i>
22	Prüfende	<i>Ende des Prüfprogramms erreicht.</i>

Anhang G: Auswertung spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen an zylindrischen Probekörpern

Ermüdungskriterium: Erreichen von $G^*(50\%) = 0,5 \cdot G^*_{init}$														
Versuche Mastix MX0037														
Laststufe	G^*_{init} [kPa]	$G^*(50\%)$ berechnet [kPa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	N für $G(50\%)$ interpoliert [LS]	$G^*_{int,zyl} / G^*_{int,lvp}$	Anmerkungen
700kPa 1	700	225294767	112647383,5	25520	765600	112503132	25530	765900	765851	2,66				
700kPa 2	700	200016831	100008415,5	12350	370500	99474074	12360	370800	370648	2,11				
700kPa 3	700	204103904	102051952	14620	438600	101238025	14630	438900	438603	2,28				
1000kPa 1	1000	222723710	111361855	4540	136200	109754378	4550	136500	136248	2,40				
1000kPa 2	1000	200215430	100107715	3050	91500	99569571	3060	91800	91719	2,52				
1000kPa 3	1000	212924398	106462199	3380	101400	105278799	3390	101700	101567	2,58				
1200kPa 1	1200	185883625	92941812,5	1020	30600	91047147	1030	30900	30707	2,46				
1200kPa 2	1200	189047604	94523802	1190	35700	93484251	1200	36000	35933	2,46				
1200kPa 3	1200	185350933	92675466,5	1000	30000	89440795	1010	30300	30128	2,17				
Versuche Mastix MX0039														
Laststufe	G^*_{init} [kPa]	$G^*(50\%)$ berechnet [kPa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	N für $G(50\%)$ interpoliert [LS]	$G^*_{int,zyl} / G^*_{int,lvp}$	Anmerkungen
700kPa 1	700	217989681	108994840,5	28100	843000	108981033	28110	843300	843292	2,48				
700kPa 2	700	226374110	113187055	35240	1057200	113079651	35250	1057500	1057455	2,59				
700kPa 3	700	236112681	118056340,5	40020	1227600	117580934	40030	1227900	1227683	2,53				
1000kPa 1	1000	204792008	102396004	3960	118800	100663042	3970	119100	118914	2,48				
1000kPa 2	1000	212981719	106490859,5	4070	122100	103817691	4080	122400	122207	2,79				
1000kPa 3	1000	210423748	105211874	4130	123900	102914999	4140	124200	124052	2,69				
1200kPa 1	1200	213288613	106644306,5	3050	91500	105736911	3060	91800	91737	2,73				
1200kPa 3	1200	192842796	96421398	1590	47700	94884056	1600	48000	47895	2,50				
1200kPa 5	1200	221867955	110933977,5	3090	92700	110761068	3100	93000	92981	2,88				
Versuche Mastix MX0038														
Laststufe	G^*_{init} [kPa]	$G^*(50\%)$ berechnet [kPa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	N für $G(50\%)$ interpoliert [LS]	$G^*_{int,zyl} / G^*_{int,lvp}$	Anmerkungen
700kPa 1	700	204521211	102260605,5	21570	647100	101649804	21580	647400	647180	2,53				
700kPa 2	700	197492696	98746348	19740	592200	98335430	19750	592500	592294	2,38				
700kPa 3	700	206455091	103227545,5	26690	800700	102786844	26700	801000	800866	2,50				
1000kPa 1	1000	197344159	98672079,5	4270	128100	98395570	4280	128400	128357	2,51				
1000kPa 2	1000	196605361	98002680,5	4910	147300	96797656	4920	147600	147469	2,43				
1000kPa 3	1000	208478110	104239055	5880	176400	103574544	5890	176700	176592	2,63				
1200kPa 1	1200	184245192	92122596	1670	50100	89176373	1680	50400	50218	2,53				
1200kPa 2	1200	189967432	94983716	2230	66900	94334522	2240	67200	67146	2,49				
1200kPa 3	1200	191539416	95769708	2090	62700	93670347	2100	63000	62870	2,59				

Ermüdungskriterium: Erreichen von δ_{max}

Versuche MX0037

Laststufe	G(100%)	$\delta_{(int)}$	δ_{max}	G(δ_{max})	t(δ_{max})	N für G(δ_{max})	Anmerkungen
					[s]	15	
kPa							
700kPa 1	225294767	34,816	43,274	38364,628	25950	778500	
700kPa 2	200016831	35,785	47,701	8733,059	12720	381600	
700kPa 3	204103904	35,133	54,274	595,259	15010	450300	
1000kPa 1	222723710	36,373	56,764	2454,491	4690	140700	
1000kPa 2	200215430	37,103	64,876	996,665	3170	95100	
1000kPa 3	212924398	36,575	54,169	1100,975	3520	105600	
1200kPa 1	185883625	37,459	52,184	859,929	1120	33600	
1200kPa 2	189047604	37,606	54,145	8668,412	1260	37800	
1200kPa 3	185350933	37,797	54,558	2166,965	1060	31800	

Versuche MX0039

Laststufe	G(100%)	$\delta_{(int)}$	δ_{max}	G(δ_{max})	t(δ_{max})	N für G(δ_{max})	Anmerkungen
					sec	15	
kPa							
700kPa 1	217989681	34,701	43,754	37133880	28590	857700	
700kPa 2	226374110	34,014	42,438	37994249	35750	1072800	
700kPa 3	236112681	34,06	49,304	736465	41440	1243200	
1000kPa 1	204792008	36,92	48,005	36531163	4080	122400	
1000kPa 2	212981719	35,711	47,976	40915611	4160	124800	
1000kPa 3	210423748	35,836	48,519	27196915	4210	126300	
1200kPa 1	213288613	36,496	54,718	711253	3150	94500	
1200kPa 3	192842796	37,297	53,357	9157232	1650	49500	
1200kPa 5	221867955	36,269	49,622	39832777	3200	96000	

