

Diploma Thesis

Detailed parameter study for fatigue testing of asphalt mastix 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

Vertiefte Parameterstudie zur Ermüdungsprüfung von Asphaltmastix im 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

Petra Lesch

Matr.Nr.: 1026057

unter der Anleitung von

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

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

und

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

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

Wien, im Monat 2017

Kurzfassung

Kapitel 2 und 3 gibt die Grundlagen der Diplomarbeit wieder. Speziell wird auf die verwendeten Baustoffe, wie Bitumen, Asphalt und Gesteinskörnungen eingegangen. Die Literaturrecherche beinhaltet die Zusammensetzung, die Eigenschaften, die Herstellung, Anwendung und Art des Bitumens in all seinen Facetten. Weiters folgt ein kurzer Überblick über die Funktionsweise und den Aufbau des Asphalts. Abgeschlossen werden diese Kapitel mit einer kurzen Beschreibung der Bestandteile des Asphalts.

Im weiteren Teil der Diplomarbeit wird auf die unterschiedlichen Prüfmethodiken, die zur Anwendung gekommen sind, eingegangen. Dabei werden in zwei Prüfungen unterschieden, der Füller- und der Asphaltmastixprüfung. Die Füllerprüfungen beinhalten die Trockensiebung und die Dichtebestimmung. Die Beschreibung dieser Prüfungen werden im Kapitel 5 angeführt. Die Asphaltmastixprüfungen beinhalten das Ring- und Kugel-Verfahren sowie die Ermüdungsprüfungen im dynamischen Scherrheometer.

Beim Ring- und Kugel-Verfahren wird die Auswirkung der Füllergehälter auf die Zunahme der Steifigkeit der Mastix untersucht. Bei der Herstellung eines Asphaltmischguts wird der Füller immer Masse bezogen gemäß Grenzsieblinie hinzu dosiert. Für diese Arbeit wurde der Füller jedoch Volumen bezogen hinzugefügt. Daher soll mit Hilfe des Ring- und Kugel-Verfahren der Übergangspunkt vom linearen zum exponentiellen Verlauf der Erweichungstemperatur klassifiziert werden. Es stellt sich die Frage ob das Verhältnis von Masseprozent- zu Volumenprozentanteil Füller vom Füllergestein abhängt. Drittens wurde die Veränderung der Steifigkeit mit Zugabe von Kalkhydrat untersucht.

Immer häufiger treten auf Verkehrswegen ohne außerordentliche klimatische oder verkehrliche Belastungen frühzeitig Schäden, wie Korn- und Schollenbrüche auf. Die Ursache dieser Schäden wird auf mangelndes Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix zurückgeführt. Um das Gebrauchsverhalten von Mastix zu erforschen, wurden in dieser Diplomarbeit mittels dynamischen Scherrheometer (DSR) die Ermüdungsfestigkeit der Mastix in unterschiedlichen Zusammensetzungen und Prüfparameter, wie Korngröße, Temperatureinfluss, Kalkhydratzugabe und Wasserlagerung untersucht. Das Kapitel 5 erläutert die angewendeten Methoden und deren Ausführungen im DSR mit all ihren Besonderheiten der Zusammensetzung und der unterschiedlichen Prüfparameter.

Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen für jede einzelne Prüfung getrennt ausgewertet und interpretiert. Dabei werden zu Vergleichszwecken Prüfungen von früheren Diplomarbeiten zur Hand genommen. Das letzte Kapitel 7 beinhaltet eine Zusammenfassung und Kurzform über die gewonnenen Erkenntnisse dieser Diplomarbeit.

Abstract

Chapters 2 and 3 display the fundamentals of the thesis. Special attention is given to the materials used, such as bitumen, asphalt and aggregates. The literature research outlines the composition, the characteristics, the production, the application and the type of bitumen in all its aspects. This is followed by a brief overview of the features and the structure of asphalt. These chapters are concluded with a brief description of the asphalt's components.

Furthermore, the different test methods which have been applied are discussed. There are two different tests, the filler and the asphalt mastix test. The filler tests include dry screening and density determination. These tests are described in detail in chapter 5. The asphalt mastic tests include the ring and ball test as well as fatigue tests in the dynamic shear rheometer.

The ring and ball test investigates the impact of the fillers on the increase in stiffness of the bitumen/filler aggregate mixture in relation to the different fillers. During asphalt production filler is always added to bitumen in a certain mass-related quantity. Moreover, the ratio of mass-percent to volume-percentage fraction fillers, in which the transition from the linear to the exponential course of the softening temperature takes place, is classified using the ring and ball test. Then, the change in stiffness is investigated with the addition of hydrated lime.

More and more frequently transport infrastructure can be observed to suffer from structural damage such as loss aggregates very early in its life cycle. This seems to occur without any unusual climatic conditions or traffic loads. Experts attribute this damage to a lack of use of the asphalt mastix. In order to investigate the utilization of mastix, the fatigue strength of mastix was investigated in various compositions and test parameters such as grain size, temperature influence, addition of hydrate lime and water storage. Chapter 5 explains the methods used and their application in the DSR, with all their features for examining the different test parameters.

In chapter 6, the results of the individual tests are evaluated and interpreted separately for each individual examination. For comparative purposes, examinations from previous diploma theses are used. The final chapter 7 contains a full summary and a short summary of the findings of this thesis.

Vorwort

Ich bin meiner Familie, die mir dieses Studium ermöglichten und in guten sowie schwereren Zeiten zur Seite standen, meinen größten Dank verpflichtet. Weiters danke ich herzlich meinem Freund und meinen Freunden die mich auf diesem Lebensweg begleiteten.

Besonders möchte ich mich beim Herrn Univ. Ass. Dip.-Ing. Markus Hospodka und Herrn Univ. Prof. Dip.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab für die Bereitstellung des Themas für diese Diplomarbeit danken.

Herrn Univ. Ass. Dip.-Ing. Markus Hospodka danke ich vor allem für seine ständige Unterstützung während der Laborarbeit und zur Erstellung der Arbeit. Ich danke Madeleine Jordan die mich auf das DSR, Thomas Riedmayer, welcher mich auf das Ring und Kugel Verfahren und David Valentin, der mich auf die Trockensiebung, sowie die Pyknometermessungen eingeschult haben. Allen drei standen jederzeit zu Rat und Tat zur Verfügung.

Zuletzt bedanke ich mich bei meinen Freunden Martin und Harald die sich mich angenommen haben und mit mir tagelang für wirklich schwierige Prüfungen gelernt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Bitumen	2
2.1	Definition	2
2.2	Zusammensetzung	2
2.3	Eigenschaften	4
2.3.1	Verformungsverhalten/Konsistenz	4
2.3.2	Haftverhalten (Adhäsion)	5
2.3.3	Verhalten gegenüber Wasser	5
2.3.4	Verhalten gegenüber chemischen Einflüssen	5
2.3.5	Alterung von Bitumen	6
2.4	Herstellung von Bitumen	8
2.4.1	Vakuumdestillation	8
2.4.2	Oxidationsverfahren	9
2.4.3	Naturasphalte	9
2.5	Anwendung und Arten von Bitumen	9
2.5.1	Straßenbaubitumen	10
2.5.2	Modifiziertes Bitumen	10
2.5.3	Industriemitumen	10
2.5.4	Bitumenemulsionen	11
3	Asphalt	12
3.1	Definition	12
3.2	Funktion	12
3.3	Gesteinskörnungen	13
3.1	Bitumen	14
4	Verwendetes Probenmaterial	15
4.1	Bitumen	15
4.2	Füller	15
4.3	Mischung	16
4.3.1	Hergestellte Mastixproben für das Delta-Ring- und Kugel-Verfahren	17
4.3.2	Ermüdungsversuche mittels DSR	18
4.4	Übersicht der durchgeführten Prüfungen	18
5	Prüfmethodik	19
5.1	Bestimmung der Dichte der Füller nach EN 1097-7	19

5.1.1	Prüfungsdurchführung	19
5.2	Siebung auf Größtkorn 0,125mm.....	20
5.3	Delta-Ring- und Kugel-Verfahren nach EN 13179-1.....	20
5.3.1	Probenvorbereitung	21
5.3.2	Prüfungsdurchführung	21
5.4	Dynamisches Scherrheometer (DSR)	23
5.4.1	Probenvorbereitung	26
5.4.2	Prüfungsdurchführung	29
5.4.3	Prüfungsarten.....	31
6	Ergebnisse und Interpretation	34
6.1	Ergebnisse Füllerprüfungen	34
6.1.1	Dichte	34
6.2	Ergebnisse Mastixprüfungen.....	34
6.2.1	Delta-Ring und Kugel-Verfahren	34
6.2.2	Dynamisches Scherrheometer	39
7	Zusammenfassung und Ausblick	47
7.1	Ring- und Kugel-Verfahren.....	47
7.1.1	dynamisches Scherrheometer (DSR).....	47
7.1.2	Einfluss der Korngröße auf die Ermüdungsfestigkeit	47
7.1.3	Einfluss der Temperatur auf die Ermüdungsfestigkeit.....	48
7.1.4	Einfluss der Zugabe von Kalkhydrat auf die Ermüdungsfestigkeit	48
7.1.5	Einfluss der Temperatur auf die Ermüdungsfestigkeit.....	48
7.1.6	Dehnungsgesteuerte Prüfungen	48
8	Literaturverzeichnis.....	49
I.	Abbildungsverzeichnis.....	51
II.	Tabellenverzeichnis.....	52
III.	Anhang	liii

Häufig verwendete Abkürzungen

M.-%	M asseprozent
Vol.-%	V olumenprozent
DSR	D ynamic S hear R heometer (dynamisches Scherrheometer)
SHRP	S trategic H ighway R esearch P rogram

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Thematik der auftretenden Schollen- und Kornausbrüchen bei bituminösen Deckschichten, die nicht klimatischer als auch verkehrlicher Belastung zugeteilt werden können, stellen das Gebrauchsverhalten von Mastix in Frage. In dieser Diplomarbeit wird eine Variation der Zusammensetzung und der Prüfparameter der Mastix untersucht um den Einfluss auf der Ermüdungsfestigkeit der Mastix zu untersuchen. Dies erfolgte durch eine Sensitivitätsanalyse durch Variation der folgenden unterschiedlichen Parameter.

- Einfluss der Korngröße auf die entwickelte Ermüdungsprüfung ($< 0,063$ mm)
- Klimaauswirkung: Temperaturbereich von 5°C – 20°C
- Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit durch Beimengung von Kalkhydrat
- Wasserlagerung

Die zweite Frage der Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Steifigkeit der Mastix in Abhängigkeit des verwendeten Füllers. Zu diesem Zwecke wurden Mastixproben mit 14 unterschiedlichen Füllern von Sand, Kalksteinmehl, Quarzmehl, Kalkhydrat bis Hartgesteine hergestellt und einer Ring- und Kugel Prüfung unterzogen. Das Ziel ist unter anderem die Auswirkung des Füllergehaltes auf die Zunahme der Steifigkeit zu klassifizieren. Weiters führt die Zugabe von Kalkhydrat zu einer Verschiebung der Erweichungstemperatur in einen höheren Bereich. Abschließend soll der Übergang der Linie der Erweichungstemperatur von linear zu exponentiell abhängig des verwendeten Füllers klassifiziert werden. An dieser Stelle wird die Erweichungstemperatur nicht mehr maßgeblich von der Steifigkeit des Bitumens, sondern von der Interaktion von Korn zu Korn beeinflusst.

2 Bitumen

2.1 Definition

Bitumen (Abbildung 2.1) ist ein natürlicher Stoff, der typischerweise zusammen mit Gesteinsfragmenten in Naturasphalten (Abbildung 2.1) meist in Gebieten mit Rohöl und Erdgasfunden vorkommt. Bitumen ist ein durch Destillation (thermische Zersetzung) aus Erdöl gewonnenes schwerflüchtiges dunkelfarbiges hochmolekulares Kohlenwasserstoffgemisch, welches in der Bautechnik vor allem als Bindemittel in Mineralstoffgemischen und als Abdichtungsmaterial verwendet wird. Bitumen ist schwarz, zähflüssig, klebrig, wasserabstoßend und gegen Chemikalien (Säuren, Laugen) sowie stark polare Lösemittel wie Alkohol und Wasser weitgehend unempfindlich (aber löslich in artverwandten, unpolaren und organischen Lösemitteln wie Benzin, Toluol, Trichloräthan). [1]



Abbildung 2.1: li.: Bitumen, re.: Bruchstück von Naturasphalt [2]

Bitumen hat das früher für die gleichen Verwendungszwecke (Straßenbau, Dachdichtungsbahnen u. ä.) eingesetzte Steinkohlenteerpech (auch Teer genannt) gänzlich ersetzt. Der aus der Verkokung von Steinkohle gewonnene Teer enthält in erheblichem Umfang polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die im menschlichen Körper cancerogen wirken. Der Einsatz von Steinkohlenteerpech ist aus diesem Grund nicht mehr zulässig. [3]

In der ÖNORM EN 12597 [4] wird Bitumen folgendermaßen definiert: „*Bitumen ist ein nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich ist, bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos oder nahezu fest.*“ [4]

2.2 Zusammensetzung

Bitumen besteht aus einer sehr großen Anzahl verschiedener Kohlenwasserstoffe und Kohlenwasserstoffderivate. Je nach geographischer Herkunft des Rohöls können Bitumen nach Art und Menge der Substanzen sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein. Aufgrund der großen Anzahl der sie aufbauenden Stoffe haben sie aber dennoch nahezu gleiche Gebrauchseigenschaften. Diese hängen vielmehr von der Struktur als von der chemischen Zusammensetzung ab. [3]

Die Hauptbestandteile von Bitumen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Hauptbestandteile von Bitumen [3]

Chemisches Element	Abkürzung des chemischen Elements	Massenanteil [%]
Kohlenstoff	C	80 - 85
Wasserstoff	H	7 - 10
Sauerstoff	O	2 - 9
Stickstoff	N	0,1 - 1
Schwefel	S	0,5 - 7
Sonstiges	-	< 0,1

ÖNORM EN 12597 [4] beschreibt Bitumen als ein kolloidales System, in dem eine disperse Phase (Asphaltene) in einer zusammenhängenden Phase aus hochsiedenden Ölen (Maltene) in einer stabilen Verteilung vorliegt. Dieser Aufbau kennzeichnet das Bitumen als eine Flüssigkeit, deren Fließverhalten jedoch besonderen Gesetzmäßigkeiten folgt (thermo-viskoses Verhalten). Das kolloidale System wird im Allgemeinen in drei verschiedene Molekültypen unterteilt. [3]

- **Dispersionsmittel:** ölige, niedermolekulare, im Lösemittel lösliche Anteile, mit molaren Massen von 500 bis 1500 g/mol

sowie die dispergierten Anteile:

- **Erdölharz:** schmelzbar, löslich, rotbraun mit besonders guten Klebeeigenschaften mit Molmassen von 1000 bis 1500 u
- **Asphaltene:** unlöslich, schwarzbraun, unschmelzbar mit Molmassen von 5000 bis 9000 u

Dispersionsmittel und Erdölharze können zu dem Begriff Maltene zusammengefasst werden. Die dispergierten Anteile sind in der öligen Phase kolloidal dispergiert. Die Asphaltene sind von einer Schutzschicht aus Asphaltharzen umgeben. Die zumeist kugelförmige Einheit Asphaltene - Asphaltharze wird als Mizelle bezeichnet (Abbildung 2.2). Die Anteile dieser Phasen im Vielstoffgemisch sind temperaturabhängig. Bitumen überstreicht in den für den Straßenbau wichtigen Bereichen die Aggregatzustände fest bis flüssig. Die Temperaturbereiche dieser Zustände sind abhängig von den jeweiligen Bitumensorten. [3]

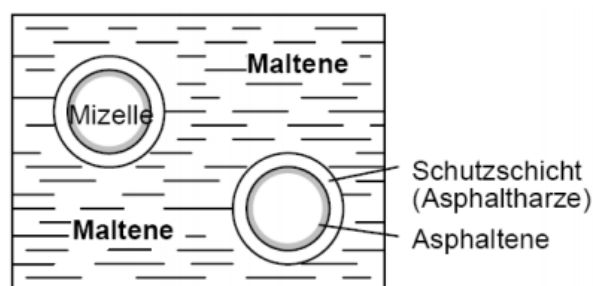


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau von Bitumen [5]

Die Struktur des Bitumens entspricht jener eines Soles (viskose Flüssigkeit, kaum vernetzt). Ein Sol ist eine kolloidale Lösung der Asphaltene in den Maltenen, ohne dass ein steifes Traggerüst entsteht. Die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Festigkeit, Verformbarkeit und Temperaturbeständigkeit, hängen entscheidend vom Verhältnis der Maltene zu den Asphaltene ab. Als nichtkristalliner Werkstoff sind die Eigenschaften des Bitumens in hohem Maße temperaturabhängig (thermoplastisch). Bitumen besitzt keinen definierten Schmelzpunkt, sondern einen Erweichungspunkt. Bei Temperaturen unterhalb des Erweichungspunktes verhält sich Bitumen relativ spröde, oberhalb dieser Temperatur ist es gut verformbar und zeigt viskose Eigenschaften. Bei niedrigeren Temperaturen steigt der Asphaltgehalt. Dies führt zur Bildung von stark vernetzten Mizellen und das Kolloidsystem verhält sich schließlich wie ein Gel (elastisches Verhalten, hochvernetzt). [5]

2.3 Eigenschaften

2.3.1 Verformungsverhalten/Konsistenz

Die Eigenschaften von Bitumen sind stark temperaturabhängig. Gerade für die verschiedenen Arbeitsvorgänge (Pumpen, Spritzen, Mischen, Einbau, Verdichten) wird immer eine unterschiedliche Viskosität des Bitumens benötigt. Die Verarbeitungstemperatur ist immer von der Bitumensorte abhängig. Bitumen ist bei tiefen Temperaturen härter und spröder. Je wärmer das Bitumen, desto weicher, leichter verformbar und zu verarbeiten wird es und geht schließlich zwischen 150 und 200°C in den flüssigen Zustand über. Bitumen erreicht erst nach Abkühlung auf Umgebungstemperatur die erforderliche Konsistenz, um der gewünschten Belastung entgegen zu wirken. Durch diesen reversiblen Vorgang weist Bitumen das Verhalten eines thermoplastischen Werkstoffes auf. [3]

Die Steifigkeit hängt von der Härte des Bitumens, also der Viskosität, ab, welche wiederum temperaturabhängig ist. Je weicher das Bitumen, desto größer ist der viskose Anteil. [3]

Weiters hat die Belastungsdauer einen großen Einfluss auf die Verformung des Bitumens. Bitumen folgt der Verformung reversibel elastisch sowie irreversibel plastisch. Dies bedeutet, dass bei kurzen Belastungszeiten der Abbau der Spannungen größtenteils elastisch erfolgt und somit die aufgezwungene Verformung nach Entlastung zurück federt. Mit zunehmender Belastungsdauer nimmt der viskose Anteil zu, der sowohl zeitabhängig als auch irreversibel ist. In Abbildung 2.3 ist die Deformation und Rückverformung bei viskoelastischem Material abgebildet. [6]

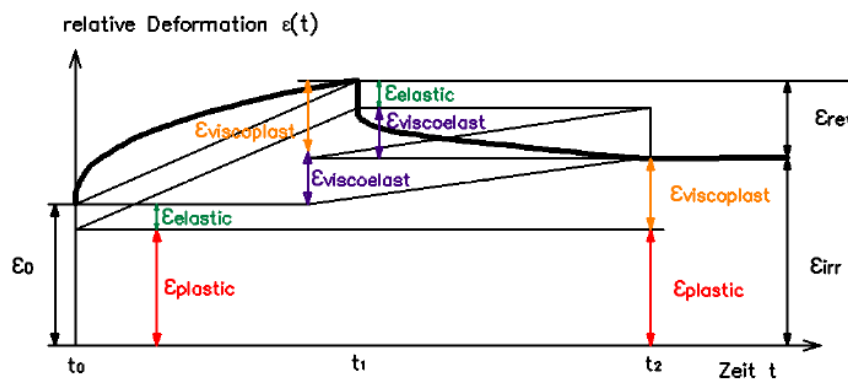


Abbildung 2.3: Deformation und Rückformung bei viskos-elastischem Materialverhalten [2]

Bitumen besitzt weiters ein Relaxationsvermögen. „Relaxation ist das Vermögen eines Werkstoffes, sich aufgrund seines elasto-viskosen Verhaltens einer aufgezwungenen Beanspruchung durch viskose Verformung zu entziehen.“ [3]

Der Spannungsabbau erfolgt dabei nicht spontan, sondern zeitabhängig. Die Geschwindigkeit, mit der die Beanspruchungen abklingen, hängt von der Viskosität des Bitumens ab. Weichere Bitumen weisen ein besseres Relaxationsvermögen auf als harte Bitumen. Asphaltstraßen können wegen der Eigenschaft der Relaxation des Bitumens ohne Fugen hergestellt werden. [3]

2.3.2 Haftverhalten (Adhäsion)

Unter dem Begriff Adhäsion versteht man „Fähigkeit und Zustand, dass zwei Teile an Grenzschichten aneinanderhaften.“ [3]

Bitumen dient fast ausschließlich als Kelbe- bzw. Bindemittel. Damit Asphalt seine erforderlichen Eigenschaften aufweist, muss die Adhäsion zwischen Gesteinskörnung und Bitumen gewährleistet sein. Die Hafteigenschaften von Gesteinskörnungen können je nach Art des Gesteins sehr unterschiedlich sein. Die Gesteine müssen frei von behindertem Trennmittel wie Staub oder Feuchtigkeit sein, um vollständig mit Bitumen ummantelt zu werden. Daher ist bei der Asphaltherstellung auf eine gründliche Trocknung und Reinigung der Gesteinskörnung zu achten. Durch die höhere Affinität von Wasser als Bitumen gegenüber dem Gestein kann durch späteren Wassereintritt das Haftvermögen verringert werden. [3]

2.3.3 Verhalten gegenüber Wasser

Bitumen wird als nahezu wasserundurchlässig klassifiziert, da es kaum Wasser aufnehmen, noch abgeben kann. Ähnlich verhält sich Bitumen auch gegenüber Wasserdampf, denn die Diffusionskonstante ist sehr niedrig (bei rund 10^{-8} g/(cm*h*mbar)) und der Diffusionswiderstand sehr hoch (bei 50000). Deshalb wird Bitumen oftmals als Korrosionsschutzstoff oder zur Bauwerksisolierung eingesetzt. [3]

2.3.4 Verhalten gegenüber chemischen Einflüssen

Bitumen weist bei Raumtemperaturen eine gute Beständigkeit gegenüber organischen und anorganischen Salzen, aggressiven Wässern, Kohlensäure und anderen schwachen Säuren

jeder Konzentration auf. Die Konzentrationsgrenze der Beständigkeit sinkt mit Zunahme an stark oxidierenden Medien. Bitumen besitzt eine hervorragende Witterungsbeständigkeit. Allgemein ist weiches Bitumen weniger widerstandsfähig gegenüber chemischen Angriffen als hartes Bitumen. Bitumen weist hingegen eine starke Anfälligkeit gegenüber Stoffen aus Erdölfraktionen, wie Benzin und Öl, und anderen organischen Lösungsmitteln, wie Benzol, Tetrachlorkohlenstoff, Schwefelkohlenstoff Trichlorethen und Toluol auf. [3]

2.3.5 Alterung von Bitumen

Unter dem Begriff „Bitumenalterung“ sind alle Alterungsmechanismen zusammengefasst, die zu Veränderungen im Bitumen während des gesamten Lebenszyklus führen. Durch die Alterung werden die Gebrauchseigenschaften verschlechtert, was zu härteren (verformungsbeständigeren) und spröderen Bitumen führt. [7]

Die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Alterung sind Temperatur, Konzentration des Luftsauerstoffes, Feuchtigkeit und die Stärke der Sonneneinstrahlung (UV-Licht). Es lassen sich drei irreversible Alterungsmechanismen unterscheiden. [2]

1. Destillative Alterung
2. Oxidative Alterung
3. Alterung durch Strukturveränderung

2.3.5.1 Destillative Alterung

Bei der destillativen Alterung entweichen leichtsiedende Komponenten wie niederviskose Öle bei Temperaturen unterhalb ihrer Siedepunkte aus dem Bitumen. Dieser Vorgang ist irreversibel und rein physikalisch. Dieser Vorgang findet meistens bei hohen Temperaturen wie beim Einbau, der Verarbeitung und der Herstellung statt. Der Grad der Alterung hängt dabei von der Bitumensorte, der Geschwindigkeit des Alterungsvorganges, der Temperatur und der spezifischen Oberfläche ab. [2]

Weiche Bitumensorten altern, durch einen höheren Anteil an niederviskosen Ölen, leichter als harte Sorten. Im Bitumen steigt der Dampfdruck mit zunehmender Temperatur an. Der höhere Dampfdruck führt zur Verdunstung einer größeren Menge an leichtsiedenden Komponenten. Je größer die spezifische Oberfläche, desto größer ist die Verdampfungsgeschwindigkeit. Die Verdampfungsgeschwindigkeit nimmt mit einem höheren Anteil an Luftzutrittsmöglichkeit zu. Die destillative Alterung nimmt bei konstanten Bedingungen mit fortschreitender Bitumenverhärtung ab. [7]

2.3.5.2 Oxidative Alterung

Die oxidative Alterung ist ein rein chemischer Vorgang und tritt sowohl bei der Herstellung bzw. Verarbeitung von Asphalt, als auch während der Liegedauer auf. Bei diesem Vorgang reagiert das Bitumen nicht nur mit dem Sauerstoff der Luft, sondern auch mit Ozon, Radikalen und in Wasser gelösten Radikalen wie OH^\cdot . Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt von der Temperatur, der spezifischen Oberfläche, der Luftzutrittsmöglichkeit und der Sonnenlichteinstrahlung ab. Je höher die Temperatur, spezifische Oberfläche und Intensität der Lichteinstrahlung, desto schneller verläuft die Oxidation. [2]

Die Sonneneinstrahlung hat durch ihre geringe Eindringtiefe von 4-5 μm nur Einfluss auf den oberflächennahen Bereich [3]. Andere reaktive Gase und wassergelöste Oxidationsmittel sind zwar nur in geringerer Konzentration vorhanden, jedoch haben sie teilweise ein Vielfaches an Oxidationspotential (Ozon) und/oder dringen tiefer in die Schichten ein und haben dort eine längere Verweildauer.[7]

2.3.5.3 Strukturalterung

Die oxidative und destillative Oxidation verursachen eine strukturelle Veränderung des Aufbaues von Bitumen, welche als Strukturalterung bezeichnet wird. Bei diesem irreversiblen Vorgang vergrößern sich die kolloidal dispergierten Teilchen (Asphaltene, Erdölharze) und koagulieren zu größeren Aggregaten bei gleichzeitiger Abnahme der Maltene (Harze, Aromaten). Dabei geht das Bitumen von einem Sol-Zustand in einen Gel-Zustand über. Die fortschreitende Strukturierung veranlasst einen Anstieg der Strukturviskosität und das Bitumen wird härter und spröder.[7]

2.3.5.4 Alterungsstufen

Die Alterung kann in drei Stufen unterteilt werden: [8]

- **Ungealtert:** Frischbitumen nach der Raffinierung
- **Kurzzeitgealtert:** Alterung während des Mischvorganges, Lagerung, Transport und Einbau
Verdunstung noch verbleibender niedersiedender Komponenten aufgrund hoher Temperaturen
- **Langzeitalterung:** Alterung ab Fertigstellung des Einbaus; dieser Zustand ist nach 5 - 10 Jahren Liegedauer erreicht.
Oxidation als Reaktion mit Luftsauerstoff und Änderungen in der kolloidalen Struktur

In der nachfolgenden Abbildung 2.4 wird der Alterungsverlauf von Bitumen über die Zeit dargestellt. Den größten Anteil der Alterung stellt die Kurzzeitalterung dar, welche durch den raschen Anstieg zu Beginn gekennzeichnet ist. Die Langzeitalterung ist durch eine deutlich flachere Kurve gekennzeichnet. Unter dem Begriff Alterungsindex versteht man das Verhältnis der Viskosität von gealtertem zu nicht gealtertem Bitumen. [8]

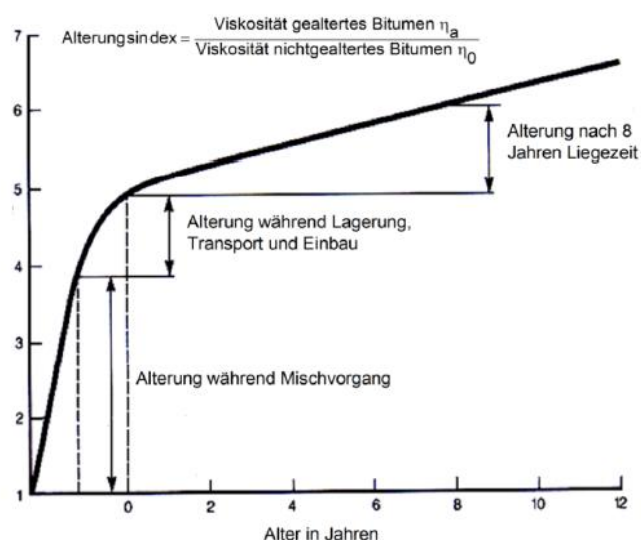


Abbildung 2.4: Alterungsverlauf von Bitumen [9]

2.4 Herstellung von Bitumen

In Abbildung 2.5 ist die Herstellung von Bitumen aus Rohöl in einer Erdölraffinerie durch Einwirkung von Hitze und Druck schematisch dargestellt. Für gute Bitumeneigenschaften ist vor allem ein hoher Anteil an hochsiedenden Komponenten (über 500°C) und deren chemische Zusammensetzung wichtig. Bitumen bleibt als Rückstand bei der Destillation zur Gewinnung von Benzin, Diesel sowie Heizöl übrig. [7]

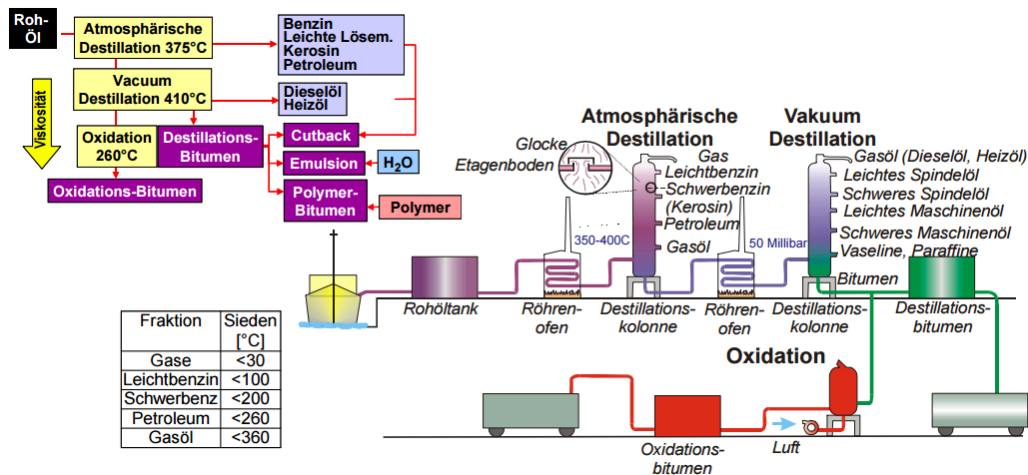


Abbildung 2.5: Herstellung von Bitumen [1]

Die Vakuumdestillation (Destillationsbitumen), die Hochvakuumdestillation (Hochvakuumbitumen) und das Oxidationsverfahren (Oxidationsbitumen) dienen zur Herstellung der unterschiedlichsten Bitumensorten.

2.4.1 Vakuumdestillation

Die Vakuumdestillation ist das am häufigsten angewendete Verfahren um Straßenbaubitumen zu erhalten. Dabei wird das Erdöl im ersten Röhrenofen auf 350 bis 400°C aufgeheizt und unter atmosphärischem Druck mittels Destillationskolonne unter Ausnutzung der unterschiedlichen Siedetemperaturen von seinen leichteren Bestandteilen (Methan-, Ethan-, Butan-, Propan-Gase, Leichtbenzin, Kerosin, Petroleum) befreit. Die Destillationskolonne enthält mehrere Etagenböden mit sogenannten Glocken, woran die Destillationsprodukte in die Wannen der Etagenböden abtropfen können. Von den Etagenböden können dann die einzelnen Produkte, z.B. Benzin, abgeleitet werden. Anschließend wird das verbleibende Gasöl einem zweiten Röhrenofen zugeführt und eine weitere Destillationskolonne bei reduziertem Druck von etwa 50 Millibar unter Vakuum in seine schwereren Bestandteile (Schmieröle, Paraffin) aufgetrennt. Bitumen sammelt sich als schwerster Bestandteil am Boden des Destillationsgefäßes. In weiteren Prozessen kann dieses Bitumen zu Oxidationsbitumen (Einblasen von Luft), Fluxbitumen (Zugabe von Lösemitteln), Polymerbitumen (Zugabe von Polymer), Bitumenemulsion (Zugabe von Wasser und Emulgator) weiterverarbeitet werden. [1]

Mit der Hochvakuumdestillation besteht die Möglichkeit zur Herstellung von harten Straßenbaubitumen durch stärker reduzierten Druck als bei der Vakuumdestillation. Der Anteil an Hochvakuumbitumen an der Bitumenproduktion ist aber eher gering. [7]

2.4.2 Oxidationsverfahren

Beim Oxidationsverfahren wird Sauerstoff bei 230°C bis 270°C unter kontrollierten Bedingungen in das Destillationsbitumen eingeblasen, bis die gewünschte Viskosität erreicht wird. Durch dieses Verfahren erhöht sich der Anteil an Asphaltene, der zu einem deutlich höheren Penetrationsindex führt. Aus diesem Grund wird das sehr harte Oxidationsbitumen meistens für industrielle Zwecke (Industriebitumen) verwendet. [7]

2.4.3 Naturasphalte

Eine andere Möglichkeit zur Bitumengewinnung stellt der Abbau von Naturasphalten dar. Naturasphalte sind in der Natur vorkommende Mischungen aus Bitumen und feinkörnigen Mineralstoffen und werden ausschließlich als Zusätze verwendet, um die Eigenschaften des Asphalts zu verbessern. [10]

2.5 Anwendung und Arten von Bitumen

Die Anwendungsgebiete von Bitumen bzw. Bitumenprodukten im Bauwesen lassen sich in die Bereiche Straßen- sowie Hoch- und Wasserbau unterteilen. Sie werden in diesen Bereichen für folgende Zwecke eingesetzt: [5]

Im Straßenbau findet Bitumen Anwendung als Bindemittel für: [5]

- Oberflächenschutzschichten
- Kompressionsbeläge (Beläge, die im Laufe der Zeit durch fortschreitende Verdichtung, z.B. aus dem Verkehr, eine Festigkeitssteigerung erlangen)
- Kornstabile Beläge (nach dem Betonprinzip)
- Tragschichten aus Bitumengesteinskörnungsgemischen

Im Hoch- und Wasserbau findet Bitumen auf folgenden Gebieten Anwendung: [5]

- als Klebe-, Tränk- und Deckmasse für Bitumen-Dachbahnen und -Dichtungsbahnen
- als Fugenvergussmassen
- als Korrosionsschutzmittel für Metalle
- als Bindemittel für Estriche und Fußbodenbeläge

Bitumen muss gemäß seiner breiten industriellen Nutzung unterschiedlichste Eigenschaften aufweisen. Je nach Art und Anzahl der bei der Bitumenherstellung durchlaufenen Verfahrensschritte werden viskose bis spröde Produkte erhalten. [5]

In Abbildung 2.6 sind die unterschiedlichen Bitumenarten dargestellt, welche anhand des Herstellungsverfahrens, der Anwendungsgebiete sowie der Konsistenzdaten unterschieden werden.



Abbildung 2.6: Terminologie der Kohlenwasserstoff-Bindemittel [4]

2.5.1 Straßenbaubitumen

Mit dem Begriff Straßenbaubitumen bezeichnet man Bitumensorten, die zur Herstellung von Asphalt für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen und im Wasserbau eingesetzt werden. Die Einteilung des Straßenbaubitumens erfolgt mittels Nadelpenetration bei 25°C. Bei dieser Prüfung wird die Härte des Bitumens mittels Eindringtiefe der Nadel ermittelt. Man unterscheidet Weichbitumen mit Penetrationswerten zwischen 250 1/10 mm und 900 1/10 mm bis hartes Straßenbaubitumen mit Penetrationswerten von 10 1/10 mm bis 30 1/10 mm, welche steifer und spröder sind. In Österreich kommt hauptsächlich mittelhartes Straßenbaubitumen zur Anwendung. [3]

2.5.2 Modifiziertes Bitumen

Es handelt sich um Bitumen, dessen rheologische Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung chemischer Zusätze modifiziert worden sind. Modifizierte Bitumen können als solche oder verschnitten, emulgiert oder gemischt verwendet werden. [3]

Bei den Modifizierungsprodukten handelt es sich um Naturkautschuk, synthetische Polymere, Schwefel und Organometallverbindungen. Eine Ausnahme stellt das polymermodifizierte Bitumen (PmB) mit Zugabe von 3 bis 5 M.-% organischen Polymeren dar [3]. Durch die Zugabe erlangt das Bitumen eine größere Plastizitätsspanne, ein besseres Tieftemperaturverhalten und ein besseres Haftverhalten an den Gesteinskörnern. [3]

2.5.3 Industriebitumen

Als Industriebitumen bezeichnet man ein Bitumen, das für andere Zwecke als zum Bau oder zur Erhaltung von Verkehrsflächen eingesetzt wird [3]. Bei Industriebitumen unterscheidet man zwischen Oxidations- und Hartbitumen. Bei Oxidationsbitumen handelt es sich um ein weiches Bitumen, dem bei der Herstellung Luft eingeblasen wird, um stärker ausgeprägte elastische Effekte zu erzielen. Dieses Bitumen eignet sich für Einsatzgebiete, wo

sowohl tiefe als auch hohe Temperaturen zu erwarten sind, wie z.B. bei Dachdeckungen. Hartbitumen ist eine Sonderform von Oxidationsbitumen [3], das bei Umgebungstemperatur charakteristische harte und spröde Eigenschaften besitzt. [4]

2.5.4 Bitumenemulsionen

Unter Bitumenemulsion versteht man die Verbindung von Bitumen mit einem wässrigen Medium, welche nur durch Zusatz verschiedener Emulgatoren und Stabilisatoren möglich wird. Es kommen sowohl einfaches Straßenbaubitumen als auch mit Polymeren modifiziertes Bitumen zur Anwendung. Die Emulsionen werden gemäß ihrem Ph-Wert nach anionischer und kationischer Emulsion unterschieden. Heutzutage werden fast ausschließlich kationische Emulsionen eingesetzt, da sich deren Haftungsverhalten als geeigneter erwiesen hat. Eine weitere Unterteilung erfolgt in stabile (z.B. DDK-Emulsion), halbstarile (z.B. zur Bindung von Recyclingmaterial) und unstarile (z.B. für Oberflächenbehandlungen) Emulsionen, wobei der Unterschied hier in der Brechzeit liegt. Bitumenemulsionen sind mit zunehmender Brechzeit stabiler. [3]

3 Asphalt

3.1 Definition

Unter Asphalt versteht man eine Mischung von Körnung mit einem bitumenhaltigen Bindemittel [4]. Hauptsächlich wird das sogenannte Asphaltmischgut aus Gesteinskörnung und bitumenhaltigen Bindemitteln zur Befestigung von Straßen und Verkehrsflächen (Radwege, Parkflächen, Flugplätze usw.) stationär hergestellt. Ein Asphaltmischgut beinhaltet etwa 95 M.-% Gesteinskörnung und 5 M.-% Bitumen. Je nach Anwendungsfall können diese Werte jedoch variieren und gegebenenfalls noch stabilisierende Stoffe hinzugefügt werden. [3]

3.2 Funktion

Ein Asphaltkörper hat primär die Aufgabe der Abtragung der auftretenden Spannungen. Der Aufbau eines Asphaltkörpers ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

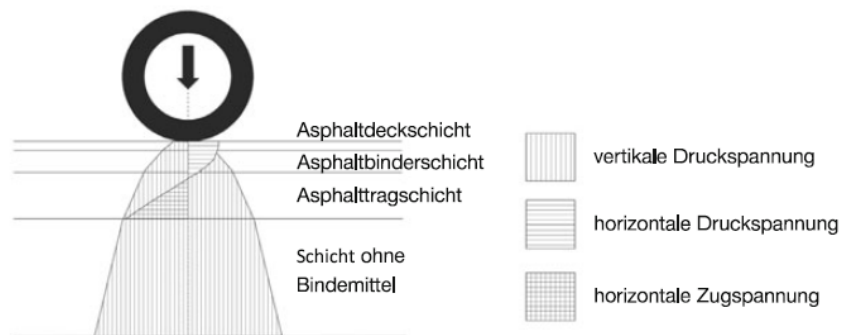


Abbildung 3.1: Typischer Spannungsverlauf in Asphalt-Straßenbefestigungen [3]

Aus Abbildung 3.1 lässt sich ableiten, dass in den oberen Schichten die vertikalen Druckspannungen am größten sind und entsprechend hohe Anforderungen an die Standfestigkeit des Asphalts und die Festigkeit der Gesteine gestellt werden müssen. Mit zunehmender Tiefe kann die Qualität der Gesteinskörnung entsprechend verringert werden. Demgegenüber sind die Biegezugspannungen, die sich bei der Belastung der Straßenbefestigung entwickeln, an der Unterseite des Gesamtaufbaus am größten. Für eine hohe Nutzungsdauer der Straße muss hier Material mit einer hohen Ermüdungsfestigkeit eingesetzt werden. [3]

Aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Asphaltbefestigung ist es möglich, die Materialeigenschaften durch die Verwendung unterschiedlicher Mischgutsorten in den einzelnen Schichten weitgehend optimal an die jeweiligen Anforderungen anzupassen. Dies ist nicht nur technologisch vorteilhaft, sondern auch wirtschaftlich, weil dadurch auch örtlich anstehende Gesteinskörnungen, die gegebenenfalls qualitativ nicht so hochwertig sind, in den geringer beanspruchten Bereichen eingesetzt werden können. An den Bereich der Fahrbahnoberfläche müssen noch weitere Anforderungen gestellt werden, die sich neben der Haltbarkeit vor allem an der Verkehrssicherheit orientieren. [3]

Jede Schicht des Asphaltkörpers besitzt seine individuelle Funktion und die dazugehörigen Anforderungen: [3], [11]

- **Deckschicht:** Die Deckschicht dient zur direkten Aufnahme der Verkehrsbelastung und soll diese an die darunter liegenden Schichten abgeben können. Sie soll dem Verkehr eine ebene, griffige, verformungsbeständige und helle Oberfläche bieten und das Eindringen von Oberflächenwasser verhindern.
- **Binderschicht:** Die Binderschicht soll eine hohe Schubfestigkeit und Standfestigkeit besitzen. Die Mindestdicke der Asphaltbinderschicht ist aus bautechnischen Gründen unbedingt einzuhalten, um die Aufnahme des Schubspannungsmaximums zu gewährleisten. Vielfach kommen aufgrund der hohen Ansprüche polymermodifizierte Bitumen zum Einsatz.
- **Tragschicht:** In der Tragschicht sollen die Normalspannungen schadlos aufgenommen und in den Untergrund eingeleitet werden. Je nach Verkehrslage kann diese Schicht stärker oder schwächer ausgeführt werden. Die Tragschicht besitzt keine hohen Qualitätsansprüche, da keine direkte Verkehrsbelastung oder Witterung vorhanden ist.
- **Tragdeckschicht:** Tragdeckschichten vereinen die Funktionen der Deck- und der Tragschicht. Deshalb muss diese Schicht einerseits dicht und witterungsbeständig sein und andererseits über eine ausreichende Tragfähigkeit und Flexibilität verfügen. Da die Beschaffenheit der Tragdeckschicht nicht an die Qualität der zwei einzelnen Schichten anknüpfen kann, wird diese Variante nur im untergeordneten Straßennetz angewendet.

3.3 Gesteinskörnungen

Die Anforderungen an die Gesteinskörnung ist in ÖNORM EN 13043 [12] für natürlich (Kies, Sand, Schotter, Splitt) als auch für rezyklierte Gesteinskörnungen geregelt. In Hinblick auf die hohe Beanspruchung durch den Verkehr sind an die stofflichen Eigenschaften der Gesteinskörnungen hohe Qualitätsanforderungen zu stellen. Dabei handelt es sich um folgende Eigenschaften, die in Tabelle 2 aufgelistet sind. [3]

Tabelle 2: Qualitätsanforderung an die stofflichen Eigenschaften der Gesteinskörnung [3]

- **Wetter-, Frost- und Tausalzbeständigkeit** verschärfte Anforderungen beim Einsatz in Deckschichten
- **Schlag- und Druckfestigkeit** vor allem auf hoch beanspruchten Straßen
- **Widerstand gegen Hitzebeanspruchung** zur Herstellung von Heißmischgut

- **Widerstand gegen Polieren sowie ausreichende Lichtreflexion** bei Verwendung in oberflächennahen Schichten, um ausreichende Verkehrssicherheit (Griffigkeit und Helligkeit) sicherzustellen
- **Affinität zum Bindemittel**

Eine weitere Anforderung an die Gesteinskörnung stellt die Körnung dar, die sich in Korngröße, Kornform, Über- und Unterkorn sowie Reinheit der Korngemische festlegt. Die Gesteinskörnung wird unterschieden in Feinanteile (< 0,063 mm-Sieb), Füller (Körner, die überwiegend das 0,063 mm-Sieb passieren), feine Gesteinskörnung und grobe Gesteinskörnung (beide Definitionen können in der Wendehorst Baustoffkunde nachgelesen werden. [3]). Die Füller werden nochmals unterschieden in Fremdfüller (mineralischer Füller, der aus einer anderen Gesteinsmischung hergestellt wurde) und Mischfüller (Füller mineralischen Ursprungs, der mit Calciumhydroxid gemischt wurde). [3]

Die Verformungsbeständigkeit von Asphalt steigt bei zunehmender Lagerungsdichte der Gesteinskörnung und bei einem höheren Anteil an gebrochenem Korn oder Grobkorn. Den größten Einfluss hat der Füller. Diese Partikel bilden zusammen mit dem Bindemittel widerstandsfähige Filme, welche die Gesteinskörner bedecken und miteinander verbinden. Mit zunehmendem Bitumen-Füller-Verhältnis steigt die Viskosität, was zu einer Verbesserung der Festigkeit und des Verformungswiderstandes führt. [11]

3.1 Bitumen

Gemäß Kapitel 2.5 gibt es ein breites Spektrum an Bitumenarten. Daher muss individuell auf den Einsatz des Bitumens die richtige Wahl des Bindemittels auf die Gebrauchseigenschaften des Mischgutes abgestimmt werden. Je weicher Bitumen, desto besser die Verarbeitbarkeit, jedoch sinkt mit zunehmender Weiche die Verformungsbeständigkeit. Deshalb werden vor allem in den unteren Tragschichten härtere Bitumen eingesetzt, während in den Deckschichten entweder polymermodifizierte Bitumen oder weiche Bitumen zur Anwendung kommen. [11]

Damit das Asphaltmischgut den entsprechenden Anforderungen entspricht, muss das optimale Verhältnis von Bitumen zu Gesteinskörnung verwendet werden. Falls zu viel Bitumen hinzugefügt wird, wirkt Bitumen wie ein Schmiermittel, da es sich um eine zähe Flüssigkeit handelt. Dieser Effekt verringert den Verformungswiderstand. Weiters benötigt Asphalt einen gewissen Hohlraumgehalt (2-6 Vol.-%), damit Bitumen bei Temperaturerhöhung sich schadlos ausbreiten kann. Die schadlose Ausbreitung des Asphaltes wäre durch einen zu hohen Bindemittelgehalt verhindert. Um eine gute Korn-zu-Korn-Haftung des Gemisches zu gewährleisten, muss das Bindemittel die Gesteinskörner vollständig ummanteln. [11]

Um den optimalen Bindemittelgehalt zu erlangen, werden mehrere Mischungen mit unterschiedlichem Bitumengehalt hergestellt und anschließend im Rahmen einer Erstprüfung im Labor ermittelt.

4 Verwendetes Probenmaterial

4.1 Bitumen

Als Bitumen wurde ein Straßenbaubitumen 70/100 (TU Laborcode B136A) verarbeitet. Es wurde ausschließlich von diesem Bitumen Gebrauch gemacht, um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Mischungen zu erlangen. Straßenbaubitumen 70/100 wird vor allem bei Deckschichten und im Wasserbau eingesetzt. Der Erweichungspunkt nach Delta-Ring und Kugel liegt bei 45,2°C und der Penetrationswert ist $80 \frac{1}{10} mm$. Der Performance Grade liegt bei PG 64-22.

4.2 Füller

Zur Prüfung sind unterschiedlichste Gesteinsarten zur Anwendung gekommen. In Bezug auf die Ermüdungsprüfung und das Ring- und Kugel-Verfahren wurde auf eine Vielfältigkeit der Füllermaterialien Wert gelegt, um auf deren unterschiedliche Eigenschaften eingehen zu können. Wie in Tabelle 3 ersichtlich, sind alle Füller außer F036, F040 – F042 und F053 für frühere Prüfungen im Labor auf 0,125 mm ausgesiebt worden. Die Füller F041 und F042 wurden sehr rein geliefert und wurden daher nicht extra noch einmal gesiebt. Die Füller F036, F040 und F053 wurden wie im Kapitel 5.2 beschrieben auf 0,125 mm gesiebt. Diese Siebungen erfolgten um das Ring- und Kugel-Verfahren nach EN 13179-1 [13] anwenden zu können. Die 17 Füller können grob in 7 verschiedene Arten, nämlich Kalksteinmehl, Quarzmehl, reines Kalkhydrat, Basalt, Granitporphyr, Sand und Granit unterteilt werden. Die genauen Bezeichnungen der Füller sind in Tabelle 3 aufgelistet und anschließend erklärt.

Tabelle 3: Verwendete Füllermaterialien

TU-Code	Gesteinsart	Herkunft
F036	Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F040	Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F041	reines Quarzmehl	Laborbedarf Carl Roth GmbH & Co. KG
F042	reines Kalkhydrat	Laborbedarf Carl Roth GmbH & Co. KG
F051	Kersantit/Granitporphyr	aus 0/2 bis 0,125 mm ausgesiebt
F052	schichtsilikat-/feldspatreiches Quarzmehl	aus 0/2 bis 0,125 mm ausgesiebt
F053	Kalksteinmehl	als Füller erhalten
F099	Kalksteinmehl	aus 0/2 bis 0,125 mm ausgesiebt
F100	Basalt (Klöch)	aus 0/2 bis 0,125 mm ausgesiebt

F101	Natursand aus reinem Quarz	aus 0/2 bis 0,125 mm ausgesiebt
F102	Brechsand	bis 0,125 mm ausgesiebt
F104	Granit (Limberg)	aus 0/2 bis 0,125 mm ausgesiebt
F108	Zement	bis 0,125 mm ausgesiebt
B606A	Mischprobe	5% F042 + 95% F100
B607A	Mischprobe	10% F042 + 90% F100
B608A	Mischprobe	15% F042 + 85% F100
B609A	Mischprobe	20% F042 + 80% F100

Bei den Füllern **F036**, **F040** und **F053** handelt es sich um Kalksteinmehle mit einem hohen Anteil von Karbonat (Kalzit und Dolomit). Alle drei Füller wurden mittels Siebung auf 0,125 mm ausgesiebt. **F041** ist ein reines Quarzmehl, während **F052** schichtsilikat-/feldspatreiches Quarzmehl ist. **F042** ist ein reines Kalkhydrat. Mit diesem Füller wurden die Proben B606A mit 5%, B607A (10%), B608A (15%) und B609A (20 Vol.-%) Kalkhydrat F042 vermischt, um möglicherweise eine Verbesserung der Mastix bei den Ermüdungsversuchen und dem Ring- und Kugel-Verfahren gegenüber dem reinen Füller **F100** Basalt zu erhalten. Die Ergebnisse sind in den Kapiteln 6.2.2.1.3 und 6.2.1 näher beschrieben. Bei **F051** handelt es sich um einen Granitporphyr aus der Böhmisches Masse. Weiters sind zwei Hartgesteine (Granit) zur Anwendung gekommen (**F099** und **F104**), wobei der Füller **F099** eher als Kalksteinmehl zu klassifizieren ist, da ein überwiegend großer Anteil an Kalzit enthalten ist. Der Füller **F104** erweist sich tatsächlich als ein Granitgestein. **F101** ist ein sehr reiner Natursand mit einem sehr hohen Anteil an Quarz (~99 %). Der Füller **F102** ist ein Brechsand mit Anteilen von Schichtsilikaten, Quarz und Feldspäten. Der Füller **F108** ist eine Zementprobe, die nur zu Vergleichszwecken verwendet wurde. [14]

4.3 Mischung

Jede Mischung wird nach demselben Prinzip hergestellt. Der Anteil an benötigten Füllern wird im Mischbehälter abgewogen und für eine Stunde im Trockenschrank bei 180°C auf seine Massenkonstanz getrocknet.