Versuche MX0038

Laststufe	G(100%)	$\delta_{(int)}$	δ_{max}	G(δ_{max})	t(δ_{max})	N für G(δ_{max})	Anmerkungen
					sec	15	
kPa							
700kPa 1	204521211	37,361	46,677	33134852	22010	660300	
700kPa 2	197492696	37,436	46,012	33032526	20210	606300	
700kPa 3	206455091	36,55	45,384	39852464	27050	811500	
1000kPa 1	197344159	38,674	50,567	33143150	4420	132600	
1000kPa 2	196005361	38,97	50,684	17084555	5040	151200	
1000kPa 3	208478110	37,736	49,83	1038657	6040	181200	
1200kPa 1	184245192	39,463	55,562	815926	1750	52500	
1200kPa 2	189967432	39,361	53,903	2016216	2310	69300	
1200kPa 3	191539416	39,367	56,957	3213853	2160	64800	

Ermüdungskriterium: Dissipatives Energieverhältnis (DER)

Versuche MX0037							
Bezeichnung	Laststufe	ΣW_i	DER	$G(N_{p20})$	$t(N_{p20})$	N_{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[LS]	
700kPa 1	700	11361469,81	1940,552848	159505794	23930	717900	
700kPa 2	700	6161423,71	905,5329747	140420998	11320	339600	
700kPa 3	700	7080463,944	1077,170653	143082616	13440	403200	
1000kPa 1	1000	4683305,613	337,409107	147191853	4250	127500	
1000kPa 2	1000	3578009,141	223,2729908	129920761	2850	85500	
1000kPa 3	1000	3680484,507	248,6511616	138783074	3160	94800	
1200kPa 1	1200	1842661,61	70,32554156	116791749	910	27300	
1200kPa 2	1200	2233060,834	85,17239842	117464051	1110	33300	
1200kPa 3	1200	1906195,407	71,41510473	115835713	930	27900	
Versuche MX0039							
Bezeichnung	Laststufe	ΣW_i	DER	$G(N_{p20})$	$t(N_{p20})$	N_{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[LS]	
700kPa 1	700	13193350,1	2121,648077	151689820	26570	797100	
700kPa 2	700	15514500,42	2685,727963	159898216	33440	1003200	
700kPa 3	700	17742186,43	3141,89429	163987202	39530	1185900	
1000kPa 1	1000	4519495,947	292,1515305	134983061	3700	111000	
1000kPa 2	1000	4244562,895	304,652313	146114639	3830	114900	
1000kPa 3	1000	4405890,305	311,2212832	144174025	3910	117300	
1200kPa 1	1200	5046793,01	228,1239583	137294180	2910	87300	
1200kPa 3	1200	2942776,853	115,6697145	121968467	1510	45300	
1200kPa 5	1200	4777273,336	227,5116191	143844626	2900	87000	
Versuche MX0038							
Bezeichnung	Laststufe	ΣW_i	DER	$G(N_{p20})$	$t(N_{p20})$	N_{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[LS]	
700kPa 1	700	11587799,1	1620,536529	139901837	20320	609600	
700kPa 2	700	10758758,03	1476,807617	136355970	18470	554100	
700kPa 3	700	13842755,11	2052,334332	145031257	25610	768300	
1000kPa 1	1000	5257411,88	316,0176973	129585068	3990	119700	
1000kPa 2	1000	6287064,541	370,4429623	128160199	4670	140100	
1000kPa 3	1000	6639871,25	442,7113915	140819657	5530	165900	
1200kPa 1	1200	3267505,404	121,6003888	118978591	1560	46800	
1200kPa 2	1200	4348112,977	164,6615023	121354859	2120	63600	
1200kPa 3	1200	4051494,734	154,9419953	122250693	1990	59700	

Anhang H: Auswertung spannungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern

Ermüdungskriterium: Erreichen von $G^*(50\%) = 0,5 \cdot G^*_{init}$														
Versuche Mastix MX0037														
Laststufe	G^*_{init} [kPa]	$G^*(50\%)$ berechnet [kPa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	N für $G(50\%)$ interpoliert [LS]	Anmerkungen	untere Schranke		obere Schranke	
											$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	$G^*(50\%)$ [kPa]
300kPa 1	300	84697986	42348993	42675920	11760	352800	42200239	11770	353100	353006				
300kPa 2	300	94830132	47415066	47469729	11750	352500	47752483	11760	352800	352404				
300kPa 3	300	89713382	44856691	44895124	12760	382800	44596198	12770	383100	382839				
400kPa 1	400	92621837	46310918,5	47504309	3270	98100	46154952	3280	98400	98365				
400kPa 2	400	79575955	39787977,5	40436301	2840	85200	39596509	2850	85500	85432				
400kPa 3	400	82449327	41224663,5	41581124	2770	83100	40509100	2780	83400	83200				
500kPa 1	500	75531212	37765606	38079240	640	19200	35936794	650	19500	19244				
500kPa 2	500	76911972	38455986	39185805	770	23100	36667944	780	23400	23187				
500kPa 3	500	85311084	42655542	44011271	1020	30600	42002792	1030	30900	30803				
Versuche Mastix MX0039														
Laststufe	G^*_{init} [kPa]	$G^*(50\%)$ berechnet [kPa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	N für $G(50\%)$ interpoliert [LS]	Anmerkungen	untere Schranke		obere Schranke	
											$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	$G^*(50\%)$ [kPa]
300kPa 1	300	87755326	43877663	43903506	14210	426300	43628534	14220	426600	426328				
300kPa 2	300	87238998	43619499	43870302	13860	415800	43496620	13870	416100	416001				
300kPa 3	300	93199755	46599877,5	46737327	15500	465000	46339242	15510	465300	465104				
400kPa 1	400	82604049	41302024,5	41329102	3300	99000	40354352	3310	99300	99008				
400kPa 2	400	76454894	38227447	38583999	3180	95400	38009247	3190	95700	95586				
400kPa 3	400	78264294	39132147	39691870	4560	136800	39041010	4570	137100	137058				
500kPa 1	500	78169091	39084545,5	40089954	910	27300	37097564	920	27600	27401				
500kPa 2	500	75033868	37516934	39759919	1410	42300	37364399	1420	42600	42581				
500kPa 3	500	77115233	38557616,5	39594514	1430	42900	36864924	1440	43200	43014				
Versuche Mastix MX0038														
Laststufe	G^*_{init} [kPa]	$G^*(50\%)$ berechnet [kPa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	N für $G(50\%)$ interpoliert [LS]	Anmerkungen	untere Schranke		obere Schranke	
											$G^*(50\%)$ [kPa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$	$G^*(50\%)$ [kPa]
300kPa 1	300	80821247	40410623,5	40622399	10820	324600	40255953	10830	324900	324773				
300kPa 2	300	82836337	41418168,5	41513387	15710	471300	41264708	15720	471600	471415				
300kPa 3	300	82637523	41318761,5	41460718	8370	251100	41291078	8380	251400	251351				
400kPa 1	400	78745351	3937675,5	39556939	3300	99000	38674052	3310	99300	99057				
400kPa 2	400	80522428	40261214	40722665	4000	120000	39489732	4010	120300	120112				
400kPa 3	400	79155794	39577997	39713671	3350	100500	38757945	3360	100800	100543				
500kPa 1	500	72949478	36474739	37834534	860	25800	36033220	870	26100	26026				
500kPa 2	500	76298028	38149014	40084267	1230	36900	37829216	1240	37200	37157				
500kPa 3	500	73960286	36980143	36009181	1050	31500	36541210	1060	31800	31710				

Ermüdungskriterium: Erreichen von δ_{max}

Versuche MX0037									
Laststufe	G(100%)	$\delta_{(int)}$	δ_{max}	G(δ_{max})	t(δ_{max})	N für G(δ_{max})	Anmerkungen		
kPa	kPa	°	°	kPa	sec	LS			
300kPa 1	84697986	35,011	44,669	9433809	12100	363000			
300kPa 2	94830132	34,677	42,773	14908505	12130	363900			
300kPa 3	89713382	34,738	43,234	15647383	13070	392100			
400kPa 1	92621837	35,548	45,282	19529765	3390	101700			
400kPa 2	79575955	36,008	45,674	19296938	2960	88800			
400kPa 3	82449327	35,872	45,997	13156315	2880	86400			
500kPa 1	75531212	38,403	47,873	25221547	670	20100			
500kPa 2	76911972	37,411	50,959	10633215	820	24600			
500kPa 3	85311084	37,037	48,163	20941956	1070	32100			
Versuche MX0039									
Laststufe	G(100%)	$\delta_{(int)}$	δ_{max}	G(δ_{max})	t(δ_{max})	N für G(δ_{max})	Anmerkungen		
kPa	kPa	°	°	kPa	sec	LS			
300kPa 1	87755326	34,396	43,51	13696949	14560	436800			
300kPa 2	87238998	34,62	44,173	13585896	14220	426600			
300kPa 3	93199755	33,58	42,034	1726559	15880	476400			
400kPa 1	82604049	35,597	46,801	7197402	3430	102900			
400kPa 2	76454894	35,509	45,246	11811490	3330	99900			
400kPa 3	78264294	35,447	46,262	8651875	4720	141600			
500kPa 1	78169091	37,106	48,076	23245194	950	28500			
500kPa 2	75033868	37,044	52,502	8219429	1470	44100			
500kPa 3	77115233	36,697	48,976	17452122	1480	44400			
Versuche MX0038									
Laststufe	G(100%)	$\delta_{(int)}$	δ_{max}	G(δ_{max})	t(δ_{max})	N für G(δ_{max})	Anmerkungen		
kPa	kPa	°	°	kPa	sec	LS			
300kPa 1	80821247	36,368	44,307	14637322	11190	335700			
300kPa 2	82836337	36,496	46,112	15185425	16030	480900			
300kPa 3	82637523	36,189	43,82	14066591	8890	266700			
400kPa 1	78745351	37,734	49,353	14012447	3450	103500			
400kPa 2	80522428	37,848	49,178	12609729	4120	123600			
400kPa 3	79155794	37,298	47,89	11257111	3490	104700			
500kPa 1	72949478	39,139	50,243	12146408	930	27900			
500kPa 2	76298028	39,115	52,795	2368379	1300	39000			
500kPa 3	73960286	39,072	49,989	16729742	1110	33300			