Um genau 15 g Bitumen hinzufügen zu können, wird etwas mehr Bitumen als benötigt auf einer präzisen Waage abgewogen. Im nächsten Schritt wird das Bitumen über der Heißluftpistole zwischen 170°C und 180°C erhitzt und mittels Metall- oder Glasstab homogenisiert.

Das flüssige Bitumen wird ohne weitere Erwärmung dem trockenen Füller zu dosiert. Nun wird die Bitumen-Füller-Mischung über der Heißluftpistole mittels Metall- oder Glasstab so lange vermischt, bis eine homogene Masse entsteht. Durch die ständige Erhitzung verfestigt sich das Bitumen nicht und die Feinanteile können gut eingerührt werden.

Um eine homogene Mischung zu erhalten, wird der fertige Mastix in den Kühlschrank gestellt.

Tabelle 4: Arbeitsschritte – Herstellung einer Mischung

Arbeitsschritte	
1	Den Füller 1 h bei 180°C im Trockenschrank belassen
2	Bitumen mittels Heißluftpistole auf 170-180°C erhitzen
3	Füller und Bitumen über der Heißluftpistole bei 170-180°C zusammenmischen und homogenisieren

4.3.1 Hergestellte Mastixproben für das Delta-Ring- und Kugel-Verfahren

Der Erweichungspunkt von Bitumen nimmt mit zunehmendem Füllergehalt bis zu einem gewissen Verhältnis linear zu und steigt dann exponentiell an. Um diese Kurven zu erhalten, wurden für das Delta-Ring- und Kugel-Verfahren, gemäß EN 13179-1 [13], für jeden Füller, falls die Mischung überhaupt möglich war, fünf Mischungen hergestellt. Für jede Mischung wurde 15 g Bitumen der Sorte 70/100 verwendet. Der Anteil an Füllermaterial variiert je nach gewünschtem Mischungsverhältnis, welche in Tabelle 5 aufgelistet sind.

Tabelle 5: Mischverhältnisse fürs das Delta-Ring- und Kugel-Verfahren

Anteil an Füller in Volumenprozent	Anteil an Bitumen in Volumenprozent
10%	90%
25%	75%
37,5%	62,5%
45%	55%
50%	50%

Um den Wechsel von linearem zu exponentiellem Verlauf besser beschreiben zu können, wurde beim Füller F042 eine weitere Mischung von 17,5 Vol.-% Füller und 82,5 Vol.-% Bitumen und beim Füller F101 eine Mischung von 47,5 Vol.-% Füller und 52,5 Vol.-% Bitumen hergestellt.

Die Mischproben B606A – B608A und B619A bestehen aus den in Tabelle 5 angegebenen Mischverhältnissen von Bitumen zu Füller in Volumenprozent. Jedoch besteht der Füller

nicht nur aus reinem Füller F100 (Basalt), sondern es wurden Mischungen mit je 5, 10, 15 und 20 Volumenprozent Füller F100 durch den Füller F042 (reines Kalkhydrat) ersetzt.

4.3.2 Ermüdungsversuche mittels DSR

Die Ermüdungsversuche wurden alle mit dem Mischungsverhältnis Bitumen zu Füller = 1:1,5 hergestellt. Einzig die Proben mit der Mischung Basalt (F100) und reines Kalkhydrat (F042) wurden im selben Mischungsverhältnis wie für das Delta-Ring- und Kugel-Verfahren verwendet.

4.4 Übersicht der durchgeführten Prüfungen

In der Tabelle 6 sind die Anzahl der durchgeführten Prüfungen sowie die Anzahl der Probenherstellung aufgelistet.

Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten Arbeiten

Durchgeführte Arbeit		Anzahl
➤ gesiebt		4
➤ Dichtebestimmung		2
➤ hergestellt		64
➤ DSR-Versuche		137
	• dehnungsgesteuert	15
	• spannungsgesteuert	122
➤ Ring- und Kugel-Versuche		65

5 Prüfmethodik

5.1 Bestimmung der Dichte der Füller nach EN 1097-7

Die Bestimmung der Dichte eines Füllers mittels Pyknometer wird gemäß EN 1097-7 [15] ermittelt. Das Verfahren basiert auf der Verdrängung einer bestimmten Menge einer Flüssigkeit mit bekannter Dichte durch die Messprobe. [15]

5.1.1 Prüfungsdurchführung

Das Pyknometer wird mit mindestens 50 g eingewogen, um bei Raumtemperatur 30 min abzukühlen. Die Messprobe darf keine Klumpen enthalten. Falls ebensolche vorhanden sind, müssen diese mittels Spachtel zerstoßen und durchmischt werden. Das Pyknometer ist vollständig mit Wasser zu füllen und mittels Stopfen zu schließen. Das übertretende Wasser muss mittels Tuch entfernt werden. Die Probe wird für eine Stunde in ein auf $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ temperiertes Wasserbad platziert. Nach dem Wasserbad wird das Pyknometer inklusive Stopfen gewogen. [15]

Mit Hilfe der Masse des Pyknometers inklusive Messprobe und Prüfflüssigkeit kann auf die Dichte der Messprobe aus nachfolgender Formel 1 geschlossen werden.

Formel 1: Berechnung der Dichte eines Füllers [15]

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

m_0	Masse des leeren Pyknometers, inklusive Stopfen in Gramm
m_1	Masse des Pyknometers mit Messprobe in Gramm
m_2	Masse des Pyknometers mit Messprobe und Prüfflüssigkeit in Gramm
V	Volumen des Pyknometers in Milliliter
ρ_l	Dichte der Prüfflüssigkeit in Mg/m^3
ρ_f	Dichte des Füllers in Mg/m^3

Tabelle 7: Arbeitsschritte – Bestimmung der Dichte eines Füllers

Arbeitsschritte	
1	Pyknometer mit Füller füllen und wiegen
2	Pyknometer mit Wasser vollständig füllen
3	Überschüssiges Wasser mittels Tuch entfernen

4	Probe 1 h in ein Wasserbad mit 25°C stellen
5	Nach einer Stunde wiegen

5.2 Siebung auf Größtkorn 0,125mm

Gemäß ÖNORM EN 13179-1 [13] müssen die Füller auf 0,125 mm ausgesiebt werden, um diesen Füller für das Ring- und Kugel-Verfahren anwenden zu können. Alle Füller außer die Füller F036, F040 und F053 wurden für frühere Arbeiten bereits auf 0,125 mm ausgesiebt. Daher erfolgte ausschließlich für diese drei Füller eine Siebung mittels Maschensieb 0,125 mm, siehe Kapitel 4.2.

Die drei Füller wurden einer Trockensiebung (Abbildung 5.1) mittels Siebturm unterzogen. Dabei diente für die Füller F036, F040 und F053 ausschließlich das Maschensieb 0,125 mm. Durch die Rüttelung während der Siebung bildeten sich jedoch Klumpen (aneinanderhaften der einzelnen Gesteinskörnung), welche zu einer geringeren als zu erwarteten Passierbarkeit des 0,125 mm-Siebs führte. Um genug Füllermaterial zu erhalten wurde daher der Füller F053 einer weiteren händischen Siebung mittels Spachtel unterzogen.



Abbildung 5.1: Trockensiebung mittels Siebturm¹

Um den Einfluss der Korngröße auf die Ermüdungsfestigkeit von Asphaltmastix zu testen, wurde der Füller F100 nochmals einer Siebung durch das Maschensieb 0,063 mm unterzogen. Der Füller F100 wurde ausschließlich einer Trockensiebung mittels Siebturm unterzogen und keiner händischen Siebung. Es wurde nur der Anteil gesiebt der für eine weitere Probenherstellung benötigt wurde.

5.3 Delta-Ring- und Kugel-Verfahren nach EN 13179-1

Gemäß EN 13179-1 [13] dient das Verfahren zur Bestimmung der Erhöhung des Erweichungspunktes einer 37,5 Volumenanteil mineralischen Füller und 62,5 Volumenanteil Bitumen bestehenden Bitumen-Füller-Mischung, bezogen auf den Erweichungspunkt den in

¹ Foto Lesch P.

dieser Mischung verwendeten Bitumens. Für diese Arbeit wurde nur der ermittelte Erweichungspunkt der Bitumen-Füller-Mischung bei unterschiedlichen Volumenanteilen von Bitumen zu Füller geprüft und nicht der Unterschied zum reinen Bitumen. Bei dieser Prüfung werden zwei mit Mastix gefüllte Ringe in einem Flüssigkeitsbad mit kontrollierter Temperaturänderung erwärmt. Jeder gefüllte Ring trägt eine Stahlkugel. Der Erweichungspunkt ist jene Temperatur, bei der die Mastixschicht so weit erweicht ist, dass die von dem Mastix eingeschlossenen Kugeln die Messstrecke von 1 Zoll, dies entspricht $25,0 \pm 0,4$ mm, zurückgelegt haben. [16]

5.3.1 Probenvorbereitung

Es findet immer eine Doppelprüfung statt. Daher müssen zwei Ringe aus einer Kupfer-Zink-Legierung im Trockenschrank für eine Stunde erhitzt werden. Die Temperatur des Trockenschanks sollte etwa 90°C oberhalb des zu erwartenden Erweichungspunktes der Probe liegen. Währenddessen werden die Kugeln bei 5°C im Kühlschrank gekühlt, wenn eine Prüfung mittels destillierten Wassers stattfindet. Bei Prüfungen mit Glycerol müssen die Kugeln bei Raumtemperatur gelagert werden. [16]

Aus der zu testenden Mastix werden etwa 7 g abgewogen, mittels Heißluftpistole erhitzt und mittels Glas- oder Metallstab homogenisiert. Der Mastix darf keine Klumpen bilden und muss fließfähig sein. Falls die Fließfähigkeit der Probe nicht gewährleistet ist, gilt die Prüfung als ungültig, da die Probe nur durch händisches Verdichten in die Ringe eingefüllt werden kann. Diese Verdichtung führt zu einer Verfälschung der Ergebnisse. Die Ringe werden auf eine mit Formtrennmittel beschichtete Glasplatte gelegt und mit der flüssigen Bitumen-Füller-Mischung leicht überhöht eingefüllt. Dabei darf kein Mastix seitlich herausrinnen, denn auch dann ist die Probe von Neuem herzustellen. [16]

Die Untersuchungsproben sind anschließend bei Raumtemperaturen für 30 Minuten abkühlen zu lassen. Danach wird der Überschuss an Probenmaterial mittels Spachtel planeben zur Oberkante der Ringe abgeschnitten. Die Untersuchungsproben und das Messgestell sind bei Prüfungen mittels destillierten Wassers für 15 Minuten im Kühlschrank oder bei Prüfung im Glycerolbad für 15 Minuten bei Raumtemperatur abkühlen zu lassen. [16]

5.3.2 Prüfungsdurchführung

Anschließend sind die Ringe in die Halterung einzulegen. Beide Proben werden mit einer Kugel belegt und in den Messbecher gestellt. Die Prüfflüssigkeit ist bis zu 50 ± 3 mm oberhalb der Oberkante der Ringe in den Messbecher zu füllen. Mit steigender Temperatur 5 K/min legen die Kugeln den vordefinierten Weg von $25,0 \pm 0,4$ mm zurück, indem sich ein Mastix-Sack ausbildet. Das Gerät ermittelt automatisch die Erweichungspunkte. [16]

Die Prüfung darf mittels destillierten Wassers bis zu 80°C durchgeführt werden. Wenn die Temperatur jedoch höher ist, muss die Prüfung mit Glycerol wiederholt werden. Der ermittelte Erweichungspunkt im destillierten Wasserbad ist diskontinuierlich zur Temperatur

im Glycerolbad. Der Erweichungspunkt ist im Wasserbad um etwa 4°C niedriger als im Glycerolbad. Dieser Effekt soll immer bei den ermittelten Ergebnissen angeführt werden. [16]

Die Erweichungspunkte der Doppelprüfung dürfen nicht mehr als 3°C auseinander liegen. Falls doch, muss die gesamte Prüfung wiederholt werden [13]. Je höher der Mittelwert der Erweichungspunkte Ring-Kugel liegt, desto härter ist das Bitumen. Das verwendete Gerät und die dazugehörigen Utensilien sind in Abbildung 5.2 abgebildet.

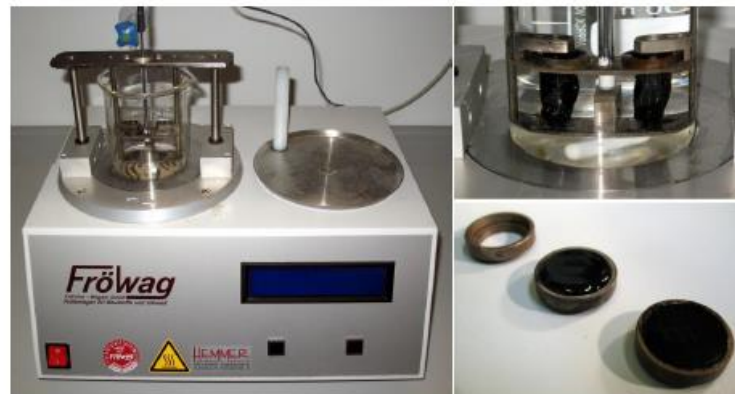


Abbildung 5.2: li.: Gerät bei der Prüfung, re. oben: Ausbildung der Bitumensäcke, re. unten: Ringe, unbefüllt, überhöht befüllt, abgeschnitten [2]

Tabelle 8: Arbeitsschritte – Delta-Ring- und Kugel-Verfahren

Arbeitsschritte		
	Bei Prüfflüssigkeit im destillierten Wasser	Bei Prüfflüssigkeit im Glycerolbad
1a	Ringe für 1 h bei 90°C oberhalb des zu erwartenden Erweichungspunktes in den Trockenschrank legen	
1b	Kugeln, Prüfflüssigkeit, Halterung und Messbecher im Kühlschrank bei 5°C aufbewahren	Kugeln, Prüfflüssigkeit, Halterung und Messbecher bei Raumtemperatur aufbewahren
2	Mastixprobe über der Heißluftpistole erhitzen bei 170-180°C	
3	Ringe mit Mastix überhöht einfüllen und für 30 min bei Raumtemperatur kühlen lassen	
4	Überschüssiges Mastixmaterial planeben abschneiden und im Kühlschrank bei 5°C für 15 min abkühlen lassen.	Überschüssiges Mastixmaterial planeben abschneiden und bei Raumtemperatur für 15 min abkühlen lassen
5	Prüfbehälter mit Prüfflüssigkeit füllen. Ringe und Kugeln in die Halterung einlegen	
6	Prüfung starten	

5.4 Dynamisches Scherrheometer (DSR)

Das dynamische Scherrheometer (DSR) stellt einen Relaxations- oder Schwingungsversuch dar, um neben dem thermo-viskosen Verhalten auch das visko-elastische Verhalten von Bitumen zu beschreiben. Der große Vorteil von Schwingungsversuchen, auch Oszillationsversuche genannt, gegenüber Relaxationsversuchen liegt in der Möglichkeit, während des Versuchs die einzelnen Messparameter verändern zu können. Abhängig vom variierten Parameter spricht man von Temperatur-, Amplituden- oder Frequenzsweep. Daher werden Oszillationsversuche auch „Mehr-Punkt-Messungen“ genannt. Für die Versuchsreihe wurde das Gerät Anton Paar MCR 302 verwendet, welches in Abbildung 5.3 dargestellt wird. [2]



Abbildung 5.3: Anton Paar MCR 302²

Für diese Arbeit wurde ausschließlich mit dem Messkopf „PP08“ geprüft. Es handelt sich hierbei um eine Platte mit einem Durchmesser von 8 mm. Die Messkopfbezeichnung „PP“ bedeutet, dass es sich um ein Platte-Platte-Messsystem (Abbildung 5.4) handelt. In der Praxis kommen auch Platte-Kegel-Messsysteme „PC“ zur Anwendung. Die Platte-Platte-Messsysteme haben den großen Vorteil, dass sich kein Füllerpartikel in der Mitte verkeilen kann, wie bei einem „PC“ System. Bei dieser Prüfung wird die kraftschlüssig eingespannte Probe zwischen einer oberen oszillierenden Platte und einer sich nicht bewegenden unteren Platte durch Scherbeanspruchung deformiert. Auf eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Platten und dem Probekörper ist zu achten, da die Probe sich sonst ablösen könnte. [17]

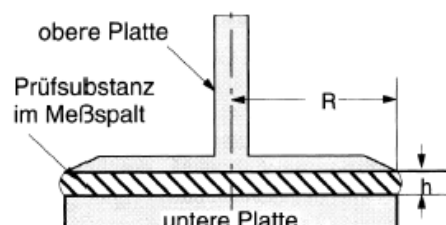


Abbildung 5.4: Platte-Platte-Messung

² Foto Lesch P.

Die verursachte Deformation entspricht bei Platte-Platte-Messsystemen der folgenden Formel 2. [2]

Formel 2: Ermittlung der Scherdeformation

$$\gamma = \frac{s}{h} * 100$$

- γ Scherdeformation in %
- s Auslenkung am äußersten Umfang des Messkopfes in mm
- h Spalt zwischen unterer Platte und oberem Messkopf in mm

Das Rheometer durchläuft bei jeder Scherbeanspruchung einen Oszillationszyklus, der in Abbildung 5.5 dargestellt ist. Beginnend beim Ausgangspunkt A schert die obere Platte nach B aus, um wieder über den Punkt A nach C und in die Ausgangslage zurückzufinden. Diese Punktfolge wird als ein Oszillationszyklus bezeichnet. [2]

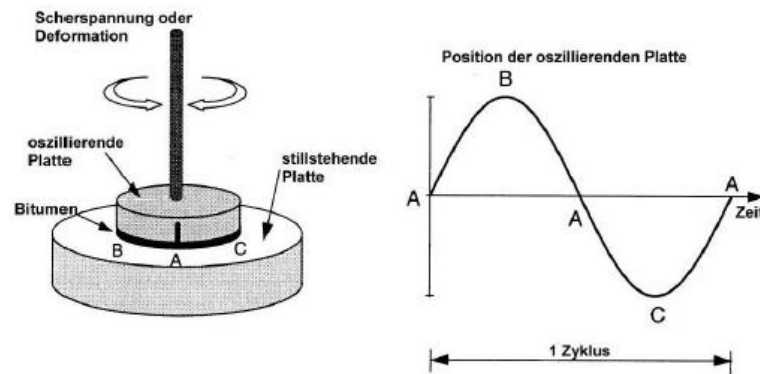


Abbildung 5.5: Oszillationszyklus des Rheometers [17]

Die größte auftretende Deformation ist durch das Material und das Gerät begrenzt. Die materialabhängigen Grenzen stellen einerseits das nicht erlaubte Überschreiten des linear visko-elastischen Bereichs (LVE) des Bitumens dar. Dies führt zu keinem linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung, und kann zum Abreißen der Probe führen. Andererseits muss eine gewisse Mindestdeformation aufgrund der Messgenauigkeit (Winkelauflösung) des verwendeten Rheometers vorhanden sein. Gerätetechnisch kann der Antriebsmotor nur ein gewisses Drehmoment aufbringen und die geeignete Temperierung muss möglich sein. [17]

Durch die aufgebrachte Scherspannung deformiert sich der Probekörper, welcher darauf „antwortet“. Falls die gesamte aufgebrachte Scherspannung im direkten Zusammenhang mit der Deformation steht, spricht man von einem ideal-elastischen Materialverhalten. Der zweite Extremfall wäre ein ideal-viskoses Verhalten, bei dem es zu einer zeitlichen Verschiebung der Deformation kommt. Die zeitliche Verschiebung wird als Phasenverschiebungswinkel δ (Phasenwinkel δ) bezeichnet. Diese beiden Extremfälle des Verlaufes der Scherspannung zum Verlauf der Deformation sind in Abbildung 5.6 dargestellt. [17]

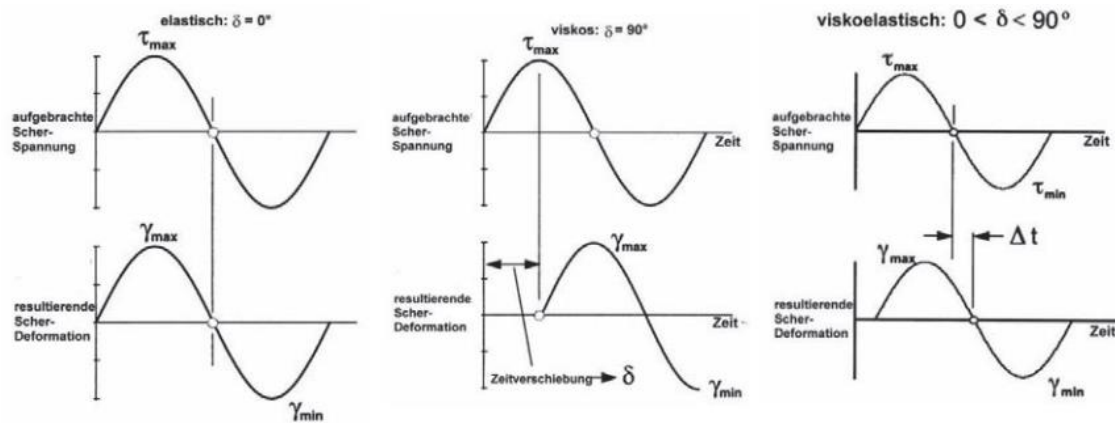


Abbildung 5.6: li.: ideal-elastisches Materialverhalten, mi.: viskoses Materialverhalten, re.: visko-elastisches Materialverhalten [17]

Materialverhalten mit einem Phasenverschiebungswinkel $\delta = 0^\circ$ werden als ideal-elastisch bezeichnet. Der Phasenverschiebungswinkel von $\delta = 90^\circ$ entspricht einem ideal-viskosen Materialverhalten. Wie in Kapitel 2.3.1 erklärt wird, besitzt Bitumen ein visko-elastisches Materialverhalten. Daher wird der berechnete Phasenverschiebungswinkel im gebrauchtsrelevanten visko-elastischen Bereich von Bitumen immer zwischen 0° und 90° liegen (Abbildung 5.6). [17]

Der Phasenverschiebungswinkel ist nach folgenden Formeln definiert. [17]

Formel 3: Phasenverschiebungswinkel

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} * 360$$

Formel 4: Zeit der Schwingung

$$\text{mit } t = \frac{1}{f}$$

δ Phasenverschiebungswinkel in $^\circ$

t Zeit für eine Schwingung in $^\circ$

Δt Zeitverschiebung zwischen der maximalen Scherspannung und maximalen Deformation in s

f Frequenz in Hz

Für diese Arbeit wurde einerseits im „Controlled Stress“-Modus und andererseits im „Controlled Deformation“-Modus gemessen. Beim ersten Modus wird eine Scherbeanspruchung aufgebracht und die Deformation mittels Phasenverschiebungswinkel sowie der komplexem Schubmodul berechnet. Im zweiten Fall wird eine vordefinierte Deformation auf den Probekörper aufgebracht und die benötigte Scherbeanspruchung, der Phasenverschiebungswinkel und der komplexe Schubmodul werden erhalten. Die Ergebnisse werden vom Computer ausgegeben. Die maximale Scherspannung und die maximale Deformation werden nach folgenden Formeln berechnet. [17]

Formel 5: maximale Scherspannung

$$\tau_{max} = \frac{2 * M_{max}}{\pi * r^3}$$

und

Formel 6: maximale Deformation

$$\gamma_{max} = \frac{\alpha_{max} * r}{h}$$

 τ_{max} maximale Scherspannung in Pa γ_{max} maximale Deformation M_{max} maximales Drehmoment in Nm α Verdrehwinkel in rad

r Radius des Messkopfes in m

h Messspalt in mm

Unter dem komplexen Schubmodul versteht man jene Spannung, die benötigt wird, um eine bestimmte Deformation zu erhalten oder die bei einer vorgegebenen Deformation auftritt. Daher dient der komplexe Schubmodul als Maß für die Verformungsresistenz. Der komplexe Schubmodul $[G^*]$ kann in zwei Teile unterteilt werden. Einerseits in den Realteil, oder auch Speichermodul genannt $[G']$, und andererseits in den Imaginärteil, oder auch Verlustmodul genannt $[G'']$. [11]

Die Verformbarkeit der Probe wird umso schwerer, je größer der komplexe Schubmodul wird.

Der komplexe Schubmodul ist gemäß Formel 7 definiert. [11]

Formel 7: komplexer Schubmodul

$$|G^*| = G' + i * G'' = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}$$

 $|G^*|$ komplexer Schubmodul in Pa τ_{max} maximale Scherspannung in Pa G' Speichermodul in Pa γ_{max} maximale Deformation G'' Verlustmodul in Pa

5.4.1 Probenvorbereitung

Für diese Arbeit erfolgten ausschließlich Ermüdungsprüfungen im DSR. Die EN 12697-24 [18] definiert Materialermüdung als „die Verringerung der Festigkeit eines Materials bei wiederholter Belastung im Vergleich mit der Festigkeit unter Einzellast“. Materialermüdung beschreibt damit „eine statisch unkritische Belastung, die zu einer Funktionsuntüchtigkeit oder auch zum Totalausfall eines Bauteils führen kann, wenn sie oft genug auf das Bauteil einwirkt.“ [17]

Für frühere Arbeiten erfolgten Ermüdungsprüfungen im DSR bei einer Temperatur von 10°C und einer Frequenz von 30 Hz. Diese Temperatur erwies sich als sinnvoll, da die Asphaltmastixprobe die notwendige Steifigkeit erreicht, die ein Kriechen des Probekörpers im Rheometer verhindert. Durch das Kriechen des Probekörpers erfolgt keine Ermüdungsprüfung, da gemäß EN 12697-24 [18] Ermüdung der wiederholten Aufbringung einer Belastung bis zum Materialversagen entspricht. [17]

Die Ermüdungsprüfungen werden immer mit einer parabolischen Prüfkörpergeometrie mit einer Höhe von 3 mm, anstatt von 2 mm wie in der SHRP-Richtlinie vorgegeben, und einem Durchmesser von 8 mm sowie einer Einschnürung von 2 mm durchgeführt. Die Vergrößerung der Probenkörperhöhe erwies sich als sinnvoll, um genügend Platz für die Einschnürung zu gewährleisten. Die Einschnürung reicht nicht bis zum Rande der Probe, um keine ungünstigen Spannungskonzentrationen beim Übergang von der Probe zum Stator zu erhalten. Die Prüfkörpergeometrie und die berechnete Spannungsverteilung im FE-Programm sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Die rote Farbe in Abbildung 5.7 weist auf die größte Spannung, die blaue auf die kleinste Spannung hin. Es wurde ausschließlich mit einem Rheometer von 8 mm gemessen, da bei 10°C der Mastix eine sehr hohe Steifigkeit besitzt und die Steifigkeit das maximale Drehmoment des Rheometers beeinflusst. [17]

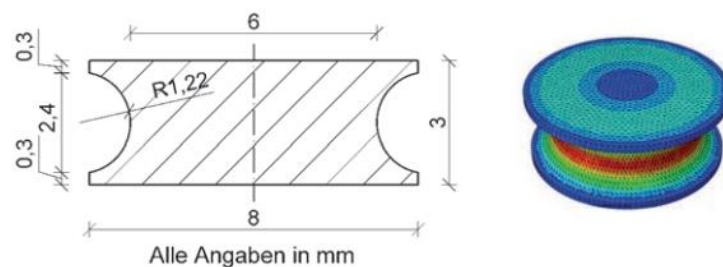


Abbildung 5.7: li.: Querschnitt des Probekörpers, re.: ermittelte Spannungsverteilung bei 10°C im FE-Programm [17]

Gemäß Mandahus [11] erwies sich diese Prüfkörpergeometrie als sinnvoll, da die größten Spannungen in der Einschnürung zu erwarten sind und fast keine Spannung am Rande der Probe auftritt. Weiters kann ein Adhäsions- (Bruch oberhalb des Probekörpers) nahezu ausgeschlossen werden. Somit tritt der gewollte Kohäsionsbruch (Bruch innerhalb des Probekörpers) aufgrund der Spannungskonzentration in der Einschnürung auf. [11]

Der Kohäsionsbruch kann nur für Temperaturen von 10°C bestätigt werden, weil nur Untersuchung bei 10°C stattgefunden hatten. Versuche bei 5°C versagten durch einen Bruch sofort nach Aufbringung der Spannung. Für Prüfungen oberhalb der 10°C erscheint diese Probegeometrie sinnvoll, da Versuche bei Temperaturen von 15 und 20°C durchgeführt werden konnten.

Um diese Geometrie in der Realität zu erhalten, wird eine hitzebeständige und biegbare Silikonform mit Hilfe von Edelstahl-Positivformen gegossen. Diese Körper sind notwendig, da diese spezielle Prüfkörperform durch Trimmen nicht zu erreichen wäre. Damit die Silikonform ihre Geometrie beibehält, wird sie mit einem Gummiband fixiert und auf einer Seite eingeschnitten, um sie nach dem Erhärten der Mastix besser entnehmen zu können. [17]

Wie oben erwähnt wurden Ermüdungsprüfungen im „Controlled Stress“-Modus durchgeführt. Jede dieser Prüfungen ergibt den komplexen Schubmodul, sowie den Phasenverschiebungswinkel (Y-Achse) über die Anzahl der Lastwechsel (X-Achse) (Abbildung 5.8). Bei diesen Prüfungen wird immer dieselbe Schubspannung aufgebracht, bis es zur

„Ermüdung“, also zum Bruch oder Versagen des Probekörpers kommt. Der Verlauf weist immer dieselben drei signifikanten Phasen auf.

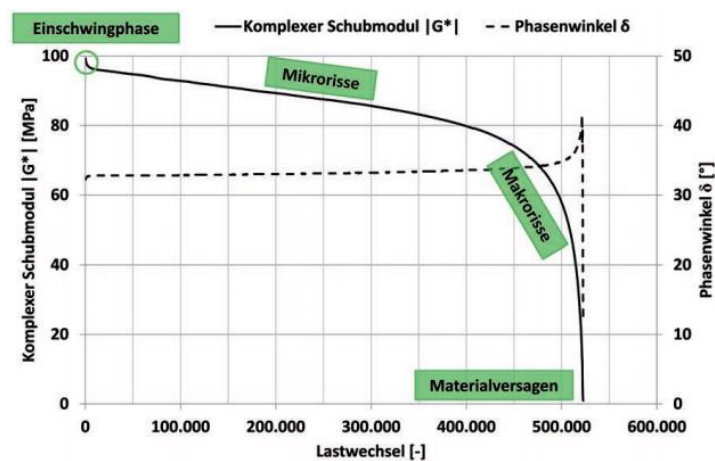


Abbildung 5.8: Ermüdungsversuch im DSR [17]

Die **erste Phase**, Einschwingphase, wird durch einen starken Abfall des komplexen Schubmoduls gekennzeichnet. Dieser Abfall erfolgt durch das Aufbringen einer Scherbeanspruchung, welche primär Thixotropie ermöglicht. Unter dem Begriff Thixotropie versteht man den konstanten Abfall der Viskosität unter Aufbringung einer Scherbeanspruchung. In der Rheologie stellt die Thixotropie zeitabhängige Fließeigenschaften dar. Dabei handelt es sich um einen reversiblen Vorgang, d.h. während der Beanspruchung nimmt die Viskosität ab und bei Entlastung kommt es zu einer Wiederherstellung der Viskosität. [19]

Sekundär erfolgt die rasche Abnahme des komplexen Schubmoduls in der Einschwingphase durch Freisetzung von Energie durch die Scherbeanspruchung. Die Freisetzung von Energie führt zur Erwärmung des Probekörpers, welcher wiederum leichter verformbar ist. [11]

Der Phasenverschiebungswinkel erfährt anfangs eine rasche Zunahme und verhält sich somit spiegelverkehrt zum komplexen Schubmodul.

In der **zweiten Phase**, Bildung von Mikro-Rissen, nimmt der komplexe Schubmodul stetig durch entstehende Mikro-Risse ab. Die Steifigkeit der Mastix wird durch die Mikro-Risse verringert. Der Phasenverschiebungswinkel weist wiederum einen spiegelverkehrten Verlauf auf. [17]

In der **dritten Phase** verbinden sich die zuvor entstandenen Mikro-Risse zu Makro-Rissen. Dieser Vorgang führt zu einem rasanten Abfall des komplexen Schubmoduls, bis es zum Bruch kommt. In dieser Phase kann der Probekörper nicht mehr als homogen angesehen werden. Häufig wird der Ermüdungsbruch mit einem Verlust von 50 % der Anfangsfestigkeit des komplexen Schubmoduls $|G^*|$ angegeben. [11]

Der Phasenverschiebungswinkel weist in der letzten Phase einen starken Anstieg bis zum Bruch auf. Im Moment des Bruches fällt er rapide ab. [11]

5.4.2 Prüfungsdurchführung

Zuerst wird mittels Druckluft die Prüfgeometrie auf die gewünschte Temperatur abgekühlt. Erst bei Erreichen von $\pm 0,1^\circ\text{C}$ der gewünschten Temperatur wird die Temperatur für 10 Minuten gehalten um eine optimale Temperierung zu erhalten. Nach der Temperierung erfolgt eine Bestimmung des Nullspaltes (Abbildung 5.9) bei Prüftemperatur.

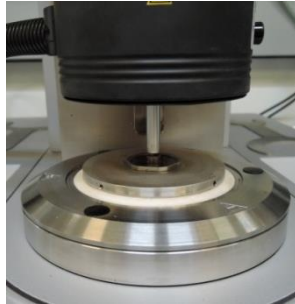


Abbildung 5.9: Bestimmung des Nullspaltes³

Nach Bestimmung des Nullspaltes fährt das Gerät auf eine Warteposition von 50 mm hoch, um ein Einlegen der Silikonform (Abbildung 5.10) zu erleichtern. Damit die Silikonform die extremen Temperaturunterschiede schadlos übersteht, ist diese hitzebeständig sowie biegsam und mit einem Gummiring zu fixieren. Nachdem der Stempel wieder auf die Nullspalthöhe zurückfährt, wird die Temperatur für 10 Minuten auf Einlegetemperatur (130°C) erhöht.

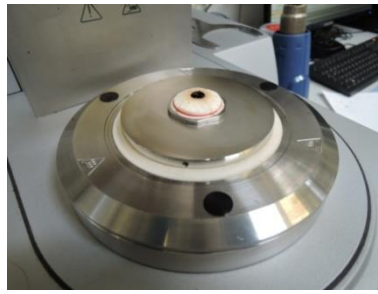


Abbildung 5.10: Einlegen der Silikonform⁴

Währenddessen wird die Mastixprobe vorbereitet, indem dieser erwärmt, verflüssigt und homogenisiert wird. Nun wird der heiße Mastix in die Silikonform eingegossen (Abbildung 5.11). Die hohe Temperatur der Silikonform verhindert zu schnelles Abkühlen des Bitumens, welches zu Hohlräumen innerhalb der Probe führen würde. Um einen guten Verbund zwischen der oberen oszillierenden Platte und dem Probekörper zu erhalten, fährt das Gerät den Rheometer gleich nach dem Eingießen auf 3 mm herunter.

³ Foto Lesch P.

⁴ Foto Lesch P.

Abbildung 5.11: Überhöhtes Einfüllen der Mastix⁵

Im nächsten Schritt wird die Temperatur für 10 Minuten wieder auf die Prüftemperatur heruntergekühlt. Nach dem Abkühlvorgang wird mittels erhitzter Spachtel das überstehende Bitumen entfernt und in weiterer Folge der Gummiring entfernt, um die Silikonform zu entnehmen (Abbildung 5.12). Im letzten Schritt erfolgt für 15 Minuten die Temperierung auf Prüftemperatur. Diese Temperierung dient zur Herstellung einer Probe, die innen sowie außen dieselbe Temperatur aufweist. Danach beginnt die Prüfung. Jede Prüfung wurde zur besseren Vergleichbarkeit dreimal wiederholt und daraus der Mittelwert ermittelt. Dieser Mittelwert stellt das vorhandene Ergebnis dar. [11]

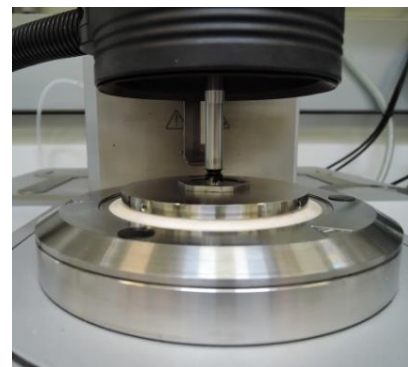
Abbildung 5.12: li.: Entfernen der überschüssigen Mastix, re.: fertige Probe für die Prüfung⁶

Tabelle 9: Arbeitsschritte – DSR

Arbeitsschritte	
1	10 Minuten auf Prüftemperatur kühlen
2	Nullspaltbestimmung
3	Einlegen der Silikonform
4	Erwärmung des DSR auf Einlegetemperatur 130°C für 10 Minuten
5	Mastix erhitzen (170-180°C), homogenisieren und für den Einbau bereitstellen

⁵ Foto Lesch P.⁶ Foto Lesch P.

6	Probe einbauen und Trimmposition einnehmen
7	10 Minuten auf Prüftemperatur abkühlen
8	Überschüssige Probe mittels Spachtel entfernen
9	Entnahme der Silikonform
10	15 Minuten auf Prüftemperatur kühlen
11	Prüfung starten

5.4.3 Prüfungsarten

5.4.3.1 Spannungsgesteuerte Prüfung

Für diese Arbeit wurden einerseits spannungsgesteuerte Prüfungen durchgeführt. Die genaue Ausführung ist in Tabelle 10 aufgelistet und anschließend erklärt.

Tabelle 10: Prüfungen im DSR

Prüfungsdurchführung	
1	<u>Dehnungsgesteuert</u> bei 10°C, 30 Hz und Dehnung 0,2-0,4 %
2	<u>Spannungsgesteuert</u> bei 30 Hz und unter <ol style="list-style-type: none"> 1. Einfluss der Korngröße $\leq 0,063$ mm bei 10°C und 300 kPa 2. Einfluss des Kalkhydrates (mit 5, 10, 15 und 20%) bei 10°C 3. Einfluss der Temperatur (bei 5, 10, 15 und 20°C) 4. Einfluss der Wasserlagerung bei 10°C

Der **Einfluss der Korngröße** auf die Ermüdungsfestigkeit von Mastixproben wurde am Füller F100 Basalt (Klöch) untersucht. Dazu wurde der Füller F100 Basalt (Klöch) nochmals auf 0,063 mm ausgesiebt und nach Herstellung einer weiteren Mischung (Bitumen zu Füller 1:1,5) einer Ermüdungsprüfung im DSR bei 10°C, einer Frequenz von 30 Hz und bei 300 kPa unterzogen. Die Ergebnisse können in Kapitel 6.2.2.1 nachgelesen werden.

Der **Einfluss der Temperatur** auf die Ermüdungsfestigkeit von Mastixproben wurde am Füller F040 Kalksteinmehl untersucht. Die Ermüdungsprüfungen wurden bei unterschiedlichen Spannungen von 100-600 kPa, bei einer Frequenz von 30 Hz und Temperaturen von 5-20°C durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Kapitel 6.2.2.1.2 dargestellt und interpretiert.

Die dritte Untersuchung umfasste eine Mastixprobe, wo der Füller aus zwei unterschiedlichen Gesteinsarten, F100 Basalt und F042 **Kalkhydrat**, besteht. Der Volumenanteil Füller der Mischung wurde durch 5, 10, 15 und 20 Vol.-% Kalkhydrat ersetzt. Mit diesen neu gewonnenen Mastixproben sollte die Veränderung der Ermüdungsfestigkeit untersucht werden. Die Prüfungen wurden immer bei der selben Temperatur von 10°C und

einer Frequenz von 30 Hz mit unterschiedlichen Spannungen von 300-500 kPa durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Kapitel 6.2.2.1.3 dargestellt und interpretiert.

Zuletzt sollte im DSR die **Auswirkung der Wasserlagerung** auf die Ermüdungsfestigkeit der Probe untersucht werden. Dabei kam ausschließlich die Probe mit dem Füller F040 Kalksteinmehl zur Anwendung. Kalksteinmehl kann aufgrund seiner Mineralogie Wasser aufnehmen, welches zu einer Änderung der Eigenschaften führt.

Bei dieser Prüfung wurden wie in Tabelle 9 die Arbeitsschritte durchgegangen, jedoch wurde ein weiterer Schritt zwischen dem Schritt 9 und 10 eingefügt. Nach dem Entnehmen der Silikonform wird ein Stahlring mittels Heißklebepistole auf der unteren Platte um die Probe befestigt. Der Ring wird anschließend mit kaltem Wasser gefüllt und mit einem Silikondeckel abgedeckt. Der Silikondeckel hat in der Mitte eine Öffnung der Größe des Rheometer von 8 mm. Dieser Deckel ist wiederum eingeschnitten, um ihn später entfernen zu können. Dieser Deckel soll das Entweichen des Wassers durch Verdunstung weitestgehend vermeiden. Sodann wurde die Probe für 16 Stunden im Wasser gelagert (Abbildung 5.13). Im weiteren Schritt wurde der Silikondeckel entfernt. Dann wurde mit Schritt 10 aus Tabelle 9 fortgefahren.

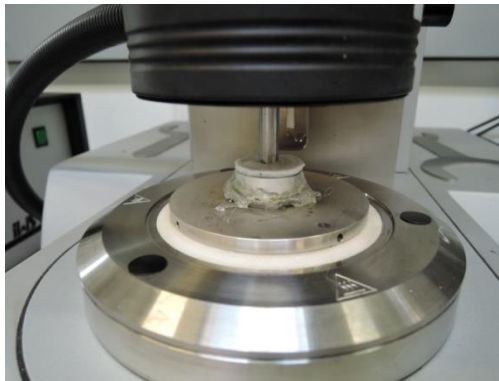


Abbildung 5.13: Lagerung der Probe im Wasserbad im DSR⁷

Die oben beschriebene Anwendung konnte erst nach Vorversuchen ausgeführt werden. Im ersten Testlauf wurde nur der Stahlring ohne Deckel angebracht und mit kaltem Wasser gefüllt. Nach der 16 stündigen Wasserlagerung befand sich kein Wasser mehr innerhalb des Stahlringes. Womöglich verdunstete das Wasser durch die Luftspülung der Temperierhaube. Der Test wurde nach entfernen des Stahlringes trotzdem durchgeführt.

Im zweiten Anlauf sollte die Verdunstung des Wassers durch ausschalten der Luftspülung verhindert werden. Dieser Versuch missglückte auch, weil auch dieses Mal das komplette Wasser nach der 16 stündigen Wasserlagerung spurlos verschwunden war. Die Prüfung erfolgte zu Vergleichszwecken wiederum.

Vor der nächsten Versuchsdurchführung wurde der oben beschriebene Silikondeckel angefertigt um das Verdunsten des Wassers zu verhindern. Dieser konnte nach einer 16

⁷ Foto Lesch P.

stündigen Lagerungsdauer problemlos entfernt werden und das Wasser war noch enthalten. Ab diesem Zeitpunkt wurden wiederum zwei verschiedene Prüfungen durchgeführt. Einerseits wurde vor der Prüfung das Wasser mittels Tuch aus dem Stahlring entfernt und in weiterer Folge dieser auch. Dann wurde mit der eigentlichen Prüfung gestartet, siehe Tabelle 9 Schritt 10. Andererseits erfolgte die Prüfung bei weiterer Wasserlagerung der Probe. Das Wasser und der Stahlring wurden erst nach Beendigung der Prüfung entfernt.

5.4.3.2 Dehnungsgesteuerte Prüfung

Andererseits wurden dehnungsgesteuert Prüfungen mit Dehnungen von 0,2-0,4 % bei 10°C und einer Frequenz von 30 Hz gemessen. Das Ziel dieser Prüfungen sollte erstens ein Zusammenhang zwischen komplexen Schubmodul und der benötigten Lastwechseln bis zum Versagen der Probe unter Variation der Dehnung sein. Zweitens soll die dissipierte Energie in Abhängigkeit der aufgebrachten Dehnung ermittelt werden. Dazu wird die „Dissipated Energy Ratio“ (DER) ermittelt.

Die Aufbringung einer Belastung führt zu einer Spannung im Probekörper, die wiederum eine Dehnung injiziert. Dies bedeutet, dass die Fläche unter der Spannung-Dehnung Kurve die eingebrachte Energie darstellt. Nach Beendigung der Belastung wird ein Teil der Energie zurückgewonnen der andere Teil geht im Material durch mechanische Arbeit, Wärmeerzeugung oder Beschädigungen im Material verloren. Diese Energie wird dissipierte Energie genannt. Um die dissipierte Energie für einen beliebigen Belastungszeitpunkt n zu erhalten, muss die dissipierte Energie in einem vorgegeben Zyklus i mit folgender Gleichung berechnet werden. [20]

Formel 8: dissipierte Energie eines beliebigen Belastungszeitpunktes i [20]

$$W_i = \pi * \sigma_i * \epsilon_i * \sin(\phi_i)$$

- W_i Dissipierte Energie zum Belastungszeitpunkt i
- σ_i Spannungsamplitude zum Belastungszeitpunkt i
- ϵ_i Dehnungsamplitude zum Belastungszeitpunkt i
- $\sin(\phi_i)$ Phasenwinkel zwischen Spannung und Dehnung

Die dissipierte Energie für einen beliebigen Belastungszeitpunkt n folgt aus Formel 9.

Formel 9: die dissipierte Enrgie für einen beliebigen Belastungszeitpunkt n [20]

$$DER_n = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_n}$$

- DER_n Dissipierte Energie zum Belastungszeitpunkt n
- W_n Dissipierte Energie zum Belastungszeitpunkt n

6 Ergebnisse und Interpretation

6.1 Ergebnisse Füllerprüfungen

6.1.1 Dichte

Die Dichte der Füller wurde ausschließlich bei den Füllern F102 Brechsand und F108 Zement ermittelt. Die Dichte der anderen Füller wurde aus früheren Versuchen herangezogen. Im Kapitel 5.1 ist die anzuwendende Formel aufgelistet. Mit deren Hilfe konnte gemäß der Tabelle 11 die Dichten für die Füller ermittelt werden. Die genaue Berechnung ist im Anhang III Füllerprüfungen nach zu lesen. Beide Dichten sind bezogen auf das Material als plausibel einzustufen.

Tabelle 11: Ergebnisse der Dichtebestimmung für die Füller F102 und F108

Füllernummer	Dichte in Mg/m ³
F102	2,40
F108	3,01

6.2 Ergebnisse Mastixprüfungen

6.2.1 Delta-Ring und Kugel-Verfahren

In diesem Kapitel wird der Einfluss der unterschiedlichen Füller auf den Erweichungspunkt einer Mastix dargestellt und interpretiert. In der Abbildung 6.1 sind die ermittelten Erweichungspunkte der einzelnen Füller über den Volumenprozentanteil an Füller abgebildet. Wie im Kapitel 4.3.1 beschrieben, wurden hauptsächlich Mischungen mit 10, 25, 37,5, 45 und 50 Vol.-% Füller geprüft. Zwischen den einzelnen Ergebnissen wurde eine Kurve eingelegt um den Verlauf des Erweichungspunktes mit zunehmendem Füllergehalt besser darstellen zu können. Der schwarze Punkt bei 0 Vol.-% Füller und rund 48°C (Abbildung 6.1) stellt eine Prüfung aus reinem Bitumen (70/100) dar. Reines Bitumen sollte eine geringere Steifigkeit als Mastixmischungen besitzen. Jedoch erreichen unterschiedliche Mastixproben geringere Erweichungspunkte als reines Bitumen. Diese Ungenauigkeit kann auf die Wiederholbarkeit der Prüfungen zurückgeführt werden.

Alle Kurven weisen anfangs einen zunehmenden linearen Verlauf auf, bis ein signifikanter Anstieg beginnt, der durch einen exponentiellen Verlauf dargestellt wird. Bei Mischungen mit einem geringen Füllergehalt wird die Steifigkeit der Mastix hauptsächlich durch das Bitumen geprägt, daher steigt der Verlauf des Erweichungspunktes annähernd linear an. Die wesentlich höhere Steifigkeit des Kornes gegenüber dem Bitumen führt zum plötzlichen exponentiellen Anstieg des Erweichungspunktes. Denn mit zunehmendem Füllergehalt der Mischung ist die Steifigkeit der Mastix nicht mehr vom Bitumen maßgebend beeinflusst, sondern von der Interaktion von Korn zu Korn. Die höchste zu ermittelnde Erweichungstemperatur ist durch das Verhältnis von Bitumen zu Füller begrenzt. Ein zu hoher Anteil an Füller führt zu keiner fließfähigen und sich selbst verdichtenden Mastix. Ab diesem Mischungsverhältnis kann die Prüfung nicht mehr Norm gerecht durchgeführt werden.

Die Mischungen F051 Kersantit/ Granitporphyr und F052 schichtsilikat/ feldspatreiches Quarzmehl erreichen den Übergang vom linearen Verlauf zum exponentiellen Verlauf schon etwa bei 25 Vol.-% und die Fließfähigkeit der Proben war nur bis zu einem Mischverhältnis von Bitumen zu Füller von 37, 5 Vol.-% gegeben. Andere Füllermaterialien erlangten ähnliche Erweichungstemperaturen, von etwa 77°C, nur mit einem viel höheren Mischungsverhältnis. Der Effekt, dass gleiche Erweichungstemperaturen bei unterschiedlichen Füllermaterialien mit einer großen Varietät vom Verhältnis Bitumen zu Füller auf das Volumen bezogen erreicht werden konnte, ist wahrscheinlich auf die Korngrößenverteilung und die Kornform zurück zu führen. Harte Minerale wie der Füller F051 Kersantit/ Granitporphyr besitzen scharfkantigere Kornformen als weiche Materialien die eine gedrungene Kornform haben. Deshalb weisen harte Mineralien eine bessere Verzahnung auf. Für diese Arbeit wurde die Kornform und Korngrößenverteilung nicht näher untersucht, weshalb aus der Abbildung 6.1 nicht direkt vom verwendeten Füllermaterial auf die Erweichungstemperatur geschlossen werden kann. Alle Prüfungen, außer F042 reines Kalkhydrat, F051 Kersantit/ Granitporphyr und F052 schichtsilikat-/ feldspatreiches Quarzmehl, weisen trotz der Füllervarietät einen annähernd gleichen Verlauf auf, wobei der höchste Erweichungspunkt und damit die größte Zunahme der Steifigkeit mit dem Hartgestein Granit F104 erzielt werden konnte.