Ermüdungskriterium: Dissipatives Energieverhältnis

Versuche MIX0037							
Bezeichnung	Laststufe	ZW _i	DER	G(N _{p20})	t(N _{p20})	N _{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[S]	
300K.Pa.1	300	2657579,17	878,0155583	57207216	10970	329100	
300K.Pa.2	300	2362287,212	861,6403973	62985108	10830	324900	
300K.Pa.3	300	2759354,461	952,3054982	59593557	11940	358200	
400K.Pa.1	400	1330198,469	240,5614387	58208025	3090	92700	
400K.Pa.2	400	1306526,753	205,1213964	50928954	2630	78900	
400K.Pa.3	400	1230196,062	200,1395735	52551853	2560	76800	
500K.Pa.1	500	538752,9254	45,13787912	45645805	590	17700	
500K.Pa.2	500	595622,5708	53,82833023	48102906	690	20700	
500K.Pa.3	500	747370,9466	73,58689123	52089493	960	28800	
Versuche MIX0039							
Bezeichnung	Laststufe	ZW _i	DER	G(N _{p20})	t(N _{p20})	N _{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[S]	
300K.Pa.1	300	3117370,827	1060,782293	59000048	13270	398100	
300K.Pa.2	300	3044194,245	1032,68691	58977830	12910	387300	
300K.Pa.3	300	3038577,893	1137,349012	63500953	14290	428700	
400K.Pa.1	400	1466882,851	240,7638569	53429960	3080	92400	
400K.Pa.2	400	1527964,346	228,7347531	48774129	2930	87900	
400K.Pa.3	400	2145254,322	333,8569135	50661302	4250	127500	
500K.Pa.1	500	703223,5518	64,33893294	48927905	840	25200	
500K.Pa.2	500	1220074,338	103,847518	45948406	1350	40500	
500K.Pa.3	500	1170250,251	104,7732518	47804164	1360	40800	
Versuche MIX0038							
Bezeichnung	Laststufe	ZW _i	DER	G(N _{p20})	t(N _{p20})	N _{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[S]	
300K.Pa.1	300	2619528,972	795,3140273	54556716	9970	299100	
300K.Pa.2	300	3966434,932	1183,063971	54320837	14880	446400	
300K.Pa.3	300	1894208,689	565,8557214	53619214	7110	213300	
400K.Pa.1	400	1628428,244	237,0921151	49605310	3040	91200	
400K.Pa.2	400	1978370,19	297,3314487	51132752	3790	113700	
400K.Pa.3	400	1617404,31	243,2068655	50590903	3120	93600	
500K.Pa.1	500	735394,8536	59,7873252	44880738	780	23400	
500K.Pa.2	500	1076478,859	89,61670163	46433297	1170	35100	
500K.Pa.3	500	878618,0541	73,87317239	46322278	950	28500	

Anhang I: Auswertung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen an zylindrischen Probekörpern

Ermüdungskriterium: Erreichen von $G^*(50\%) = 0,5 \cdot G^*_{init}$													
Versuche Mastix MX0037													
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{init} [Pa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	$G^*(50\%)$ [Pa]	untere Schranke			obere Schranke			$G^*_{init,xy}$ / $G^*_{init,hy}$	Anmerkungen	
					t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [Pa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [Pa]			
0,5% 1	0,5	213487201	106743801	107062242	7740	217200	106661494	7250	217500	217439	2,35		
0,5% 2	0,5	188733312	94366156	94562568	9700	291000	94331731	9710	291300	291255	2,38		
0,5% 3	0,5	192121414	96060707	96115145	8770	263100	95847981	8780	263400	263161	2,14		
0,5% 4	0,5	196598180	98299090	98479652	9140	274200	98223971	9150	274500	274412			
0,75% 1	0,75	189171618	94585809	9556133	1760	52800	94480394	1770	53100	53100	2,63		
0,75% 2	0,75	186926144	93463072	93536204	1900	57000	92767514	1910	57300	57029	2,41		
0,75% 3	0,75	176462899	88231449,5	88481181	1960	58800	87538055	1970	59100	58879	2,19		
1,0% 1	1,0	168863096	84431548	85327092	690	20700	83231542	700	21000	20828	2,47		
1,0% 2	1,0	177034475	88517237,5	86696307	650	19500	84557546	660	19800	19245	2,52		
1,0% 3	1,0	167843092	83921546	84420719	760	22800	82199754	770	23100	22867	2,26		
Versuche Mastix MX0039													
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{init} [Pa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	$G^*(50\%)$ [Pa]	untere Schranke			obere Schranke			$G^*_{init,xy}$ / $G^*_{init,hy}$	Anmerkungen	
					t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [Pa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [Pa]			
0,5% 1	0,5	196032256	98016128	98151284	10510	315300	97908473	10520	315600	315467	2,33		
0,5% 2	0,5	198868575	99434287,5	99486997	10530	315900	99277707	10540	316200	315976	2,30		
0,5% 3	0,5	200448208	100224104	100431650	11190	335700	100177127	11200	336000	335945	2,41		
0,75% 1	0,75	18798498	93992499	94733382	2470	71400	9379790	2480	74400	74333	2,44		
0,75% 2	0,75	194422187	97211093,5	97637303	2700	81000	96814298	2710	81300	81155	2,53		
0,75% 3	0,75	176563430	88281715	88950776	2380	71400	88120280	2390	71700	71642	2,30		
1,0% 1	1,0	173052354	86526177	87856444	980	29400	85481365	990	29700	29568	2,37		
1,0% 2	1,0	181871626	90935813	91213847	810	24300	89085555	820	24600	24339	2,49		
1,0% 3	1,0	175269546	87634773	87942035	920	27600	85810081	930	27900	27643	2,42		
Versuche Mastix MX0038													
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{init} [Pa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	$G^*(50\%)$ [Pa]	untere Schranke			obere Schranke			$G^*_{init,xy}$ / $G^*_{init,hy}$	Anmerkungen	
					t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [Pa]	t [sec]	N für $G^*(50\%)$ [LS]	$G^*(50\%)$ [Pa]			
0,5% 4	0,5	193945008	96972504	97073906	12600	378200	96880046	12610	378300	378157	2,43		
0,5% 5	0,5	193752984	96876492	96929605	13440	403200	96719326	13450	403500	403276	2,48		
0,5% 6	0,5	203492536	101746268	102024151	12870	386100	101736083	12880	386400	386389	2,59		
0,75% 1	0,75	185133902	92566951	92725529	3050	91500	92074223	3060	91800	91573	2,58		
0,75% 2	0,75	189729368	94864684	95520319	2760	82800	94517187	2770	83100	82996	2,60		
0,75% 3	0,75	177306992	88653496	89232983	2960	82800	88460584	2970	83100	89025	2,62		
1,0% 1	1,0	176569700	88284850	89926158	1080	32400	87830696	1090	32700	32635	2,63		
1,0% 2	1,0	170932820	85466410	86904942	1110	33300	85072963	1120	33600	33536	2,53		
1,0% 3	1,0	166158850	83079425	85001064	1090	32700	83068112	1100	33000	32998	2,53		