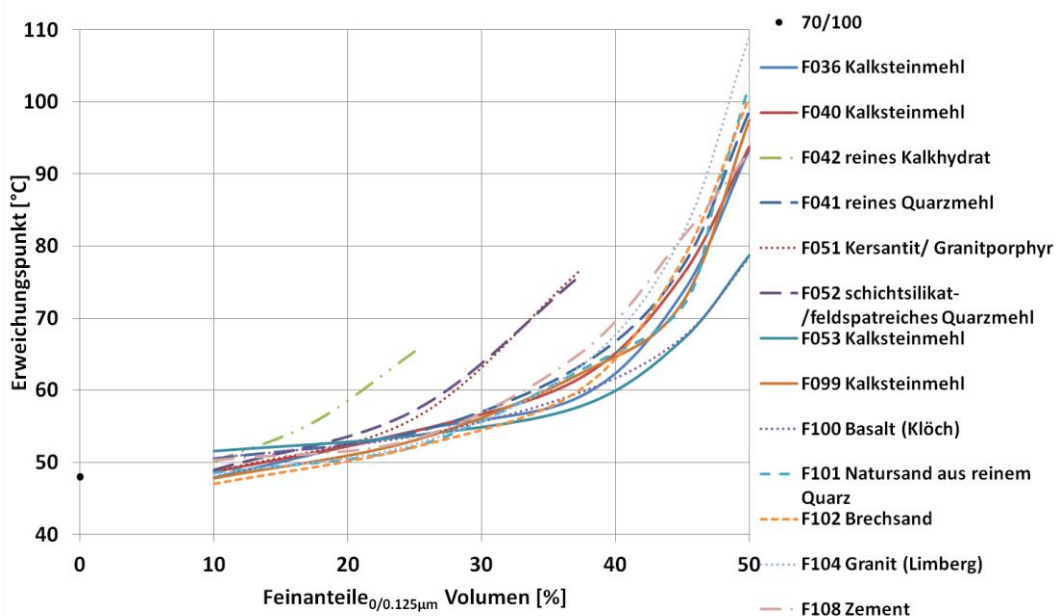


Abbildung 6.1: Ergebnisse Ring und Kugel

Die grün strichlierte Linie in der Abbildung 6.1 stellt den Verlauf der Erweichungstemperatur der Mischungen mit dem Füller F042 reines Kalkhydrat dar. Mischungen über 25 Vol.-% Kalkhydrat konnten händisch nicht gemischt werden. Damit erreichen reine Kalkhydratmischungen schon mit 25 Vol.-% ihre höchste Erweichungstemperatur mit an die 66°C. Diese Erweichungstemperatur ist mit einigen Füllern, Kalksteinmehl, Quarzmehl sowie Hartgesteine nur mit höherem Volumenanteil an Füller zu erreichen. Dieser Effekt liegt an der großen inneren Oberfläche des Kalkhydrates, welche das Bitumen aufsaugt und eine versteifende Wirkung zeigt.

Um die Erweichungstemperatur des reinen Füller F100 Basalt (Klöch) mit den Erweichungstemperaturen der Mastixmischungen mit Zugabe von Kalkhydrat vergleichen zu können, wurde die Erweichungstemperatur der Mischung mit Basalt aus der Abbildung 6.2 herausgelesen. Damit kennzeichnet der rote Punkt in Abbildung 6.3 den ermittelten Erweichungspunkt der Probe mit reinem Basaltfüller bei einem Mischungsverhältnis von Bitumen zu Füller 1:1,5 auf die Masse bezogen. Die Mischung der Proben erfolgte für die Ring- und Kugel Versuche für diese Arbeit in Volumenprozent. Daher musste die Masse bezogene Mischung auf Volumen bezogen mit der Dichte umgerechnet werden. Die 37,5 Vol.-% Fülleranteil gemäß der ÖNORM EN 13179-1 [13] entspricht dabei genau dem Massen bezogenem Mischungsverhältnis von Bitumen zu Füller 1:1,5. Die erhaltene Erweichungstemperatur bei 37,5 Vol.-% Fülleranteil liegt bei etwa 57,8°C und ist in Abbildung 6.3 eingetragen.

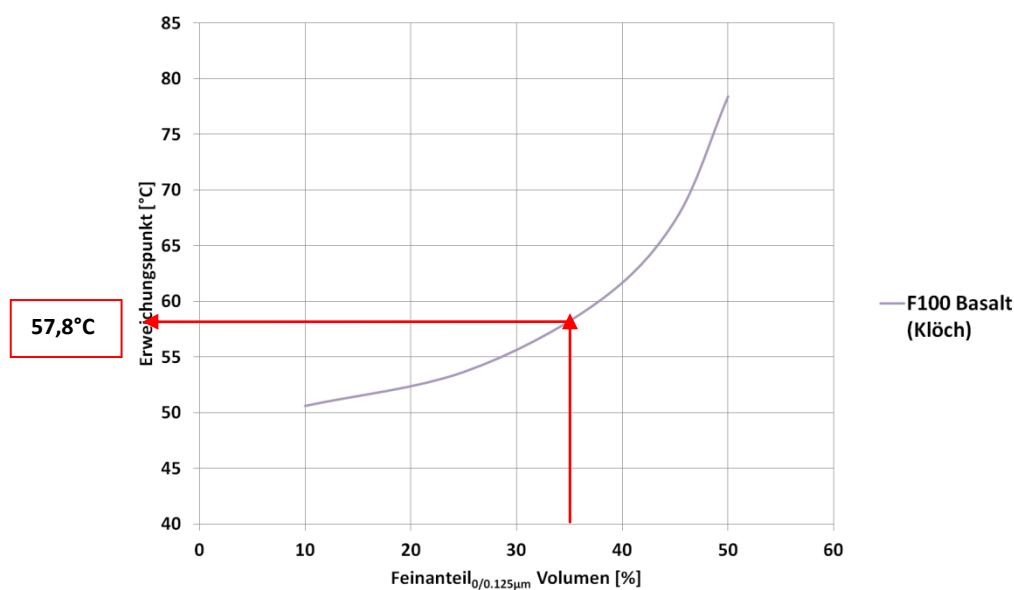


Abbildung 6.2: Erweichungspunkt der Mischung mit Basalt

In der Abbildung 6.3 sind die ermittelten Erweichungstemperaturen der Mischungen mit Basalt und Kalkhydrat abgebildet. Das Bestimmungsmaß von etwa 0,978 ist ausgezeichnet. Die Erweichungstemperatur der Mischung mit Bitumen zu Füller 1:1,5 auf die Masse bezogen liegt zum Teil nicht unterhalb der Erweichungspunkte mit Kalkhydratzugabe (Abbildung 6.3). Daher führt die reine Zugabe von Kalkhydrat nicht sofort zu einer Versteifung des Materials. Die Erhöhung der Steifigkeit erfolgt erst durch Austausch eines gewissen Prozentanteiles Kalkhydrat gegenüber dem Prozentanteil Füller der Mischung. Die Proben wurden mit demselben Volumenprozentanteil an Füller zu Bitumen gemischt. Der geringere Masseanteil an Füller (geringere Dichte Kalkhydrat gegenüber dem Basalt) verschlechtert die Steifigkeit der Probe. Diese Annahme kann nur auf diesen einen Füller zurück geführt werden und müsste mit anderen Füller-Mischungen näher untersucht werden.

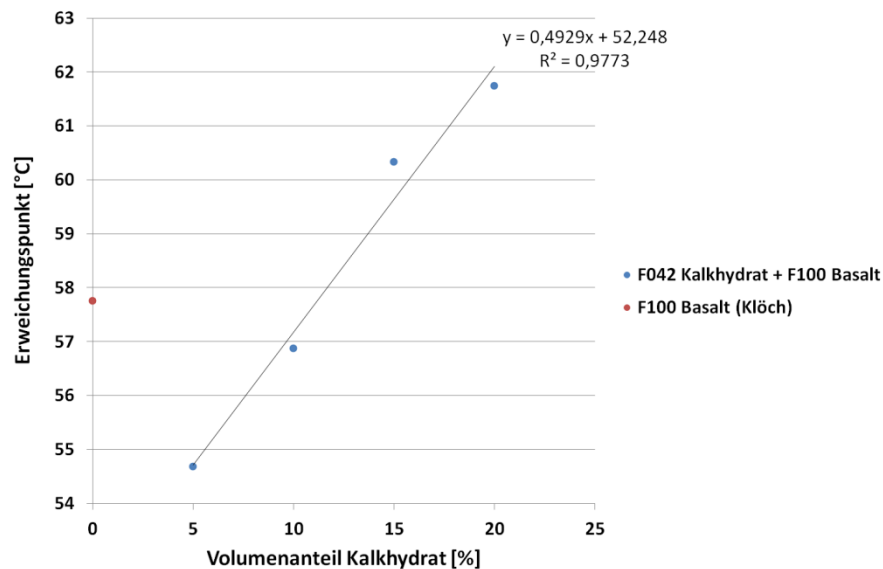


Abbildung 6.3: Erweichungspunkt Ring und Kugel Mischungen Basalt + Kalkhydrat

Die Abbildung 6.4 stellt die Ermittlung der Erweichungstemperatur, beim Übergang vom linearen Verlauf zum exponentiellen Verlauf, dar. Dazu wird die Kurve in zwei Kurven geteilt. Durch Annäherung der Kurven durch eine Gerade wird der Übergangspunkt ermittelt. Diese grafische Ermittlung der Erweichungstemperatur wurde für jeden Füller durchgeführt.

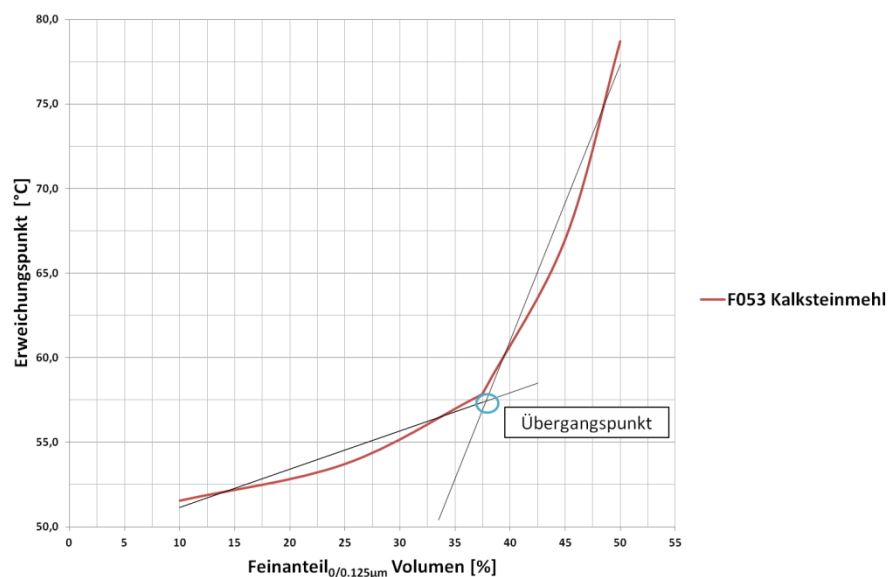


Abbildung 6.4: Ermittlung der Erweichungstemperatur vom linear zu exponentiellen Verlauf

Die Abbildung 6.5 stellt das Verhältnis von Masseprozent zu Volumenprozentanteil des Füllers, beim Übergang der Erweichungstemperatur vom linearen zu exponentiellen Verlauf für die verwendeten Füller, dar. In der Abbildung 6.5 sind nur die Füller eingetragen, bei denen dieser Übergang überhaupt bestimmt werden konnte. Bei den Füllern F042 Kalkhydrat, F051 Kersantit/ Granitporphyr und F052 schichtsilikat-/ feldspatreiches Quarzmehl konnten zu wenige Mischungen hergestellt werden um den Übergang genau festlegen zu können, siehe NA in Tabelle 12.

Die unterschiedlichen Kalksteinmehle außer F099 liegen annähernd am selben Platz. Ansonsten variiert das Verhältnis von Masseprozentanteil zu Volumenprozentanteil des Füllers auch bei ähnlichen Gesteinsarten, wie beim Hartgestein, sehr, weshalb die Kornform und Korngröße einen wesentlichen Faktor zur Zunahme der Steifigkeit darstellt. Diese beiden Eigenschaften des Korns wurden für diese Arbeit nicht näher untersucht. Die Abbildung 6.5 zeigt, dass die Dichte einen großen Einfluss auf den Übergangspunkt vom linearen zum exponentiellen Verlauf aufweist.

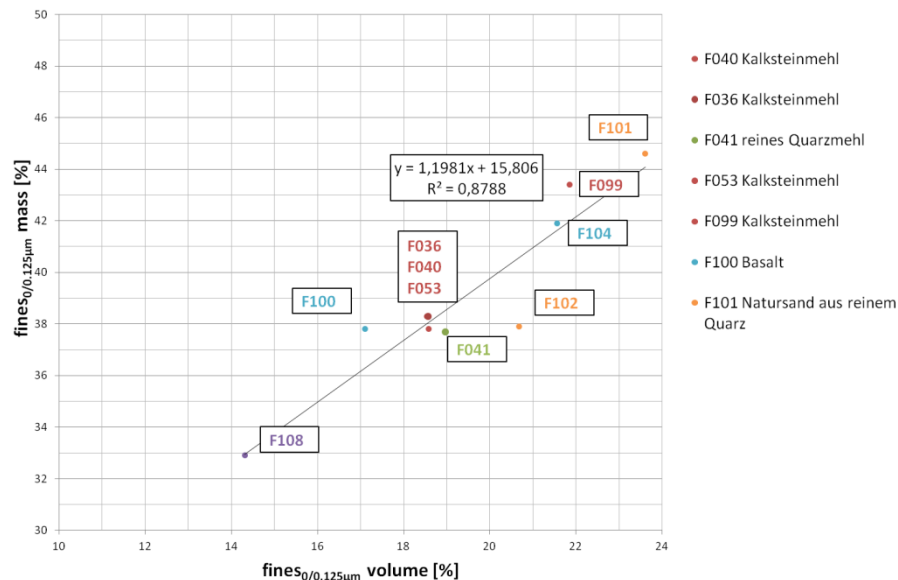


Abbildung 6.5: Verhältnis Volumenprozent zu Masseprozent Füller beim Übergang des Erweichungspunktes

In Tabelle 12 sind die ermittelten Erweichungstemperaturen am Übergang vom linearen zu exponentiellen Verlauf und die Masse- sowie Volumenprozentanteile der Füller aufgelistet.

Tabelle 12: Übergangspunkte vom linearen zu exponentiellen Verlauf

TU-Code	Gesteinsart	fines _{0/0.125µm} mass [%]	fines _{0/0.125µm} volume [%]	softening point [°C]
F036	Kalksteinmehl	38	19	60
F040	Kalksteinmehl	38	19	61
F041	reines Quarzmehl	38	19	62
F042	reines Kalkhydrat	NA	NA	NA
F051	Kersantit/ Granitporphyr	NA	NA	NA
F052	schichtsilikat- / feldspatreiches Quarzmehl	NA	NA	NA
F053	Kalksteinmehl	38	19	58

F099	Kalksteinmehl	43	22	65
F100	Basalt (Klöch)	38	17	59
F101	Natursand aus reinem Quarz	45	24	69
F102	Brechsand	38	21	60
F104	Granit (Limberg)	42	22	64
F108	Zement	33	14	55

6.2.2 Dynamisches Scherrheometer

6.2.2.1 Spannungsgesteuerte Versuche

6.2.2.1.1 Einfluss der Korngröße < 0,063 mm

Um den Einfluss der Korngröße auf die Ermüdungsfestigkeit auf Mastix zu untersuchen wurde der Füller F100 (Basalt) nochmals einer Siebung durch das Maschensieb 0,063 mm unterzogen. Mit dem neu gewonnenen Füller F114 wurde im Verhältnis Bitumen:Füller = 1:1,5 eine neue Probe, B764A, hergestellt und geprüft. In Abbildung 6.6 sind die geprüften Spannungen über die benötigten Lastwechsel für die Mischungen mit Füller F100 und F114 dargestellt.

Die geringere Korngröße des Füllers F114 (Basalt) führt zu einer besseren Verkitzung der Körner untereinander und einer besseren Benetzung durch das Bitumen. Daher besitzt die Probe mit Füller F114 eine bessere Ermüdungsfestigkeit als die Probe mit Füller F100. Die Bestimmtheitsmaße für beide Proben sind annähernd eins und somit ausgezeichnet.

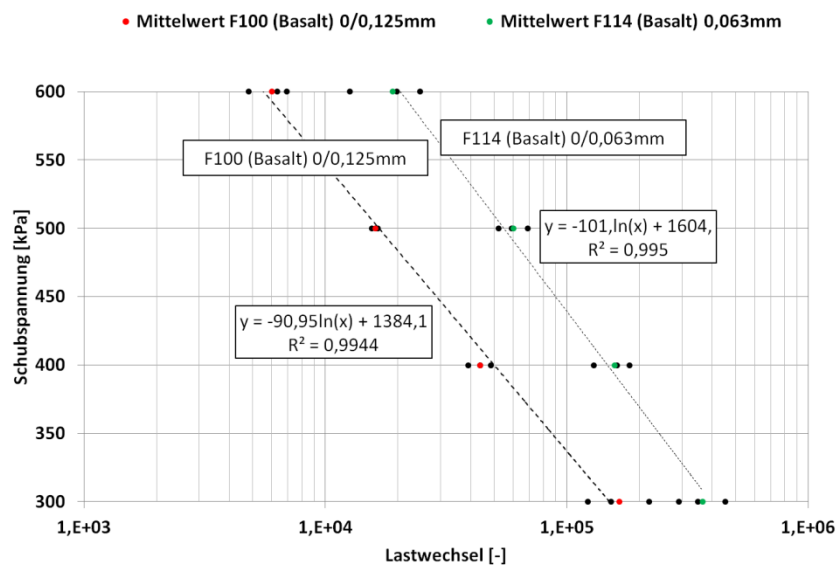


Abbildung 6.6: Einfluss der Korngröße auf die Ermüdungsfestigkeit

6.2.2.1.2 Einfluss der Temperatur

Der Einfluss der Temperatur wurde an Proben mit dem Füller F040 (Kalksteinmehl) spannungsgesteuert im DSR durchgeführt. Die Ergebnisse können daher auch nur für diesen

Füller interpretiert werden, jedoch ist anzunehmen, dass Mischungen mit anderen Füllern ähnliches Verhalten aufweist. Es wurden Prüfungen zwischen den Spannungen 100, 200, 300, 400, 500 und 600 kPa und bei Temperaturen von 5, 10, 15 und 20°C durchgeführt. In der Abbildung 6.7 sind keine Ergebnisse mit 5°C dargestellt, weil unabhängig von der Wahl der Spannung, die Probe nach Einsetzen der Scherbeanspruchung unmittelbar bricht.

In der Abbildung 6.7 ist die aufgebrachte Schubspannung über die benötigten Lastwechsel bis zum Bruch der Probe dargestellt. Die schwarzen Punkte stellen je drei Einzelversuche dar. Aus diesen Werten wurde jeweils ein Mittelwert ermittelt, der mit einem bunten Punkt gekennzeichnet wird. Aus früheren Diplomarbeiten Pia Mandahus [11] reicht die Wiederholbarkeit von drei Versuchen aus um eine klare Aussage über den Verlauf der Ermüdungsfestigkeit fest zu stellen. Dies wird durch die einzelnen Bestimmungsmaße der drei Kurven von annähernd eins bewiesen.

Die Abbildung 6.7 zeigt deutlich, dass bei gleichbleibender Spannung mit zunehmender Temperatur die Anzahl der benötigten Lastwechsel abnimmt und somit die Ermüdungsfestigkeit sinkt. Die Wöhlerkurven verhalten sich desto flacher je höher die Temperatur wird. Dies ist auf die Temperaturabhängigkeit des Bitumens und somit auf der Verringerung der Steifigkeit der Probe zurück zu führen.

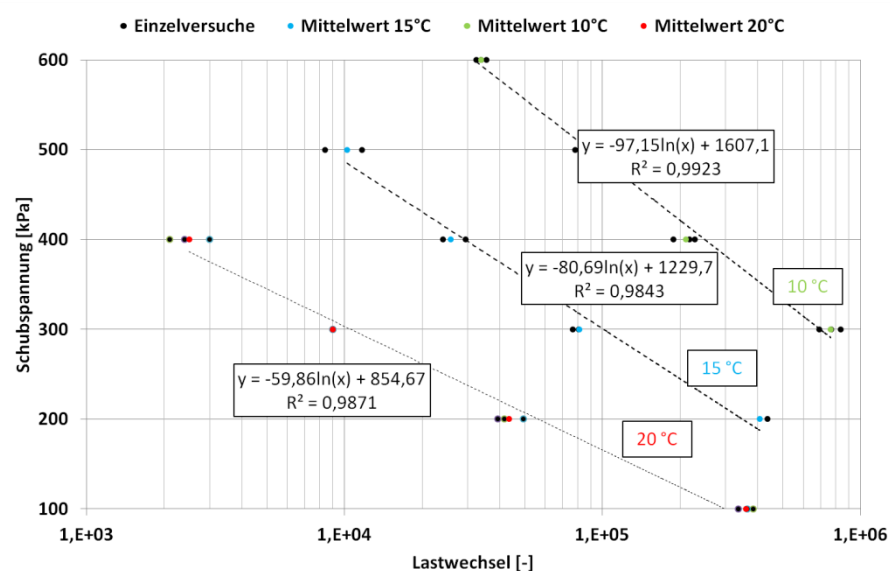


Abbildung 6.7: Einfluss der Temperatur auf den Ermüdungsversuch im DSR

In Abbildung 6.8 ist die Prüftemperatur über die benötigten Lastwechsel bis zum Bruch dargestellt. Bei gleichbleibender Temperatur nimmt die Ermüdungsfestigkeit bei steigender Spannung ab. Die Temperaturabhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit folgt einer logarithmischen Funktion. Die Ermüdungsfestigkeit wird mit zunehmender Schubspannung immer unabhängiger von der Prüftemperatur, da hohe Schubspannungen außerhalb des linearen Bereiches des Materialverhaltens liegen. In diesen Fällen würde die Probe sofort versagen. Theoretisch gedacht würde sich dieser Effekt in der Abbildung 6.8 als eine senkrechte Linie an der Y-Achse ausdrücken. Daher täuscht die Parallelität der Linien, die nur für diesen untersuchten Bereich gegeben ist.

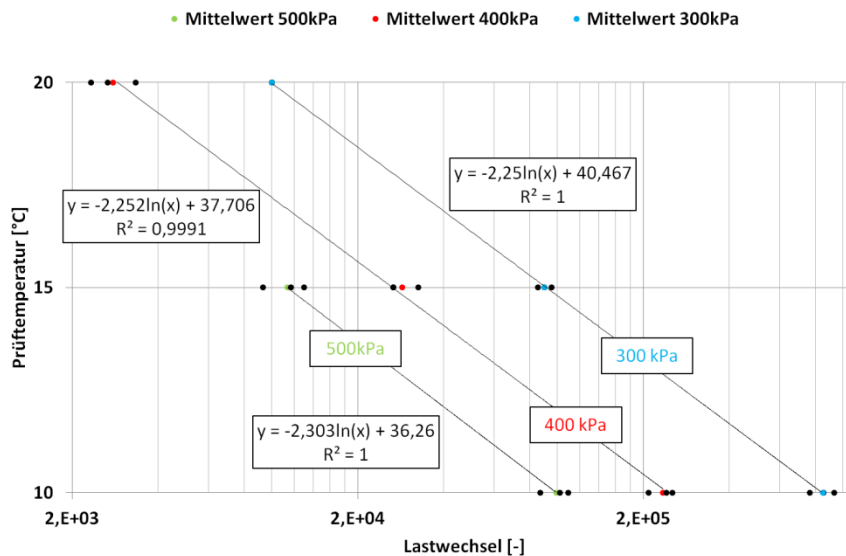


Abbildung 6.8: Temperatur über die Lastwechsel

In Abbildung 6.9 ist der komplexe Schubmodul über die benötigten Lastwechsel bis zum Versagen der Probe dargestellt. Die gleichfarbigen Punkte weisen auf die Mittelwerte der Einzelversuche mit gleicher Spannung bei unterschiedlichen Temperaturen hin. Der komplexe Schubmodul, sowie die benötigten Lastwechsel nehmen je niedriger die Temperaturen sind bei gleichbleibender Spannung zu, da niedrigere Temperatur eine Zunahme der Härte des Bitumens zu Folge hat. Ab einer gewissen (hohen) Temperatur ist die Ermüdungsfestigkeit der Probe unabhängig von der aufgetragenen Schubspannung. Die Probe ist dann so weich, dass sie unmittelbar nach Beginn der Beanspruchung bricht. Dieser Effekt kann durch Verlängerung der Linien gegen Null in Abbildung 6.9 dargestellt werden.

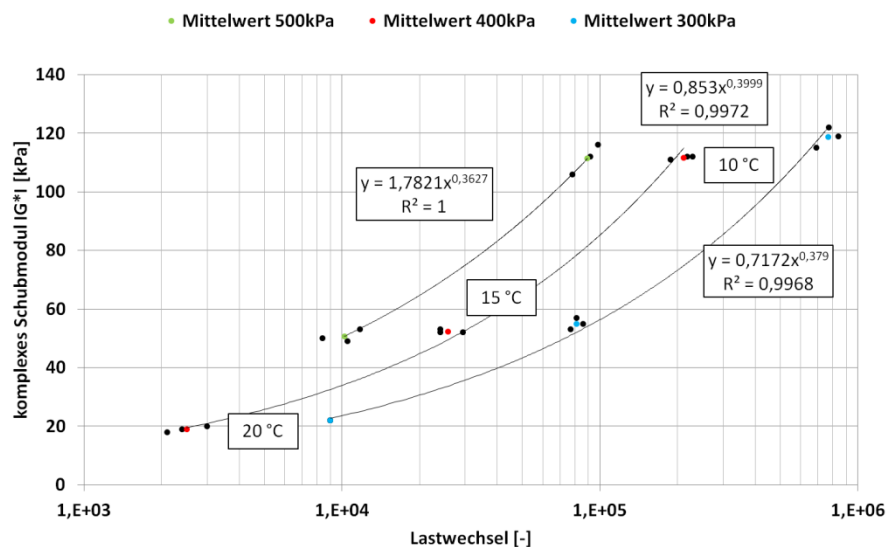


Abbildung 6.9:komplexer Schubmodul über die benötigten Lastwechsel spannungsabhängig

6.2.2.1.3 Einfluss des Kalkhydrates

In der Abbildung 6.10 ist der Einfluss von Kalkhydrat mit Hilfe von Wöhlerkurven anhand der Ermüdungsfestigkeit dargestellt. Die dargestellten Werte stellen jeweils Mittelwerte von drei Einzelversuchen bei gleicher Spannung und gleicher Temperatur dar. Mit steigender

Zugabe an Kalkhydrat nimmt die Ermüdungsfestigkeit bei gleichbleibender Spannung zu. Anfangs steigt bei gleicher Spannung durch die Zugabe von 0 % zu 5 % oder 5 % zu 10 % Volumenprozent Kalkhydrat die Ermüdungsfestigkeit noch stark an. Der Anstieg der Ermüdungsfestigkeit nimmt jedoch mit weiterer Zugabe nicht linear zu. Somit steigt die Ermüdungsfestigkeit mit Zugabe an Kalkhydrat plausibel an.

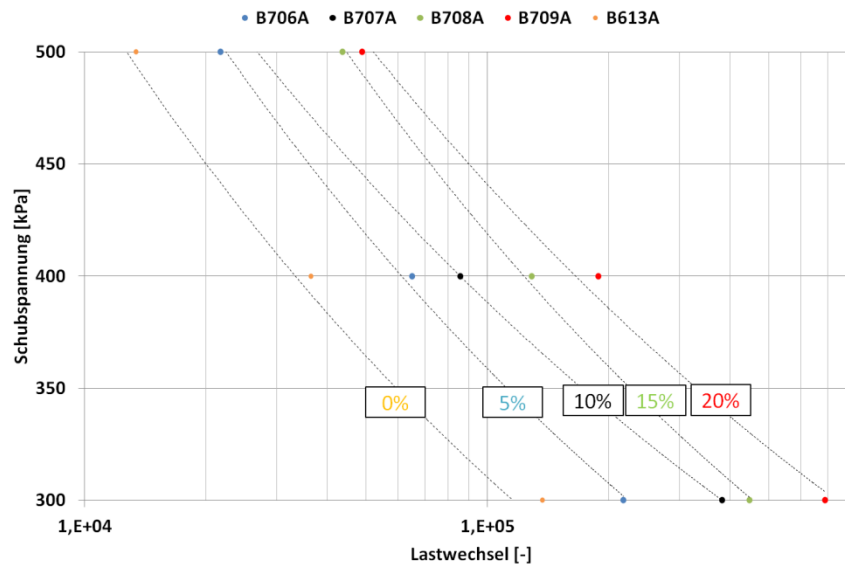


Abbildung 6.10: Einfluss des Anteiles an Kalkhydrat beim Ermüdungsversuch im DSR

6.2.2.1.4 Einfluss der Wasserlagerung

In Abbildung 6.11 ist die aufgebrachte Schubspannung über die Lastwechsel einerseits für die Probe mit dem Füller F040 (Kalksteinmehl) ohne Wasserlagerung und andererseits mit Wasserlagerung dargestellt. Die Proben wurden immer 16 h in Wasser gelagert, sofern das Wasser nicht vorzeitig durch die Luftspühlung der Abdeckhaube oder auch ohne der Luftspühlung der Abdeckhaube verdunstete. Bei den beiden Ergebnissen, die durch einen violetten und grünen Punkt gekennzeichnet sind, entwich das Wasser frühzeitig durch Verdunstung. Wie im Kapitel 5.4.3 beschrieben, wurde danach ein Silikondeckel angefertigt, der das Verdunsten verhindern sollte. Der orangene Punkt stellt eine 16 stündige Wasserlagerung mit Silikondeckel und Durchführung der Prüfung ohne Wasser bei 400 kPa dar. Diese Ausführung führt zu keiner Veränderung der Ermüdungsfestigkeit gegenüber Prüfung ohne Wasserlagerung, siehe zum Vergleich den roten Punkt bei 400 kPa. Der Grund warum die Ermüdungsfestigkeit nicht abnimmt, kann an der abdichtenden Funktion des Bitumens liegen. Das Wasser kann durch die vollständige Ummantelung der Körner durch das Bitumen nicht an die Körner heran dringen. Daher kommt es zu keiner Veränderung der Eigenschaften und Abnahme der Ermüdungsfestigkeit. Somit kann der Einfluss des Wassers nicht auf diese Weise mit dem DSR klassifiziert werden.

Einzig die letzte Prüfung (blauer Punkt Abbildung 6.11), bei welcher nach der 16 stündigen Wasserlagerung das Wasser nicht vor der Prüfung entnommen wurde, ergibt eine ungewöhnliche Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit. Möglicherweise handelt es sich hierbei um einen Ausreißer. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden keine weiteren Versuche mehr durchgeführt.

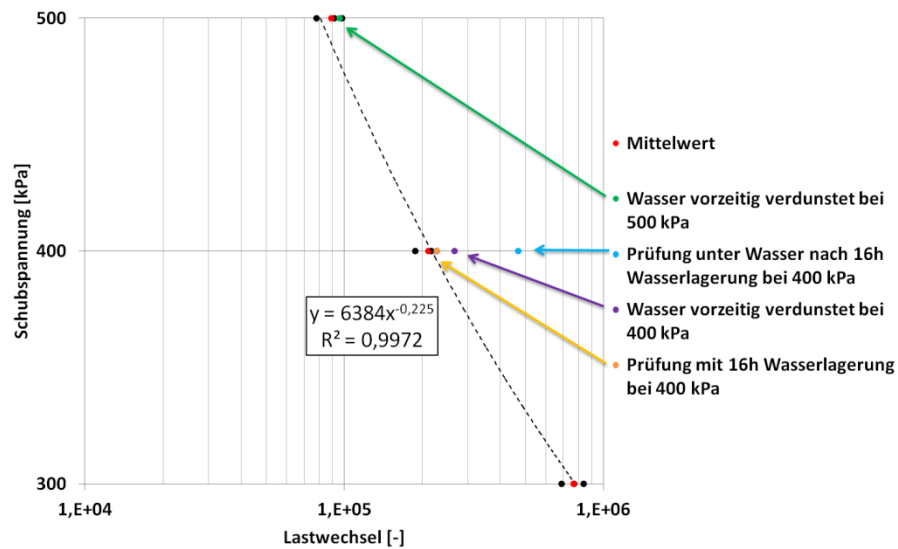


Abbildung 6.11: Einfluss der Wasserlagerung auf die Ermüdungsfestigkeit

6.2.2.2 Dehnungsgesteuerte Versuche

In Abbildung 6.12 wird der Verlauf des komplexen Schubmoduls über die benötigten Lastwechsel bis zum Versagen der Probe bei unterschiedlichen Dehnungen dargestellt. Je niedriger die aufgebrachte Dehnung ist, desto länger braucht die Probe um zu Versagen und der komplexe Schubmodul weist einen flacheren Verlauf auf.

Bei dehnungsgesteuerten Prüfungen durchlebt die Probe bis zum Versagen dieselben drei Phasen, wie spannungsgesteuerte Prüfungen (Abbildung 5.8). Anfangs kommt es zu einer raschen Abnahme des komplexen Schubmoduls primär durch die Thixotropie und sekundär durch die Freisetzung von Energie durch Aufbringen der Scherbeanspruchung. Weitere Beanspruchung führt zur Entstehung von Mikrorissen und einem flacheren Verlauf der Kurve. Schlussendlich bilden sich aus den Mikrorissen Makrorisse, die zu einer rasanten Abnahme des komplexen Schubmoduls führen bis Versagen eintritt. Der Übergang von Mikro-rissen zu Makrorissen ist jedoch nicht so deutlich erkennbar, wie bei den spannungsgesteuerten Proben.

Die Variation der Dehnung ergab kaum einen Unterschied der Größe des komplexen Schubmoduls beim Versagen der Probe. Die Streuung der Ergebnisse wird je kleiner die aufgebrachte Dehnung wird. Gemäß Shan L. et al [19], [21] wird der vorhandene komplexe Schubmodul IG^*I in zwei Teile getrennt. Einerseits kommt es während der Prüfung zu einer Verringerung des komplexen Schubmoduls aufgrund von Schäden in der Probe und andererseits durch die Thixotropie. Shan L. et al [19], [21] legt die 50 prozentige Reduktion des komplexen Schubmoduls als Indikator für die Ermüdungsfestigkeit der Probe bei dehnungsgesteuerten Prüfungen fest. In Abbildung 6.12 ist eine Bandbreite der 50 prozentigen Reduktion des komplexen Schubmoduls (violettes Rechteck) angegeben. Diese Bandbreite ist sehr klein und weist daher auf eine geringe Variabilität.

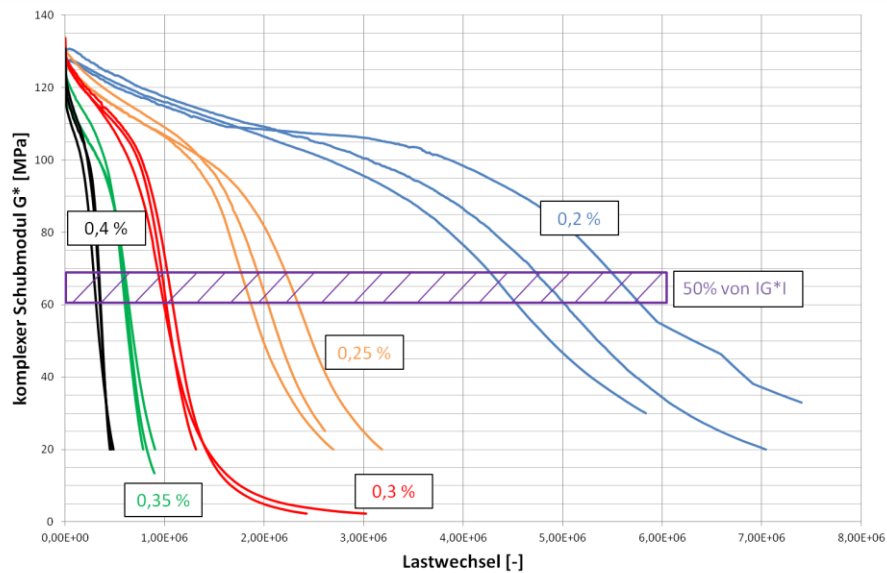
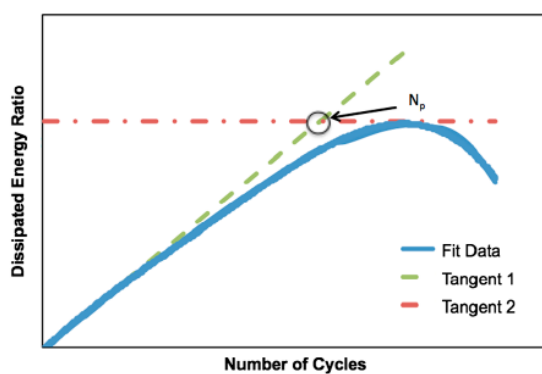


Abbildung 6.12: Verlauf des komplexen Schubmoduls in Abhängigkeit der aufgetragenen Dehnung

In Grafiken, wo Lastwechsel über die dissipierte Energie dargestellt werden, kann die Ermüdungsfestigkeit bei dehnungsgesteuerten Prüfungen nicht so einfach ermittelt werden. Im Falle einer spannungsgesteuerten Prüfung steigt die DER-Rate annähernd konstant an. Wenn sich die Probe dem Versagen nähert, erreicht der DER einen maximalen Wert und fällt danach rasant ab. In diesem Fall wird der Scheitelpunkt verbunden mit der DER-Rate als N_p definiert und als Ermüdungsfestigkeit definiert, siehe Abbildung 6.14 links.

Bei dehnungsgesteuerten Prüfungen kommt es zu keinem Abfall der DER-Rate. Daher muss die Ermüdungsfestigkeit in diesem Fall anders klassifiziert werden. Gemäß Bonnetti et al. [21] hat sich die 20 prozentige Abweichung von der DER-Rate als sinnvoller Indikator für die Ermüdungsfestigkeit herausgestellt, siehe Abbildung 6.14 rechts. Hierzu dient die Tangentenmethode um den N_p Punkt zu erhalten.

Spannungsgesteuerte Prüfung im DSR



Dehnungsgesteuerte Prüfung im DSR

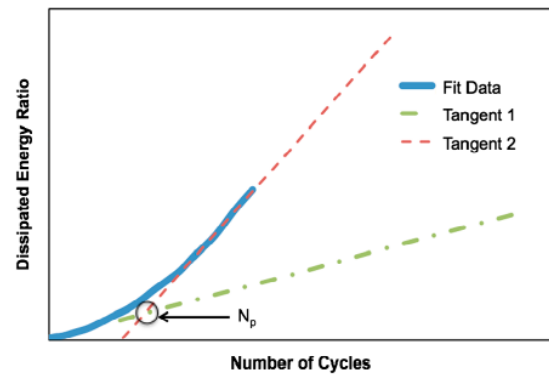


Abbildung 6.13 Ermittlung des Punktes N_p bei dem die Abweichung der DER Rate bei 20 % liegt [21]

Theoretisch können durch die beiden Definitionen sowohl für spannungs- sowie dehnungsgesteuerte Prüfungen eine Ermüdungsfestigkeit festgelegt werden und miteinander verglichen werden. Der Vergleich der beiden Modi ist nicht Inhalt dieser Arbeit, weshalb nicht näher darauf eingegangen wird.

Die 20 prozentige Abweichung von DER wird als N_{p20} definiert und wurde für alle 15 Prüfungen grafisch ermittelt, siehe Abbildung 6.14 für den ersten Versuch bei einer Dehnung von 0,2 %. Alle weiteren Ermittlungen von N_p können im Anhang III nachgelesen werden.

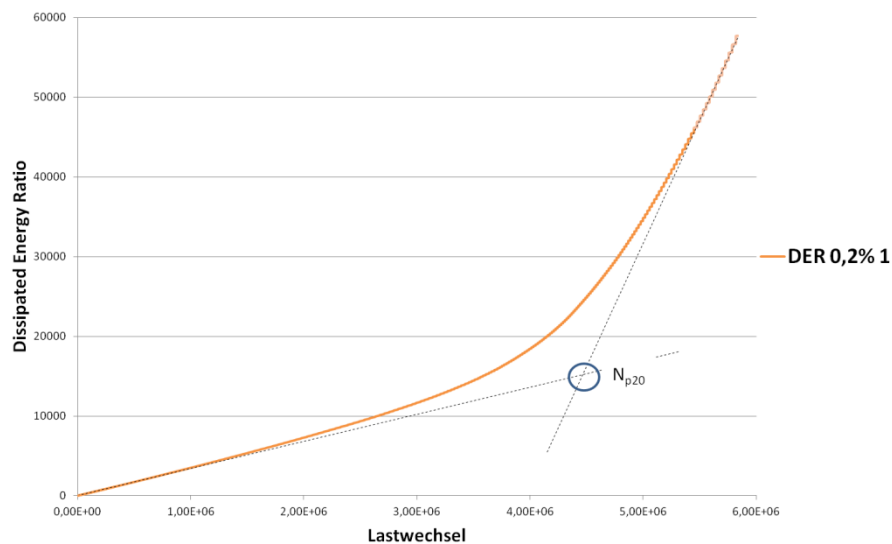


Abbildung 6.14: Ermittlung des Punktes N_{p20}

Die Mittelwerte der Ermüdungsfestigkeitspunkte für jede Dehnung werden in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Ermüdungsfestigkeit ermittelt mit Hilfe DER über Lastwechsel

Mittelwerte der Ermüdungsfestigkeit N_p		
	DER-Rate	Lastzyklen
	[-]	[-]
0,40%	1230	3,70E+05
0,35%	2400	7,20E+05
0,30%	3800	1,20E+0,6
0,25%	7000	2,00E+06
0,20%	17000	5,1E+0,6

In Abbildung 6.15 ist die dissipierte Energie über die benötigten Lastwechsel für alle 15 Prüfungen dargestellt. Die Tangenten zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit der einzelnen Prüfungen sind wegen Unübersichtlichkeit nicht in der Grafik abgebildet. Die Ermüdungsfestigkeit, die durch die 20 prozentige Abweichung von DER definiert ist, steigt mit abnehmender Dehnung stark an, siehe Tabelle 13. Je größer die aufgebrachte Dehnung

ist desto weniger Energie dissipiert bis zum Versagen der Probe. Die Streuung der Ergebnisse steigt bei Prüfungen mit geringerer Dehnung stärker an.

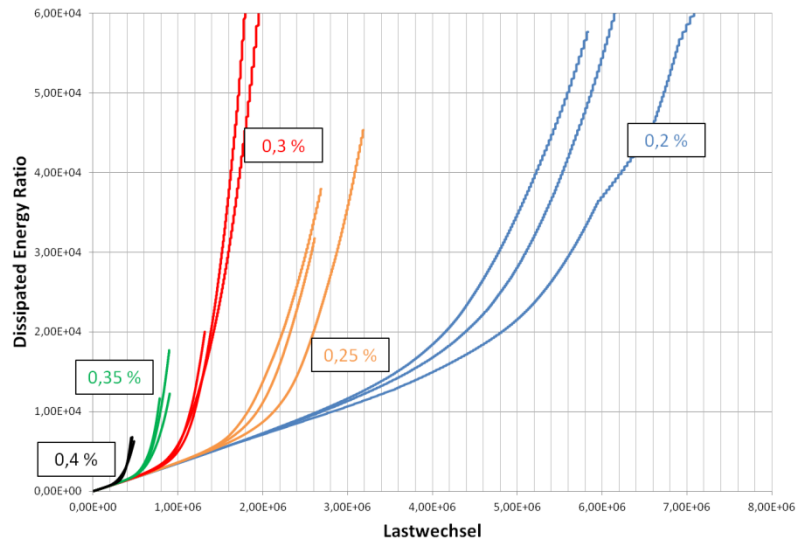


Abbildung 6.15: dehnungsgesteuerte DSR-Prüfung Dissipated Energy Ratio

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit liegt einerseits dem Ziel zu Grunde die Auswirkung der Füllergehälter auf die Zunahme der Steifigkeit von Mastix durch das Ring- und Kugel-Verfahren zu bestimmen. Andererseits die Ermüdungsfestigkeit von Mastix im DSR durch ihre Zusammensetzung und Prüfparameter, wie Korngröße, Temperatur, Kalkhydratzugabe und Wasserlagerung zu klassifizieren. Für alle Prüfungen ist eine gewisse Streuung gegeben, jedoch ist die Wiederholbarkeit in einem akzeptablen Bereich.

Die Füllerprüfungen dienten nur zur Klassifizierung der Füller um diese für die Asphaltmastixprüfungen anwenden zu können. Die erhaltenen Dichten sind bezogen auf das Material als plausibel einzustufen.

7.1 Ring- und Kugel-Verfahren

Diese Prüfung hat zum Vorschein gebracht, dass nicht vom verwendeten Füller auf die Zunahme der Steifigkeit der Mastix beim selben Mischungsverhältnis geschlossen werden kann. Dies liegt an der nicht untersuchten Korngrößenverteilung und Kornform, die Einfluss auf die Erweichungspunkte haben. Jedoch konnte wie zu erwarten mit einem Hartgestein die höchste Erweichungstemperatur ermittelt werden. Die Proben weisen alle anfangs einen linearen Verlauf auf, in diesem Bereich ist die Steifigkeit der Probe maßgebend vom Bitumen abhängig. Erst ab einem gewissen Verhältnis von Bitumen zu Füller wechselt der Verlauf von linear zu exponentiell. Dies geschieht durch die höhere Steifigkeit des Füllers gegenüber dem Bitumen. Der höhere Anteil an Füller führt zu einer Korn zu Korn Interaktion. Leider kann vom verwendeten Füllermaterial nicht auf den Übergangspunkt vom linearen zum exponentiellen Verlauf der Erweichungstemperatur geschlossen werden, da das Verhältnis von Masseanteil zu Volumenanteil des Füllers für gleichartige Füller aufgrund der Korngrößenverteilung unterschiedlich sind. Jedoch hat die Dichte des Füllers einen großen Einfluss auf den Übergangspunkt.

7.1.1 dynamisches Scherrheometer (DSR)

Im DSR wurden dehnungs- und spannungsgesteuerte Prüfungen durchgeführt. Durch die spezielle Form der Probe kann die Probe erst im DSR eingebaut werden. Daher werden die Prüfungen sehr zeitintensiv. Weiters weisen die dehnungsgesteuerten Prüfungen selbst einen hohen Zeitaufwand auf, weshalb die Unwirtschaftlichkeit dieser Prüfungen durch den hohen Zeitaufwand zu hinterfragen ist.

Die Zusammensetzung und unterschiedliche Prüfparameter wie, die Korngröße, die Temperatur, Zugabe von Kalkhydrat und Wasserlagerung wurden spannungsgesteuert im DSR untersucht.

7.1.2 Einfluss der Korngröße auf die Ermüdungsfestigkeit

Dabei führt die geringere Korngröße zu einer besseren Ermüdungsfestigkeit. Die kleineren Körner führen zu einer besseren Verkittung der Körner und Benetzung durch das Bitumen. Dadurch entsteht ein besserer Verbund zwischen Körnern und Bitumen und die Adhäsionsfläche wird erhöht, welche zu einer Steifigkeitszunahme führt.

7.1.3 Einfluss der Temperatur auf die Ermüdungsfestigkeit

Gerade Deckschichten müssen einen hohen Temperaturbereich ertragen, weshalb der Einfluss der Temperatur höchst interessant ist. Schlussfolgernd besitzt Mastix bei geringeren Temperaturen durch seine höhere Steifigkeit bei gleicher Beanspruchung eine höhere Ermüdungsfestigkeit. Eine Erklärung wäre die Abhängigkeit der Härte von Bitumen von der Viskosität, die wiederum temperaturabhängig ist. Die Ermüdungsfestigkeit sowie das komplexe Schubmodul steigen bei gleichbleibender Spannung mit Abnahme der Temperatur. Sowohl bei sehr hohen als auch niedrigen Schubspannungen verliert die Prüftemperatur ihren Einfluss auf den Versagenszeitpunkt der Probe, da sich das Material nicht mehr im linearen Bereich befindet.

7.1.4 Einfluss der Zugabe von Kalkhydrat auf die Ermüdungsfestigkeit

Der Basisfüller F100 (Basalt) wird mit Kalkhydrat verbessert. Die Zugabe an Kalkhydrat führt zu einer Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit. Dies ist auf die höhere innere Oberfläche des Kalkhydrats gegenüber dem Basisfüller zurück zu führen.

7.1.5 Einfluss der Temperatur auf die Ermüdungsfestigkeit

Der Einfluss des Klimas sollte mittels Wasserlagerung geprüft werden. Es sollte auf die Problematik der Prüfungsdurchführung näher eingegangen werden, siehe 5.4.2. Die Prüfung ergab keine Veränderung der Ermüdungsfestigkeit. Dieser Effekt liegt an der abdichtenden Funktion des Bitumens, wodurch es zu keiner Interaktion von Korn zu Wasser kommt und zu keiner Gesteinseigenschaftänderung. Daher stellt das DSR nicht die Voraussetzungen dar um diesen Parameter zu untersuchen.

7.1.6 Dehnungsgesteuerte Prüfungen

Bei Prüfungen im Fall der dehnungsgesteuerten Prüfung bricht die Probe unabhängig von der aufbrachten Dehnung beim annähernd selben komplexen Schubmodul. Proben versagen bei höheren Dehnungen schneller. Die Ermüdungslebensdauer bei 50 prozentiger Reduktion des komplexen Schubmoduls gegenüber dem Anfangswert ist von der aufbrachten Dehnung unabhängig. Einzig die Dauer der Prüfung bis Versagen eintritt ist bei niedrigeren Dehnungen länger. Die Streuung der benötigten Lastwechsel bis zum Versagen ist bei geringeren Dehnungen größer als bei höheren Dehnungen. Dieses Phänomen kann auf die längerfristige Beanspruchung zurückgeführt werden. Die längere Prüfungsdurchführung führt zu einer längeren Beschädigung der Probe, wo durch mehr Energie dissipiert und sich kleine Unstädigkeiten, wie die Kornausrichtung, in der Probe stärker zeigen können. Die Ermüdungsfestigkeit ist durch eine 20 % Abweichung von der DER-Rate definiert. Dieser Punkt N_p wird bei geringeren Dehnungen schneller erreicht als bei höheren. Daher wird weniger Energie verbraucht bis die Ermüdung der Probe eintritt.

8 Literaturverzeichnis

- [1] M. N. Dr. Partl, 03 2011. [Online]. Available: https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ifb/ifb-dam/homepage-IfB/Education/bsc_courses/bsc-materials-I/documents/Werkstoffe1_Bitumen. [Zugriff am 03 04 20107].
- [2] M. Hospodka, Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor, Wien: Forschungsbereich für Verkehrswissenschaften, 2013.
- [3] G. Neroth und D. Vollenschaar, Wendehorst Baustoffkunde, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2011.
- [4] ÖNORM EN 12597, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie, Ausgabe: 15-09-2014.
- [5] K. C. Univ.-Prof.Dr.-Ing. Thienel, „Universität der Bundeswehr München,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/skripte>. [Zugriff am 03 04 2017].
- [6] M. Stoyanova, Untersuchungen der Feldalterung auf das rheologische Verhalten von Bitumen, Wien: Institut für Verkehrswissenschaften Forschungsbereich Straßenwesen, 2014.
- [7] B. L. Peternell, Einfluss der Produktionstemperatur auf die Verarbeitbarkeit und das Alterungsverhalten von Gussasphalt, Wien: Institut für Verkehrswissenschaften Forschungsbereich Straßenwesen, 2016.
- [8] D. Steiner, Entwicklung und Optimierung einer Labor-Alterungsmethode für Asphaltprobekörper zur Simulation der Langzeitalterung und Bewertung der Alterungsbeständigkeit, Wien: Institut für Verkehrswissenschaften Forschungsbereich Straßenwesen, 2014.
- [9] R. Blab, LVA 230.009 Straßenbau, Wien, Ausgabe: 2013/14.
- [10] G. Dipl.-Ing. Piringer. [Online]. Available: <http://www.gestrata.at/publikationen/archiv-journal-beitrag/gestrata-journal-140/gussasphalt-ein-hochwertiger-baustoff>. [Zugriff am 27 Juli 2017].
- [11] P. Mandahus, Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Qualitätsbeurteilung der Asphaltmastix, Wien: Institut für Verkehrswissenschaften Forschungsbereich für Straßenwesen, April 2016.
- [12] ÖNORM EN 13043, Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlung für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen, Ausgabe: 15-07-2015.
- [13] ÖNORM EN 13179-1, Prüfverfahren für mineralische Füller in bitumenhaltigen Mischungen - Teil 1: Delta-Ring- und Kugel-Verfahren, Ausgabe: 07-2013.

- [14] M. Hospodka, B. Hofko und R. Blab, Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätskriterium, Wien: Institut für Verkehrswissenschaften, Labor für Straßenwesen, 2017.
- [15] ÖNORM EN 1097-7, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen: Teil7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren, Ausgabe: 01-01-2009.
- [16] Labor für Straßenwesen, „AA 301 - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren,“ Institut für Verkehrswissenschaften, Wien, 13-01-2005.
- [17] M. Hospodka und P. Mandahus, „Prüftechnische Ansprache von Asphaltmastix,“ Journal das Asphalt Magazin Folge 150, pp. 4-13, Juli 2017.
- [18] ÖNORM EN 12697-24, Asphalt - Prüfverfahren Teil24: Beständigkeit gegen Ermüdung, Ausgabe: 15-12-2015
- [19] L. Y. Shan, Separation of Thixotropy from, 2011(2207).
- [20] K. A. Ghuzlan und S. H. Charpenter, „Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing,“ 2000.
- [21] L. Shan, Y. Tan, B. Underwood und Y. Kim, „Application of Thixotropy to Analyze Fatigue and Healing Characteristics of Asphalt Binder,“ Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010.
- [22] K. S. Bonnetti, K. Nam und H. U. Bahia, „Measuring and Defining Fatigue Behavior of Asphalt Binders,“ Transportation Research Record 1810, 2002.
- [23] R. Hajj und A. Bhasin, „The search for a measure of fatigue cracking in asphalt binders - a review of different approaches,“ International Journal of Pavement Engineering, Austin Texas, 2017.
- [24] L. Shan, Y. Tan, B. Underwood und Y. Kim, „Separation of Thixotropy from Fatigue Process of Asphalt Binder,“ Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011.