Ermüdungskriterium: Erreichen von δ_{max}

Versuche Mastix MX0037										
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G_{int}^* [kPa]	δ_{int} [°]	bei Erreichennon 10% Schubmoduls		$G(\delta_{max})$ [kPa]	$t(\delta_{max})$ [sec]	N für δ_{max} [LS]	Anmerkungen	
				δ_{max} [°]	$G(\delta_{max})$ [kPa]					
0,5% 1	0,5	213487201	35,867	37,915	107468,713	7230	216900			
0,5% 2	0,5	188732312	36,588	38,137	160679,079	3340	100200			
0,5% 3	0,5	192121414	35,755	37,496	93160,128	8880	266400			
0,5% 4	0,5	196598180	37,017	38,592		2500	75000			
0,75% 1	0,75	189171618	39,456	41,464	130218,557	1380	41400			
0,75% 2	0,75	186926144	39,305	41,378	140559,644	1180	35400			
0,75% 3	0,75	176462899	36,266	41,122	85652,142	1990	59700			
1,0% 1	1,0	168863096	40,471	42,379	98255,518	630	18900			
1,0% 2	1,0	177034475	40,545	42,729	101384,179	580	17400			
1,0% 3	1,0	167843092	40,725	42,895	82199,754	770	23100			
Versuche Mastix MX0039										
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G_{int}^* [kPa]	δ_{int} [°]	bei Erreichennon 10% Schubmoduls		$G(\delta_{max})$ [kPa]	$t(\delta_{max})$ [sec]	N für δ_{max} [LS]	Anmerkungen	
				δ_{max} [°]	$G(\delta_{max})$ [kPa]					
0,5% 1	0,5	196032256	36,647	38,662	164877,956	4600	138000			
0,5% 2	0,5	198868575	36,822	38,838	168856233	4130	123900			
0,5% 3	0,5	200448208	35,638	37,836	136287825	9620	288600			
0,75% 1	0,75	187984998	39,241	41,89	140839242	1850	55500			
0,75% 2	0,75	194422187	38,107	40,766	131452006	2190	65700			
0,75% 3	0,75	176563430	38,239	40,726	133789915	1670	50100			
1,0% 1	1,0	173052354	40,463	43,118	122506256	760	22800			
1,0% 2	1,0	181871626	40,335	43,004	124716832	640	19200			
1,0% 3	1,0	175269546	40,564	43,248	123112200	720	21600			
Versuche Mastix MX0038										
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G_{int}^* [kPa]	δ_{int} [°]	bei Erreichennon 10% Schubmoduls		$G(\delta_{max})$ [kPa]	$t(\delta_{max})$ [sec]	N für δ_{max} [LS]	Anmerkungen	
				δ_{max} [°]	$G(\delta_{max})$ [kPa]					
0,5% 4	0,5	193945008	38,479	40,336	166374486	4260	127800			
0,5% 5	0,5	193752984	38,489	40,43	164783903	4750	142500			
0,5% 6	0,5	203492536	37,723	39,804	170535920	8340	250200			
0,75% 1	0,75	185133902	41,176	43,455	146834620	1780	53400			
0,75% 2	0,75	189729368	41,117	43,515	151306967	1670	50100			
0,75% 3	0,75	177306992	42,691	42,709	112318075	2680	80400			
1,0% 1	1,0	176569700	42,822	45,385	121662794	900	27000			
1,0% 2	1,0	170932820	42,773	45,265	125077416	850	25500			
1,0% 3	1,0	166158850	43,247	44,908	107978396	960	28800			

Ermüdungskriterium: Dissipatives Energieverhältnis (DER)