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: li.: Bitumen, re.: Bruchstück von Naturasphalt [2]	2
Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau von Bitumen [5]	3
Abbildung 2.3: Deformation und Rückformung bei viskos-elastischem Materialverhalten [2].....	5
Abbildung 2.4: Alterungsverlauf von Bitumen [9].....	7
Abbildung 2.5: Herstellung von Bitumen [1].....	8
Abbildung 2.6: Terminologie der Kohlenwasserstoff-Bindemittel [4]	10
Abbildung 3.1: Typischer Spannungsverlauf in Asphalt-Straßenbefestigungen [3].....	12
Abbildung 5.1: Trockensiebung mittels Siebturm	20
Abbildung 5.2: li.: Gerät bei der Prüfung, re. oben: Ausbildung der Bitumensäcke, re. unten: Ringe, unbefüllt, überhöht befüllt, abgeschnitten [2]	22
Abbildung 5.3: Anton Paar MCR 302.....	23
Abbildung 5.4: Platte-Platte-Messung	23
Abbildung 5.5: Oszillationszyklus des Rheometers [17].....	24
Abbildung 5.6: li.: ideal-elastisches Materialverhalten, mi.: viskoses Materialverhalten, re.: visko-elastisches Materialverhalten [17].....	25
Abbildung 5.7: li.: Querschnitt des Probekörpers, re.: ermittelte Spannungsverteilung bei 10°C im FE-Programm [17]	27
Abbildung 5.8: Ermüdungsversuch im DSR [17].....	28
Abbildung 5.9: Bestimmung des Nullspaltes.....	29
Abbildung 5.10: Einlegen der Silikonform.....	29
Abbildung 5.11: Überhöhtes Einfüllen der Mastix	30
Abbildung 5.12: li.: Entfernen der überschüssigen Mastix, re.: fertige Probe für die Prüfung.....	30
Abbildung 5.13: Lagerung der Probe im Wasserbad im DSR	32
Abbildung 6.1: Ergebnisse Ring und Kugel	35
Abbildung 6.2: Erweichungspunkt der Mischung mit Basalt.....	36
Abbildung 6.3: Erweichungspunkt Ring und Kugel Mischungen Basalt + Kalkhydrat	37
Abbildung 6.4: Ermittlung der Erweichungstemperatur vom linear zu exponentiellen Verlauf	37
Abbildung 6.5: Verhältnis Volumenprozent zu Masseprozent Füller beim Übergang des Erweichungspunktes	38
Abbildung 6.6: Einfluss der Korngröße auf die Ermüdungsfestigkeit.....	39
Abbildung 6.7: Einfluss der Temperatur auf den Ermüdungsversuch im DSR	40
Abbildung 6.8: Temperatur über die Lastwechsel	41
Abbildung 6.9:komplexe Schubmodul über die benötigten Lastwechsel spannungsabhängig.....	41
Abbildung 6.10: Einfluss des Anteiles an Kalkhydrat beim Ermüdungsversuch im DSR	42
Abbildung 6.11: Einfluss der Wasserlagerung auf die Ermüdungsfestigkeit.....	43
Abbildung 6.12:Verlauf des komplexen Schubmoduls in Abhängigkeit der aufgebrachtten Dehnung. 44	
Abbildung 6.13 Ermittlung des Punktes N_p bei dem die Abweichung der DER Rate bei 20 % liegt [21]	44
Abbildung 6.14: Ermittlung des Punktes N_{p20}	45
Abbildung 6.15: dehnungsgesteuerte DSR-Prüfung Dissipated Energy Ratio.....	46

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Hauptbestandteile von Bitumen [3]	3
Tabelle 2: Qualitätsanforderung an die stofflichen Eigenschaften der Gesteinskörnung [3]	13
Tabelle 3: Verwendete Füllermaterialien.....	15
Tabelle 4: Arbeitsschritte – Herstellung einer Mischung	17
Tabelle 5: Mischverhältnisse fürs das Delta-Ring- und Kugel-Verfahren.....	17
Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten Arbeiten.....	18
Tabelle 7: Arbeitsschritte – Bestimmung der Dichte eines Füllers	19
Tabelle 8: Arbeitsschritte – Delta-Ring- und Kugel-Verfahren.....	22
Tabelle 9: Arbeitsschritte – DSR.....	30
Tabelle 10: Prüfungen im DSR.....	31
Tabelle 11: Ergebnisse der Dichtebestimmung für die Füller F102 und F108	34
Tabelle 12: Übergangspunkte vom linearen zu exponentiellen Verlauf.....	38
Tabelle 13: Ermüdungsfestigkeitspunkte ermittelt mit Hilfe DER über Lastwechsel.....	45

III. Anhang

Füllerprüfungen

Dichtebestimmung gemäß ÖNORM EN 1097-7

TU Code	Sorte	Dichte ρ in g/cm^3
F102	Brechsand	2,40
F108	Zement	3,01

Asphaltmastixprüfungen

Ergebnisse des Ring- und Kugel-Verfahren gemäß ÖNROM EN 13179-1

B136A 70/100

TU-Code	Bitumenart	ρ_b	m_b	V_b	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$
		$[\text{Mg/m}^3]$	$[\text{g}]$	$[\text{mm}^3]$	$[\text{°C}]$	$[\text{°C}]$	$[\text{°C}]$
B136A	70/100	1,025	15,0	14,6	48,09	48,09	48,0

F042 + F100

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F042 + F100	B706A	2,98	45,0	60,0	15,1	50,8	49,2	1,50	55,31	54,06	54,7	6,7
	B707A	2,94	45,0	60,0	15,3	51,1	48,9	1,50	57,34	56,40	56,9	8,9
	B708A	2,90	45,0	60,0	15,5	51,4	48,6	1,50	60,55	60,12	60,3	12,3
	B709A	2,86	45,0	60,0	15,7	51,8	48,2	1,50	61,49	62,00	61,7	13,7

F036

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F036	B710A	2,79	4,5	23,2	1,6	10	90	0,30	47,98	47,85	47,9	-0,1
	B711A		13,6	47,6	4,9	25	75	0,91	54,30	54,48	54,4	6,4
	B712A		24,5	62,0	8,8	37,5	62,5	1,63	59,37	59,13	59,3	11,3
	B713A		33,4	69,0	12,0	45	55	2,23	72,86	74,02	73,4	25,4
	B714A		40,8	73,1	14,6	50	50	2,72	93,11*	93,54*	93,3*	45,3
	-		49,9	76,9	17,9	55	45	3,33	-	-	-	-

* im Glycerolbad

F040

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F040	B715A	2,75	4,5	23,0	1,6	10	90	0,30	49,06	48,24	48,7	0,7
	B716A		13,4	47,2	4,9	25	75	0,89	54,53	54,10	54,3	6,3
	B717A		24,1	61,7	8,8	37,5	62,5	1,61	61,97	61,65	61,8	13,8
	B718A		32,9	68,7	12,0	45	55	2,20	75,46	76,33	75,9	27,9
	B719A		40,2	72,8	14,6	50	50	2,68	93,63*	93,84*	93,7*	45,7
	-		49,2	76,6	17,9	55	45	3,28	-	-	-	-

* im Glycerolbad

F041

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F041	B720A	2,65	4,3	22,3	1,6	10	90	0,29	50,71	50,34	50,5	2,5
	B721A		12,9	46,3	4,9	25	75	0,86	54,21	54,17	54,2	6,2
	B722A		23,3	60,8	8,8	37,5	62,5	1,55	64,68	62,42	63,6	15,6
	B723A		31,7	67,9	12,0	45	55	2,12	77,17	77,08	77,1	29,1
	B724A		38,8	72,1	14,6	50	50	2,59	98,64*	98,70*	98,7*	50,7
	-		47,4	76,0	17,9	55	45	3,16	-	-	-	-

* im Glycerolbad

F042

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F042	B725A	2,24	3,6	19,5	1,6	10	90	0,24	50,12	50,14	50,1	2,1
	B726A		7,0	31,7	3,1	17,5	82,5	0,46	55,58	55,64	55,6	7,6
	B727A		10,9	42,1	4,9	25	75	0,73	65,21	65,45	65,3	17,3
	-		19,7	56,7	8,8	37,5	62,5	1,31	-	-	-	-
	-		26,8	64,1	12,0	45	55	1,79	-	-	-	-
	-		32,8	68,6	14,6	50	50	2,19	-	-	-	-
			40,1	72,8	17,9	55	45	2,67	-	-	-	-

F051

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F051	B682A	3,01	4,9	24,6	1,6	10	90	0,33	48,74	48,68	48,7	0,7
	B683A		14,7	49,5	4,9	25	75	0,98	56,59	55,76	56,2	8,2
	B684A		26,4	63,8	8,8	37,5	62,5	1,76	76,67	77,13	76,9	28,9
	B685A		36,0	70,6	12,0	45	55	2,40	-	-	-	-
	B686A		44,0	74,6	14,6	50	50	2,94	-	-	-	-

F052

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F052	B728A	2,81	4,6	23,3	1,6	10	90	0,30	49,04	48,89	49,0	1,0
	B729A		13,7	47,7	4,9	25	75	0,91	56,87	57,58	57,2	9,2
	B730A		24,7	62,2	8,8	37,5	62,5	1,64	76,13	76,05	76,1	28,1
	-		33,6	69,2	12,0	45	55	2,24	-	-	-	-
	-		41,1	73,3	14,6	50	50	2,74	-	-	-	-
	-		50,3	77,0	17,9	55	45	3,35	-	-	-	-

F053

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F053	B731A	2,73	4,4	22,8	1,6	10	90	0,30	51,70	51,37	51,5	3,5
	B732A		13,3	47,0	4,9	25	75	0,89	53,58	53,82	53,7	5,7
	B733A		24,0	61,5	8,8	37,5	62,5	1,60	57,88	57,78	57,8	9,8
	B734A		32,7	68,5	12,0	45	55	2,18	66,93	66,99	67,0	19,0
	B735A		40,0	72,7	14,6	50	50	2,66	78,74	78,65	78,7	30,7
	-		48,8	76,5	17,9	55	45	3,26	-	-	-	-

F099

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F099	B736A	2,81	4,6	23,3	1,6	10	90	0,30	47,88	47,78	47,8	-0,2
	B737A		13,7	47,7	4,9	25	75	0,91	53,15	53,01	53,1	5,1
	B738A		24,7	62,2	8,8	37,5	62,5	1,64	62,04	62,81	62,4	14,4
	B739A		33,6	69,2	12,0	45	55	2,24	72,12	72,15	72,1	24,1
	B740A		41,1	73,3	14,6	50	50	2,74	97,67*	97,12*	97,4*	49,4
	-		50,3	77,0	17,9	55	45	3,35	-	-	-	-

* im Glycerolbad

F100

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F100	B668A	3,02	4,9	24,7	1,6	10	90	0,33	50,60	50,60	50,6	2,6
	B669A		14,7	49,5	4,9	25	75	0,98	54,50	52,80	53,7	5,7
	B670A		26,5	63,9	8,8	37,5	62,5	1,77	59,41	60,19	59,8	11,8
	B676A		36,2	70,7	12,0	45	55	2,41	68,51	66,04	67,3	19,3
	B671A		44,2	74,7	14,6	50	50	2,95	77,10	79,70	78,4	30,4
	B672A		54,0	78,3	17,9	55	45	3,60	-	-	-	-

* im Glycerolbad

F101

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F101	B741A	2,67	4,3	22,4	1,6	10	90	0,29	48,46	48,61	48,5	0,5
	B742A		13,0	46,5	4,9	25	75	0,87	52,36	51,93	52,1	4,1
	B743A		23,4	61,0	8,8	37,5	62,5	1,56	62,95	62,75	62,9	14,9
	B744A		32,0	68,1	12,0	45	55	2,13	69,97	73,02	71,5	23,5
	B745A		35,4	70,2	13,2	47,5	52,5	2,36	85,15*	88,33*	86,7*	38,7
	B746A		39,1	72,3	14,6	50	50	2,60	100,57*	104,07*	102,3*	54,3

* im Glycerolbad

F102

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F102	B747A	2,4	3,9	20,6	1,6	10	90	0,26	47,18	46,90	47,0	-1,0
	B748A		11,7	43,8	4,9	25	75	0,78	53,87	50,39	52,1	4,1
	B749A		21,1	58,4	8,8	37,5	62,5	1,40	59,81	60,72	60,3	12,3
	B750A		28,7	65,7	12,0	45	55	1,92	77,65	78,46	78,1	30,1
	B751A		35,1	70,1	14,6	50	50	2,34	101,14*	100,09*	100,6*	52,6
	-		42,9	74,1	17,9	55	45	2,86	-	-	-	-

* Im Glycerolbad

F104

Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F104	B677A	2,69	4,4	22,6	1,6	10	90	0,29	48,37	48,37	48,4	0,4
	B678A		13,1	46,7	4,9	25	75	0,87	52,51	52,51	52,5	4,5
	B679A		23,6	61,2	8,8	37,5	62,5	1,57	63,46	63,46	63,5	15,5
	B680A		32,2	68,2	12,0	45	55	2,15	81,53	81,53	81,5	33,5
	B681A		39,4	72,4	14,6	50	50	2,62	109,0*1	109,01*	109,0*	61,0

* Im Glycerolbad

F108

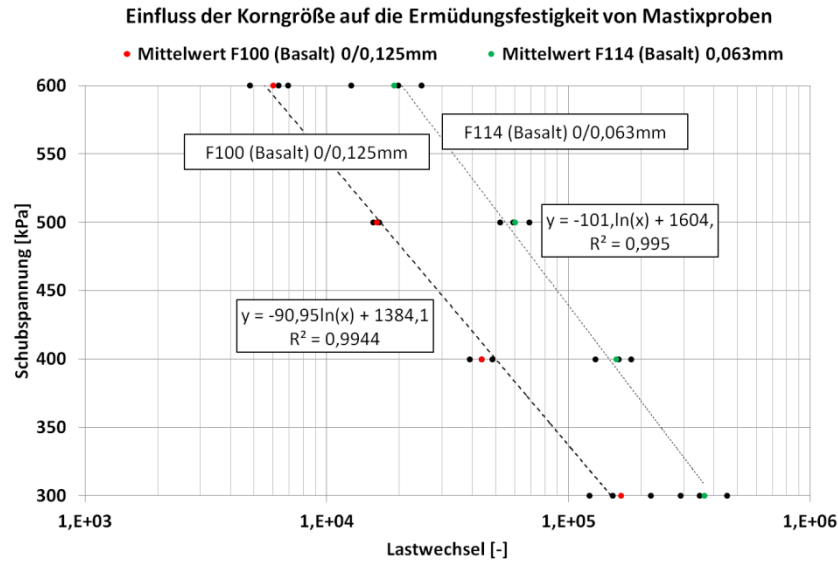
Füller	Mastix	ρ_f	m_f	Mf	V_f	V_f	V_b	$m_{f/b}$	$T_{1R\&B}$	$T_{2R\&B}$	$T_{R\&B}$	$\Delta T_{R\&B}$
		[Mg/m ³]	[g]	[%]	[mm ³]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
F108	B752A	3,01	4,9	24,6	1,6	10	90	0,33	50,56	50,14	50,4	2,4
	B753A		14,7	49,5	4,9	25	75	0,98	53,44	53,14	53,3	5,3
	B754A		26,4	63,8	8,8	37,5	62,5	1,76	65,34	65,34	65,3	17,3
	B755A		36,0	70,6	12,0	45	55	2,40	81,48	81,01	81,2	33,2
	B756A		44,0	74,6	14,6	50	50	2,94	92,94*	93,12*	93,0*	45,0
	-		53,8	78,2	17,9	55	45	3,59	-	-	-	-

Ergebnisse des dynamischen Scherrheometer

Spannungsgesteuert

Einfluss Korngröße

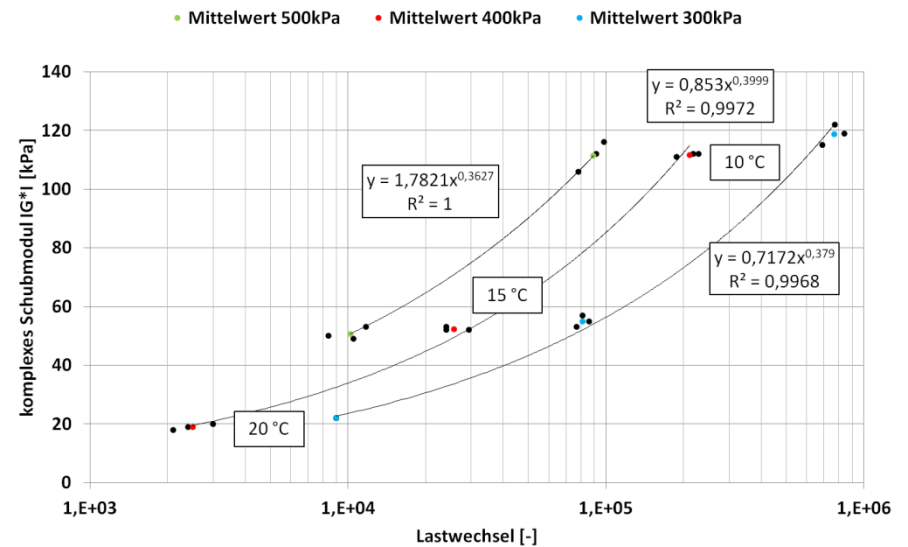
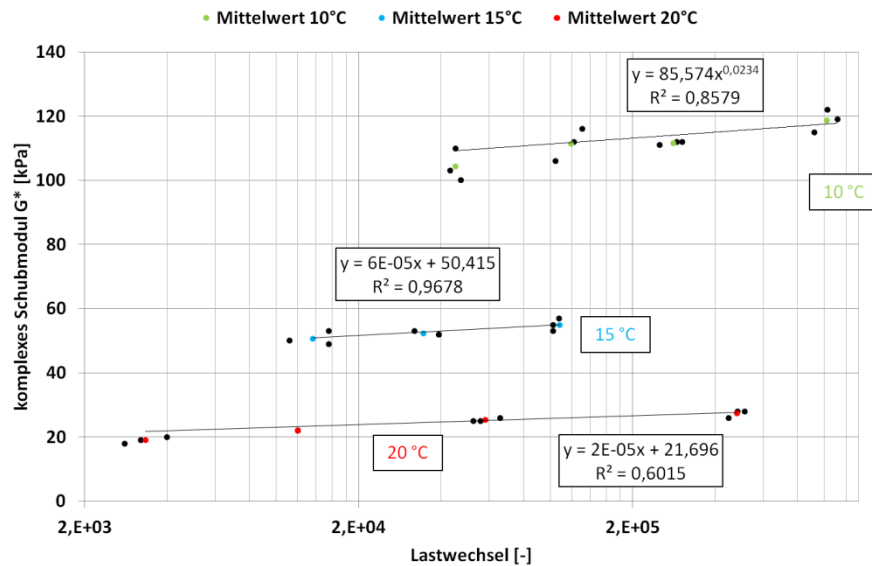
Sample	Filler	Temp.	Stress [kPa]	Test #1					Test #2					Test #3					MV				
				$ G^* _{t=10s}$	$\delta_{t=10s}$	$\gamma_{t=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{t=10s}$	$\delta_{t=10s}$	$\gamma_{t=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{t=10s}$	$\delta_{t=10s}$	$\gamma_{t=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{t=10s}$	$\delta_{t=10s}$	$G^*_{t=10s} \sin(\delta)$	[s]	Load Cycles
B613A	F100	10	600	53	41,3		210	6.300	72	40,0		230	6.900	49	42,7		160	4.800	58	41,3	38,3	200	6.000
		10	500	71	38,6		550	16.500	50	39,3		520	15.600	54	39,3		540	16.200	58	39,1	36,8	537	16.100
		10	400	48	39,0		1.300	39.000	52	38,7		1.460	43.800	62	37,9		1.610	48.300	54	38,5	33,6	1.457	43.700
		10	300	46	38,1		4.070	122.100	54	37,4		5.080	152.400	74	36,4		7.310	219.300	58	37,3	35,1	5.487	164.600
B764A	F114	10	600	89	37,4	0,674	660	19.800	91	35,9	0,662	820	24.600	85	36,4	0,705	420	12.600	88	36,6	52,6	633	19.000
		10	500	99	34,4	0,504	2.290	68.700	92	34,8	0,546	1.740	52.200	94	35,0	0,535	1.970	59.100	95	34,7	54,1	2.000	60.000
		10	400	94	35,3	0,425	5.380	161.400	93	35,4	0,431	4.310	129.300	96	33,9	0,416	6.050	181.500	94	34,9	53,9	5.247	157.400
		10	300	93	35,0	0,323	15.120	453.600	93	34,6	0,321	9.720	291.600	93	34,8	0,324	11.640	349.200	93	34,8	53,1	12.160	364.800



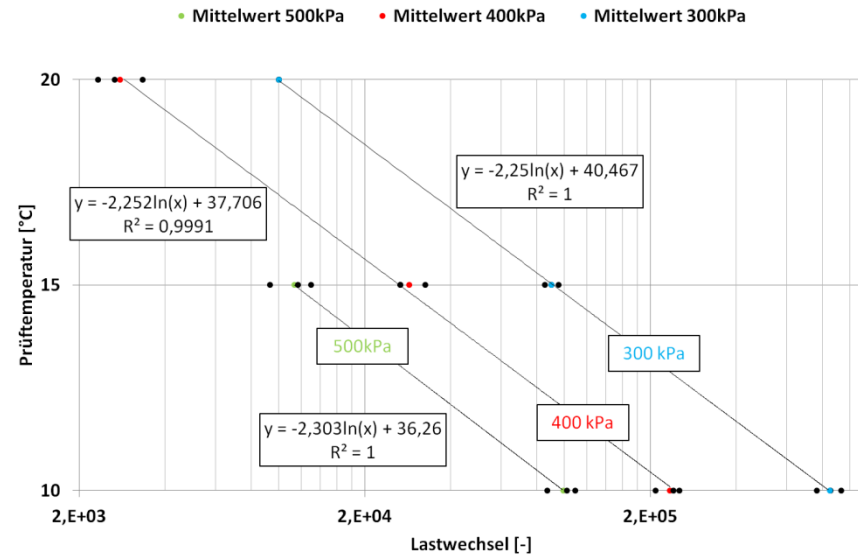
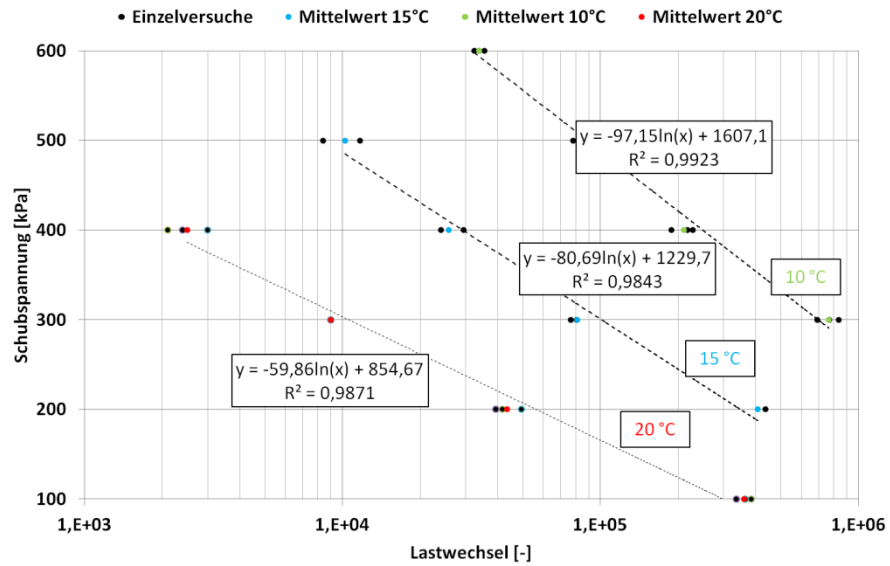
Einfluss der Temperatur

Sample	Filler	Temp.	Stress [kPa]	Test #1					Test #2					Test #3					MV				
				$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$G^* _{E=10s} \cdot \sin(\delta)$	[s]	Load Cycles
B598A	F040	10	600	110	35,9		1.130	33.900	103	36,1		1.080	32.400	100	35,9		1.180	35.400	104	36,0	61,3	1.130	33.900
		10	500	112	34,8		3.060	91.800	106	35,0		2.610	78.300	116	34,5		3.270	98.100	111	34,8	63,5	2.980	89.400
		10	400	112	34,2		7.240	217.200	111	34,3		6.260	187.800	112	34,1		7.600	228.000	112	34,2	62,8	7.033	211.000
		10	300	119	33,0		27.940	838.200	122	33,2		25.700	771.000	115	33,2		23.020	690.600	119	33,1	64,9	25.553	766.600
		10	200	116	32,2			0		129	31,5		161.310	4.839.300				0	123	31,9	64,6	161.310	4.839.300
B598A	F040_20°C	20	400	18	59,5	2,130	70	2.100	19	59,1	2,020	80	2.400	20	58,5	1,947	100	3.000	19	59,0	16,3	83	2.500
		20	300	22	56,4	1,352	300	9.000	22	55,9	1,335	300	9.000	22	56,4	1,374	300	9.000	22	56,2	18,3	300	9.000
		20	200	25	53,3	0,804	1.390	41.700	25	53,2	0,802	1.310	39.300	26	52,5	0,768	1.640	49.200	25	53,0	20,2	1.447	43.400
		20	100	28	50,8	0,359	12.790	383.700	26	50,6	0,385	11.180	335.400	28	50,9	0,362	12.100	363.000	27	50,8	21,2	12.023	360.700
		20	500	50	46,6	1,001	280	8.400	49	45,9	1,014	350	10.500	53	45,4	0,940	390	11.700	51	46,0	36,4	340	10.200
B598A	F040_15°C	15	400	53	44,9	0,753	800	24.000	52	45,5	0,773	800	24.000	52	45,3	0,763	980	29.400	52	45,2	37,2	860	25.800
		15	300	57	43,2	0,528	2.700	81.000	55	43,3	0,546	2.860	85.800	53	43,9	0,562	2.560	76.800	55	43,5	37,8	2.707	81.200
		15	200	61	41,3	0,329	14.560	436.800	58	42,3	0,345	12.500	375.000				0	60	41,8	39,7	13.530	405.900	
		15	500	50	46,6	1,001	280	8.400	49	45,9	1,014	350	10.500	53	45,4	0,940	390	11.700	51	46,0	36,4	340	10.200