Versuche Mastix MX0037							
Bezeichnung	Dehnungsniveau	ZW _i	DER	G(N _{z20})	t(N _{z20})	N _{z20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[S]	
0,5% 1	0,5	5489707,914	828,054	136327144	6470	194100	
0,5% 2	0,5	6522567,346	1163,941	115909987	8730	261900	
0,5% 3	0,5	5509083,370	871,542	131131982	7200	216000	
0,5% 3	0,5					0	
0,75% 1	0,75	2818729,423	222,347	108454569	1640	49200	
0,75% 2	0,75	2891109,547	226,445	109754370	1700	51000	
0,75% 3	0,75	2890637,882	240,461	103306606	1800	54000	
1,0% 1	1,0	1829598,689	95,436	89662211	670	20100	
1,0% 2	1,0	1376754,544	51,446	124416404	450	13500	
1,0% 3	1,0	1353943,705	50,487	124582822	460	13800	
Versuche Mastix MX0039							
Bezeichnung	Dehnungsniveau	ZW _i	DER	G(N _{z20})	t(N _{z20})	N _{z20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[S]	
0,5% 1	0,5	7470036,341	1229,185474	124193996	9430	282900	
0,5% 2	0,5	7520169,366	1209,077235	126687929	9300	279000	
0,5% 3	0,5	8098414,315	1309,91769	127072196	10080	302400	
0,75% 1	0,75	4026396,117	300,7921944	113653854	2280	68400	
0,75% 2	0,75	4371181,082	324,0379965	115800031	2460	73800	
0,75% 3	0,75	3552953,815	284,5945542	107291040	2160	64800	
1,0% 1	1,0	2697618,305	125,9804818	98832498	930	27900	
1,0% 2	1,0	2291941,083	102,1975376	103720167	750	22500	
1,0% 3	1,0	2544069,234	116,1202931	100843205	860	25800	
Versuche Mastix MX0038							
Bezeichnung	Dehnungsniveau	ZW _i	DER	G(N _{z20})	t(N _{z20})	N _{z20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[S]	
0,5% 4	0,5	9215883,106	1464,48863	124181969	11240	337200	
0,5% 5	0,5	9931748,173	1578,940573	123751917	12160	364800	
0,5% 6	0,5	10185931,7	1494,656491	134367500	11580	347400	
0,75% 1	0,75	4895418,67	356,6860777	113326960	2720	81600	
0,75% 2	0,75	4719867,277	334,3934228	116119410	2540	76200	
0,75% 3	0,75	4817659,164	339,344543	117262937	2620	78600	
1,0% 1	1,0	3174830,157	135,5361878	103736350	1010	30300	
1,0% 2	1,0	3134769,966	137,7681702	101028869	1030	30900	
1,0% 3	1,0	3019209,039	132,8085975	101486210	1000	30000	

Anhang J: Auswertung verschiebungsgesteuerter Time-Sweep-Prüfungen an hyperbolischen Probekörpern

Ermüdungskriterium: Erreichen von $G^*(50\%) = 0,5 \cdot G^*_{init}$												
Versuche Mastix MX0037												
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{init} [Pa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	$G^*(50\%)$ [Pa]	untere Schranke		obere Schranke		N für $G^*(50\%)$	N für $G^*(50\%)$	N für $G^*(50\%)$	Anmerkungen
					t [sec]	N für $G^*(50\%)$	t [sec]	N für $G^*(50\%)$				
0,5% 3	0,5	90829805	45414902,5	45494886	6090	182700	45373002	6100	183000	182897		
0,5% 5	0,5	79435484	39717742	39751412	8990	269700	39695528	9000	270000	269881		
0,5% 6	0,5	89867678	44933839	44950565	6100	183000	44836660	6110	183300	183044		
0,75% 1	0,75	71864370	35932185	35982923	2080	62400	35762948	2090	62700	62469		
0,75% 2	0,75	77714473	38857236,5	38877794	1690	50700	38630141	1700	51000	50725		
0,75% 4	0,75	80721025	40360512,5	40928063	1350	40500	40596352	1360	40800	41013		
1,0% 1	1,0	68339189	34169594,5	34953245	750	22500	34070618	760	22800	22766		
1,0% 2	1,0	70190724	35095362	35497849	710	21300	34703056	720	21600	21452		
1,0% 3	1,0	74373798	37186899	37945293	540	16200	36759304	550	16500	16392		
Versuche Mastix MX0039												
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{init} [Pa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	$G^*(50\%)$ [Pa]	untere Schranke		obere Schranke		N für $G^*(50\%)$	N für $G^*(50\%)$	N für $G^*(50\%)$	Anmerkungen
					t [sec]	N für $G^*(50\%)$	t [sec]	N für $G^*(50\%)$				
0,5% 1	0,5	84275255	42137627,5	42194079	7710	231300	42089750	7720	231600	231462		
0,5% 2	0,5	86688334	43294167	43319614	8520	255600	43222407	8530	255900	255679		
0,5% 3	0,5	83209163	41604581,5	41702772	7740	232200	41602619	7750	232500	232494		
0,75% 1	0,75	77067863	38539931,5	38578085	1660	48000	38315527	1610	48300	48050		
0,75% 2	0,75	76719218	38359609	38361627	1820	54600	38056171	1830	54900	54602		
0,75% 3	0,75	76748762	38374381	38467686	2160	64800	38080622	2170	65100	64872		
1,0% 1	1,0	72949384	36474692	37414053	750	22500	36394388	760	22800	22776		
1,0% 2	1,0	73040349	36520174,5	37493752	620	18600	36490006	630	18900	18891		
1,0% 3	1,0	72295126	36147563	36673278	660	19800	35590446	670	20100	19946		
Versuche Mastix MX0038												
Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{init} [Pa]	$G^*(50\%)$ [kPa]	$G^*(50\%)$ [Pa]	untere Schranke		obere Schranke		N für $G^*(50\%)$	N für $G^*(50\%)$	N für $G^*(50\%)$	Anmerkungen
					t [sec]	N für $G^*(50\%)$	t [sec]	N für $G^*(50\%)$				
0,5% 1	0,5	79718502	39859251	39935769	9120	273600	39837141	9130	273900	273833		
0,5% 2	0,5	77989157	38994578,5	39072813	10810	324300	38992158	10820	324600	324591		
0,5% 3	0,5	78511150	39275575	39299956	8660	259800	39242004	8670	260100	259926		
0,75% 1	0,75	71707433	35853716,5	36040763	3260	97800	35780232	3270	98100	98015		
0,75% 2	0,75	73039920	36519960	36538744	2500	75000	36266578	2510	75300	75021		
0,75% 3	0,75	73386891	36693445,5	37007904	2920	87600	36731783	2930	87900	87942		
1,0% 1	1,0	67188087	33594043,5	34397451	770	23100	33589233	780	23400	23398		
1,0% 2	1,0	67460243	33730121,5	34415056	800	24000	33612160	810	24300	24256		
1,0% 3	1,0	65668144	32834072	32896207	770	23100	32302172	780	23400	23131		

Ermüdungskriterium: Erreichen von δ_{max}

Versuche Mastix MX0037

Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{int} [Pa]	δ_{int} [°]	δ_{max} [°]	$G(\delta_{max})$ [Pa]	$t(\delta_{max})$ [sec]	N für δ_{max} [LS]	Anmerkungen
0,5% 3	0,5	90829805	34,559	36,366	61705611	4560	136800	
0,5% 5	0,5	79435484	34,906	36,563	64464310	3650	109500	
0,5% 6	0,5	89867678	35,356	37,27	71428961	2560	76800	
0,75% 1	0,75	71864370	37,421	39,565	52663782	1290	38700	
0,75% 2	0,75	77714473	36,613	38,787	53360784	1110	33300	
0,75% 4	0,75	80721025	36,831	38,778	58896677	720	21600	
1,0% 1	1,0	68339189	39,362	41,491	46759624	570	17100	
1,0% 2	1,0	70190724	39,249	41,392	48882469	490	14700	
1,0% 3	1,0	74373798	40,229	42,317	49711598	420	12600	

Versuche Mastix MX0039

Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{int} [Pa]	δ_{int} [°]	δ_{max} [°]	$G(\delta_{max})$ [Pa]	$t(\delta_{max})$ [sec]	N für δ_{max} [LS]	Anmerkungen
0,5% 1	0,5	84275255	34,547	36,783	54190371	6450	193500	
0,5% 2	0,5	86588334	34,064	36,393	67225955	4650	139500	
0,5% 3	0,5	83209163	34,541	36,85	59060107	5720	171600	
0,75% 1	0,75	77067863	37,493	39,895	56738177	860	25800	
0,75% 2	0,75	76719218	36,672	39,309	55594962	1130	33900	
0,75% 3	0,75	76748762	36,449	39,408	49992490	1850	55500	
1,0% 1	1,0	72949384	39,714	42,33	52374880	570	17100	
1,0% 2	1,0	73040349	38,305	41,087	45679076	530	15900	
1,0% 3	1,0	72295126	38,857	41,701	49148198	530	15900	

Versuche Mastix MX0038

Bezeichnung	Dehnungsniveau	G^*_{int} [Pa]	δ_{int} [°]	δ_{max} [°]	$G(\delta_{max})$ [Pa]	$t(\delta_{max})$ [sec]	N für δ_{max} [LS]	Anmerkungen
0,5% 1	0,5	79718502	36,985	39,008	64555107	4550	136500	
0,5% 2	0,5	77989157	37,855	39,757	62991922	4830	144900	
0,5% 3	0,5	78551150	37,029	38,977	64866297	3010	90300	
0,75% 1	0,75	71707433	39,993	42,463	53059933	2110	63300	
0,75% 2	0,75	73039920	39,148	41,642	56261268	1130	33900	
0,75% 3	0,75	73386891	40,124	42,617	55421508	1850	55500	
1,0% 1	1,0	67188087	41,472	43,857	48878889	520	15600	
1,0% 2	1,0	67460243	41,594	43,987	48370224	590	17700	
1,0% 3	1,0	65668144	41,943	44,219	49483640	390	11700	

Ermüdungskriterium: Dissipatives Energieverhältnis (DER)

Versuche Mastix MX0037							
Bezeichnung	Dehnungsniveau	ZW _i	DER	G(N _{p20})	t(N _{p20})	N _{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[LS]	
0,5% 3	0,5	1806226,454	727,8596885	52815332	5480	164400	
0,5% 5	0,5	2225879,212	975,7170405	48524439	7480	224400	
0,5% 6	0,5	1809981,433	711,5876585	53062529	5400	162000	
0,75% 1	0,75	1148163,381	246,3758974	41563963	1850	55500	
0,75% 2	0,75	957390,9906	195,0491726	44028002	1480	44400	
0,75% 4	0,75	840925,2599	171,6350572	43984263	1260	37800	
1,0% 1	1,0	765750,2128	96,32532478	38283875	710	21300	
1,0% 2	1,0	732665,517	91,62868007	38644335	670	20100	
1,0% 3	1,0	615146,2607	72,16060188	40357815	520	15600	
Versuche Mastix MX0039							
Bezeichnung	Dehnungsniveau	ZW _i	DER	G(N _{p20})	t(N _{p20})	N _{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[LS]	
0,5% 1	0,5	2148638,651	864,7498137	52313453	6670	200100	
0,5% 2	0,5	2408386,051	977,8201171	52478189	7500	225000	
0,5% 3	0,5	2119932,22	859,7517819	51862078	6640	199200	
0,75% 1	0,75	911882,0146	180,9509259	44597821	1370	41100	
0,75% 2	0,75	1059136,615	208,1971372	45106635	1580	47400	
0,75% 3	0,75	1348789,212	259,7087292	45843916	1970	59100	
1,0% 1	1,0	838210,2547	93,63733861	42426804	700	21000	
1,0% 2	1,0	677553,9776	80,29399585	40499768	590	17700	
1,0% 3	1,0	730233,4289	84,52609111	41000723	620	18600	
Versuche Mastix MX0038							
Bezeichnung	Dehnungsniveau	ZW _i	DER	G(N _{p20})	t(N _{p20})	N _{p20}	Anmerkungen
	[%]	[J]	[-]	[kPa]	[sec]	[LS]	
0,5% 1	0,5	2559905,362	1032,219462	49797980	7980	239400	
0,5% 2	0,5	3006480,921	1243,973793	48301075	9610	288300	
0,5% 3	0,5	2186678,644	924,3256492	47577292	7090	212700	
0,75% 1	0,75	1992519,973	401,4654756	41764432	3030	90900	
0,75% 2	0,75	1506431,466	302,77953	42103180	2280	68400	
0,75% 3	0,75	1825843,711	348,8378	43927830	2660	79800	
1,0% 1	1,0	821857,2259	97,82918865	38331211	720	21600	
1,0% 2	1,0	858115,1393	98,95315843	39400243	740	22200	
1,0% 3	1,0	770993,2948	94,71695984	36990064	700	21000	

Anhang K: Auswertung LAS-Prüfungen an zylindrischen Probekörpern

Auswertung: LAS-Prüfungen (Verschiebungsgesteuert, zylindrischer Probekörper)									
Prüftemperatur:	10	°C							
Prüffrequenz:	10	Hz							
Probekörpergeometrie:	Zylindrischer Probekörper, D = 8mm, h = 2mm								
Versuche Mastix MX0037									
Bezeichnung	Dehnungsniveau	Streigung	α	G_{int}^*	A	B	N_f		
	[%]	[-]	[-]	[kPa]	[-]	[-]	[S]		
				<i>berechnet</i>					
cy/ 2	2,5	0,568	1,762	149329909,3	87660	-3,523	3474		
cy/ 3	2,5	0,513	1,949	140085868,1	50240	-3,897	1413		
cy/ 4	2,5	0,576	1,736	130178175,1	13270	-3,473	551		
cy/ 2	5	0,568	1,762	149329909,3	87660	-3,523	302		
cy/ 3	5	0,513	1,949	140085868,1	50240	-3,897	95		
cy/ 4	5	0,576	1,736	130178175,1	13270	-3,473	50		
Versuche Mastix MX0039									
Bezeichnung	Dehnungsniveau	Streigung	α	G_{int}^*	A	B	N_f		
	[%]	[-]	[-]	[kPa]	[-]	[-]	[S]		
				<i>berechnet</i>					
cy/ 1	2,5	0,553	1,808	159628560	145700	-3,615	5305		
cy/ 2	2,5	0,559	1,789	140321667,1	60610	-3,579	2282		
cy/ 3	2,5	0,558	1,791	148322803,8	189500	-3,582	7117		
cy/ 1	5	0,553	1,808	159628560	145700	-3,615	433		
cy/ 2	5	0,559	1,789	140321667,1	60610	-3,579	191		
cy/ 3	5	0,558	1,791	148322803,8	189500	-3,582	594		
Versuche Mastix MX0038									
Bezeichnung	Dehnungsniveau	Streigung	α	G_{int}^*	A	B	N_f		
	[%]	[-]	[-]	[kPa]	[-]	[-]	[S]		
				<i>berechnet</i>					
cy/ 1	2,5	0,594	1,682	143275358,7	99540	-3,364	4288		
cy/ 3	2,5	0,596	1,679	135794797,4	10800	-3,357	4982		
cy/ 5	2,5	0,598	1,672	134344748,1	82840	-3,344	3869		
cy/ 1	5	0,594	1,682	143275358,7	99540	-3,364	416		
cy/ 3	5	0,596	1,679	135794797,4	10800	-3,357	486		
cy/ 5	5	0,598	1,672	134344748,1	82840	-3,344	381		

Anhang L: Auswertung LAS-Prüfungen an zylindrischen Probekörpern

Auswertung: LAS-Prüfungen (Verschiebungsgesteuert, hyperbolischer Probekörper)										
Prüftemperatur:	10	°C								
Prüffrequenz:	10	Hz								
Probekörpergeometrie:	Hyperbolischer Probekörper, $D_0 = 6\text{mm}$, $h = 3\text{mm}$									
Versuche Mastix MX0037										
Bezeichnung	Dehnungsniveau	Streigung	α	G_{int}^*	A	B	N_f			
	[%]	[-]	[-]	[Pa]	[-]	[-]	[LS]			
				berechnet						
hyp_1	2,5	0,533	1,807	56961701	17510	-3,615	638			
hyp_2	2,5	0,542	1,844	57761578	19168	-3,688	653			
hyp_3	2,5	0,546	1,831	51972626	13430	-3,662	469			
hyp_1	5	0,533	1,807	56961701	17510	-3,615	52			
hyp_2	5	0,542	1,844	57761578	19168	-3,688	51			
hyp_3	5	0,546	1,831	51972626	13430	-3,662	37			
Versuche Mastix MX0039										
Bezeichnung	Dehnungsniveau	Streigung	α	G_{int}^*	A	B	N_f			
	[%]	[-]	[-]	[Pa]	[-]	[-]	[LS]			
				berechnet						
hyp_1	2,5	0,539	1,854	55362446	23290	-3,708	779			
hyp_2	2,5	0,532	1,881	57790626	26623	-3,762	847			
hyp_3	2,5	0,529	1,89	59460137	20880	-3,780	654			
hyp_1	5	0,539	1,854	55362446	23290	-3,708	60			
hyp_2	5	0,532	1,881	57790626	26623	-3,762	62			
hyp_3	5	0,529	1,89	59460137	20880	-3,780	48			
Versuche Mastix MX0038										
Bezeichnung	Dehnungsniveau	Streigung	α	G_{int}^*	A	B	N_f			
	[%]	[-]	[-]	[kPa]	[-]	[-]	[LS]			
				berechnet						
hyp_1	2,5	0,571	1,751	55374988	27064	-3,502	1093			
hyp_2	2,5	0,571	1,753	54217148	20893	-3,506	841			
hyp_3	2,5	0,574	1,743	53211480	24923	-3,486	1022			
hyp_1	5	0,571	1,751	55374988	27064	-3,502	96			
hyp_2	5	0,571	1,753	54217148	20893	-3,506	74			
hyp_3	5	0,574	1,743	53211480	24923	-3,486	91			