Abhängigkeit des komplexen Schubmoduls bei unterschiedlichen Temperaturen und Spannungen



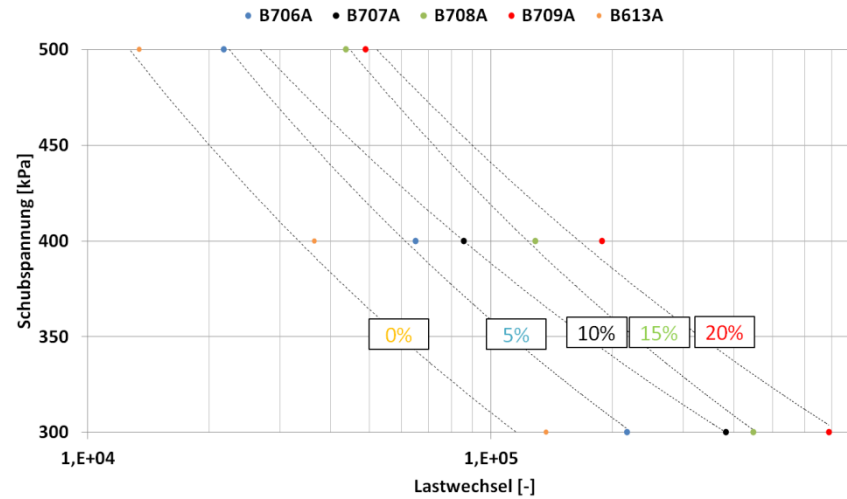
Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit bei gleicher Spannung und unterschiedlichen Temperaturen



Einfluss des Kalkhydrates

Sample	Filler	Temp.	Stress [kPa]	Test #1					Test #2					Test #3					MV				
				$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$G^* _{E=10s} \cdot \sin(\delta)$	[s]	Load Cycles
B613A	F100	10	600	53	41,3		210	6.300	72	40,0		230	6.900	49	42,7		160	4.800	58	41,3	38,3	200	6.000
		10	500	71	38,6		550	16.500	50	39,3		520	15.600	54	39,3		540	16.200	58	39,1	36,8	537	16.100
		10	400	48	39,0		1.300	39.000	52	38,7		1.460	43.800	62	37,9		1.610	48.300	54	38,5	33,6	1.457	43.700
		10	300	46	38,1		4.070	122.100	54	37,4		5.080	152.400	74	36,4		7.310	219.300	58	37,3	35,1	5.487	164.600
B706A	5% F042 + 95% F100	10	500	120	35,4	0,417	950	28.500	106	36,2	0,471	860	25.800	89	36,8	0,559	800	24.000	105	36,1	61,9	870	26.100
		10	400	114	34,8	0,351	3.040	91.200	94	35,7	0,425	2.120	63.600	99	35,1	0,402	2.650	79.500	102	35,2	59,0	2.603	78.100
		10	300	83	35,0	0,362	9.030	270.900	85	34,4	0,355	9.440	283.200	77	35,6	0,389	7.640	229.200	82	35,0	46,8	8.703	261.100
B707A	10% F042 + 90% F100	10	500	156	33,3	0,320	2.020	60.600	126	34,2	0,396	1.770	53.100	115	34,2	0,435	1.580	47.400	132	33,9	73,8	1.790	53.700
		10	400	110	33,5	0,365	3.980	119.400	96	34,0	0,418	2.910	87.300	97	34,1	0,411	3.390	101.700	101	33,9	56,3	3.427	102.800
		10	300	104	33,3	0,290	15.300	459.000	102	33,7	0,294	13.300	399.000	111	32,3	0,270	17.320	519.600	106	33,1	57,7	15.307	459.200
B708A	15% F042 + 85% F100	10	500	129	32,9	0,388	2.080	62.400	116	33,5	0,431	1.660	49.800	109	33,7	0,459	1.500	45.000	118	33,4	64,9	1.747	52.400
		10	400	105	32,5	0,382	4.800	144.000	112	32,6	0,359	5.550	166.500	125	32,3	0,319	5.110	153.300	114	32,5	61,2	5.153	154.600
		10	300	117	32,1	0,256	15.400	462.000	115	31,9	0,261	16.670	500.100	142	30,5	0,212	21.610	648.300	125	31,5	65,1	17.893	536.800
B709A	20% F042 + 80% F100	10	500	118	32,2	0,423	1.800	54.000	118	32,6	0,424	2.110	63.300	119	32,9	0,420	1.960	58.800	118	32,6	63,7	1.957	58.700
		10	400	127	31,3	0,316	6.070	182.100	127	30,6	0,316	8.200	246.000	127	30,5	0,314	8.370	251.100	127	30,8	65,0	7.547	226.400
		10	300	129	30,8	0,232	22.750	682.500	137	30,0	0,219	31.280	938.400	131	30,3	0,229	28.570	857.100	132	30,4	66,9	27.533	826.000

Einfluss von Zugabe von Kalkhydrat anstatt Basalt auf die Ermüdungsfestigkeit



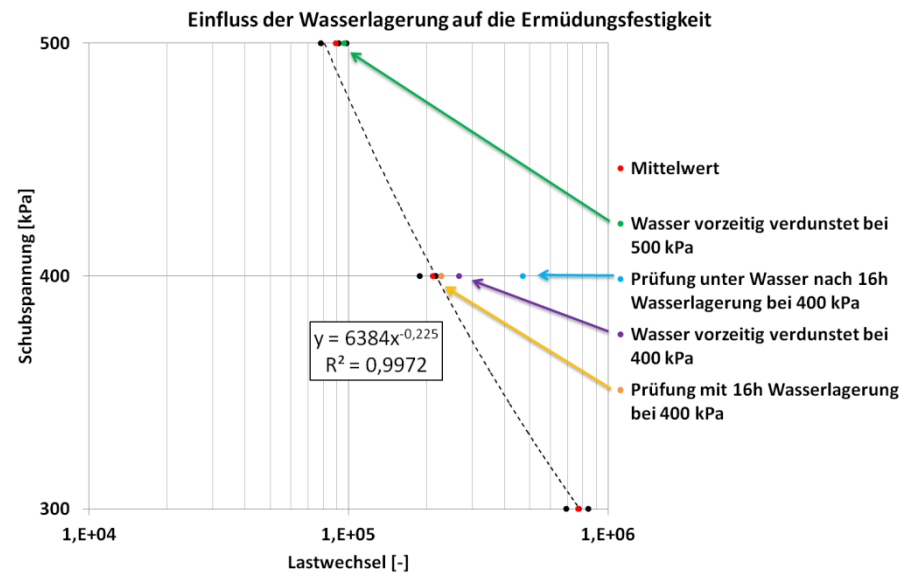
Einfluss des Wassers

Sample	Filler	Temp.	Stress [kPa]	Test #1					Test #2					Test #3					MV				
				$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$\gamma_{E=10s}$	[s]	Load Cycles	$ G^* _{E=10s}$	$\delta_{E=10s}$	$G^* _{E=10s} \cdot \sin(\delta)$	[s]	Load Cycles
B598A	F040	10	600	110	35,9		1.130	33.900	103	36,1		1.080	32.400	100	35,9		1.180	35.400	104	36,0	61,3	1.130	33.900
		10	500	112	34,8		3.060	91.800	106	35,0		2.610	78.300	116	34,5		3.270	98.100	111	34,8	63,5	2.980	89.400
		10	400	112	34,2		7.240	217.200	111	34,3		6.260	187.800	112	34,1		7.600	228.000	112	34,2	62,8	7.033	211.000
		10	300	119	33,0		27.940	838.200	122	33,2		25.700	771.000	115	33,2		23.020	690.600	119	33,1	64,9	25.553	766.600
		10	200	116	32,2			0		129	31,5		161.310	4.839.300				0	123	31,9	64,6	161.310	4.839.300
8A_Wasser	F040	10,00	400	87	37,2	0,461	3.210	96.300	118	31,9	0,339	8.910	267.300	118	31,9	0,339	7.580	227.400	108	33,7	59,7	6.567	197.000

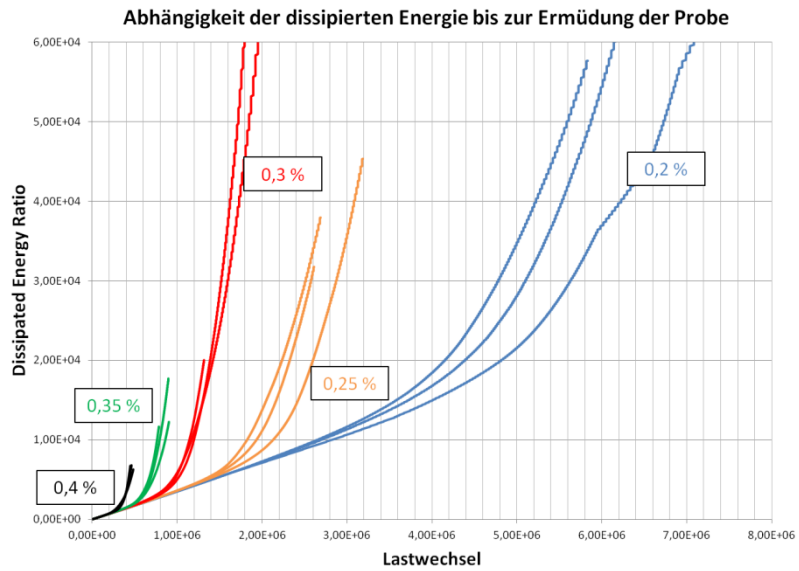
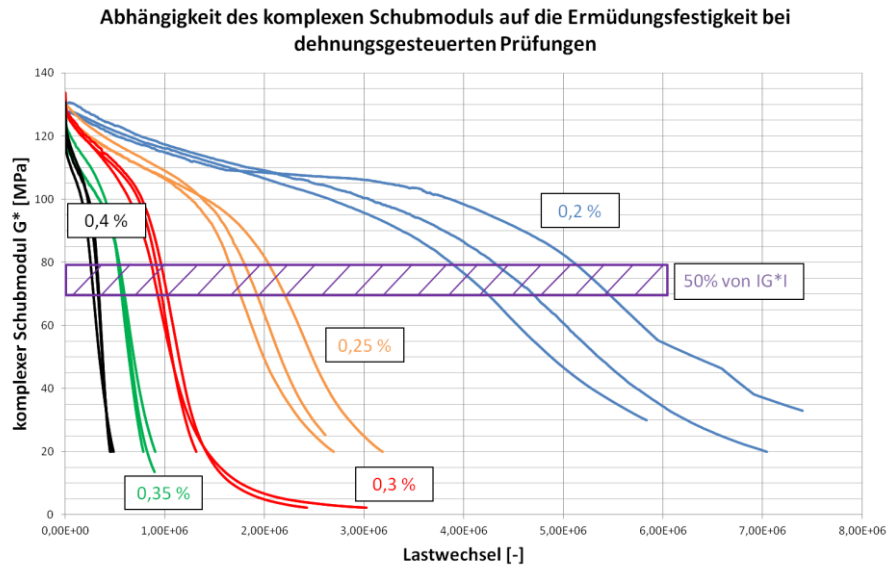
Wasser ist vor Prüfbeginn weg mit Kühlung

Wasser ist vor Prüfbeginn weg ohne oberer Kühlung

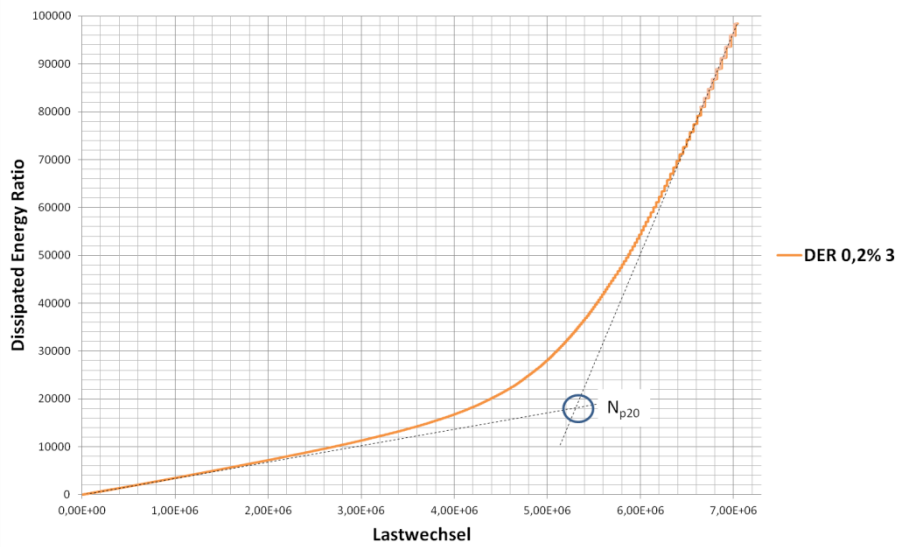
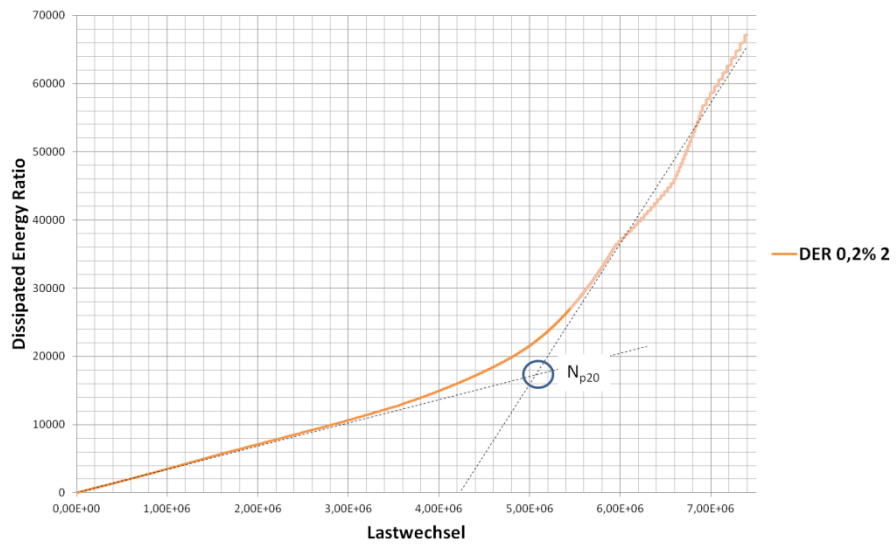
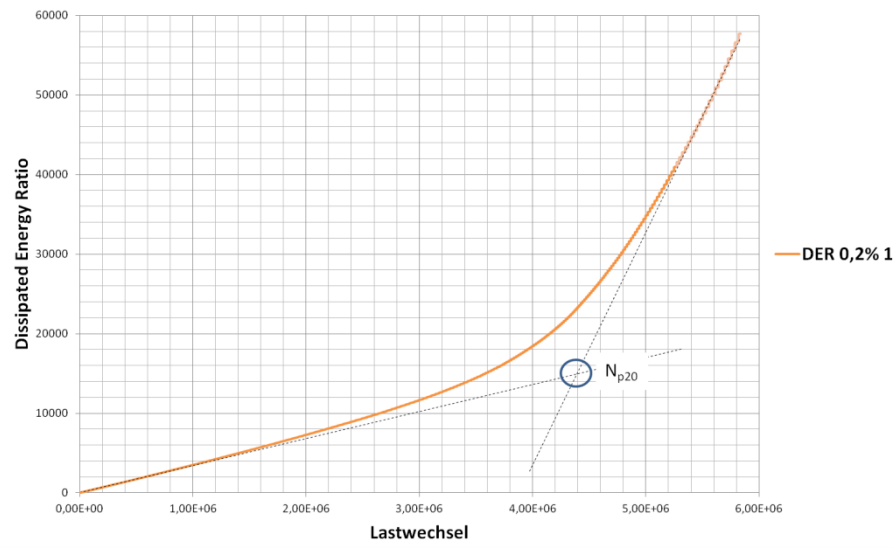
Prüfung im Wasser mit Silikondeckel



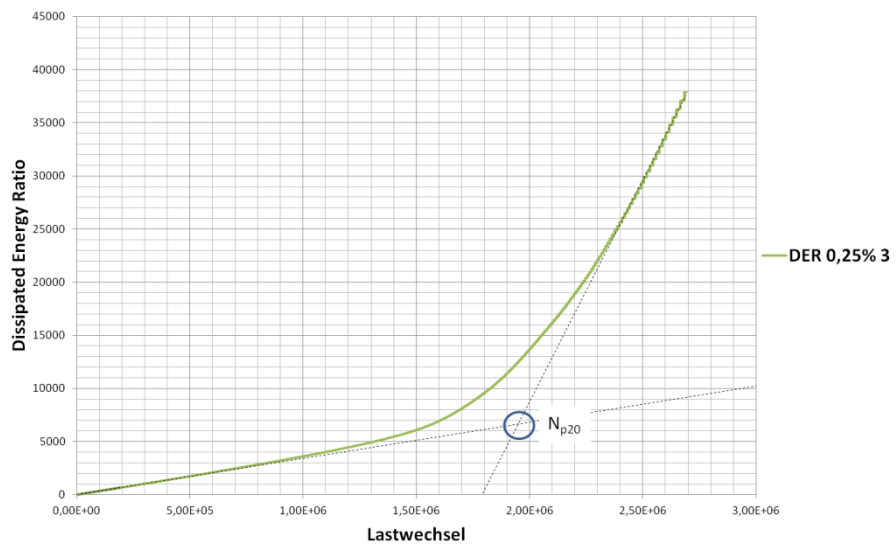
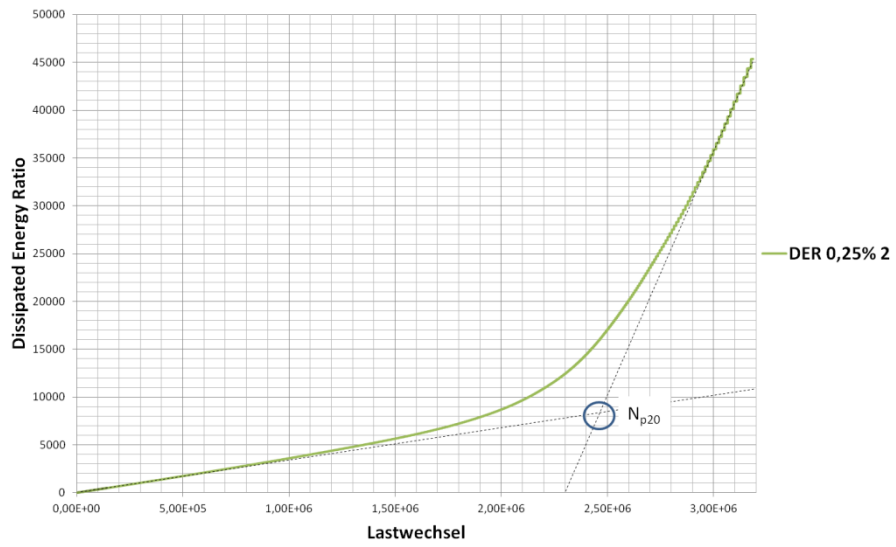
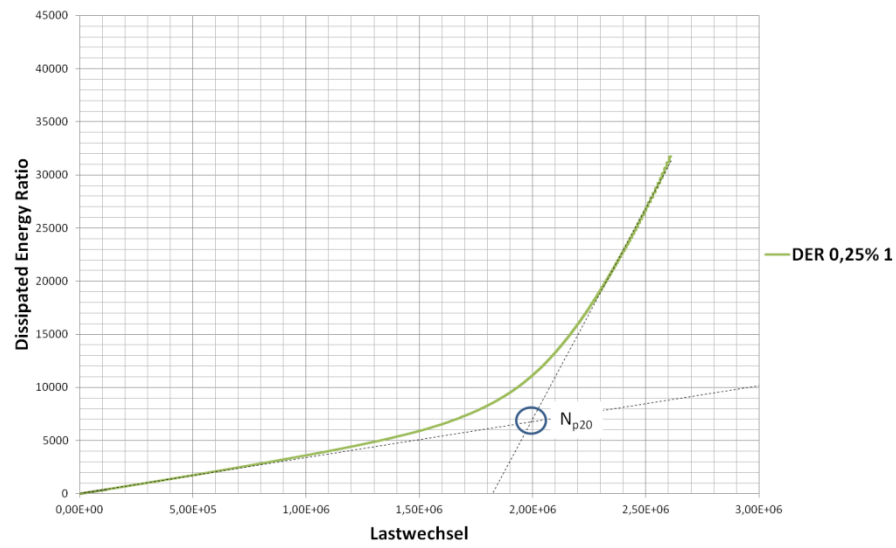
Dehnungsgesteuert



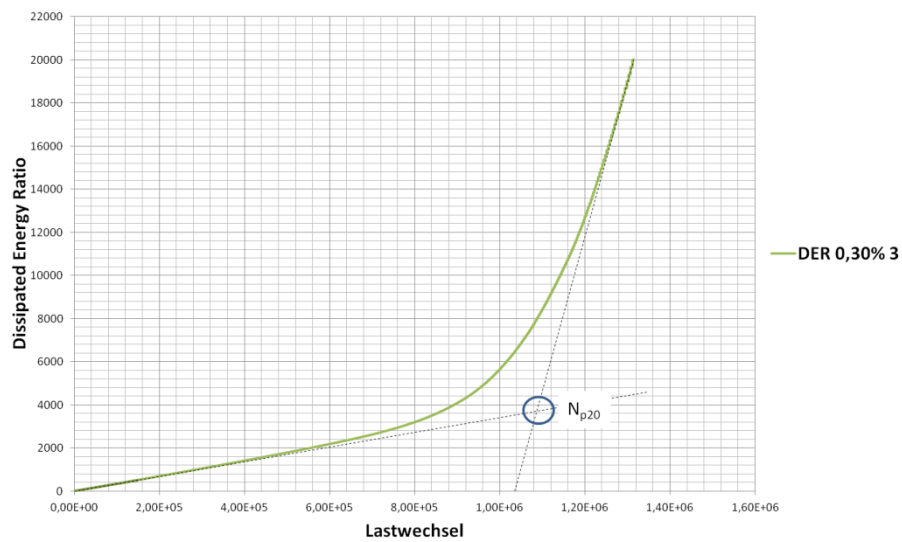
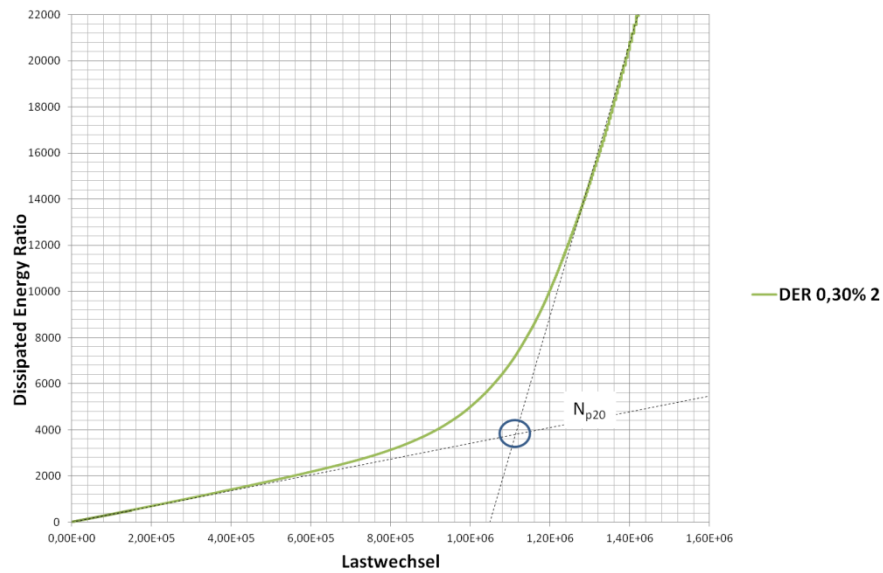
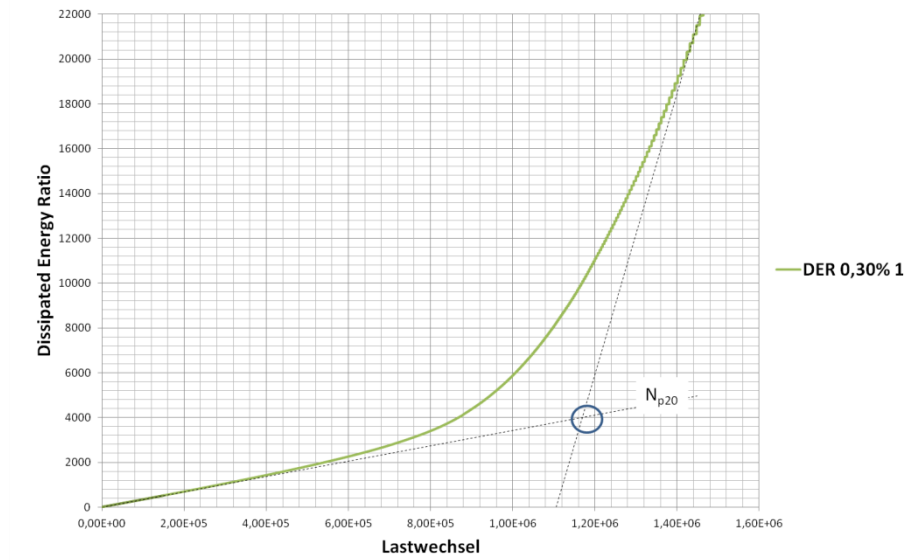
Ermittlung des Punktes N_{p20} , welcher die Ermüdungsfestigkeit angibt (Dehnung 0,2 %)



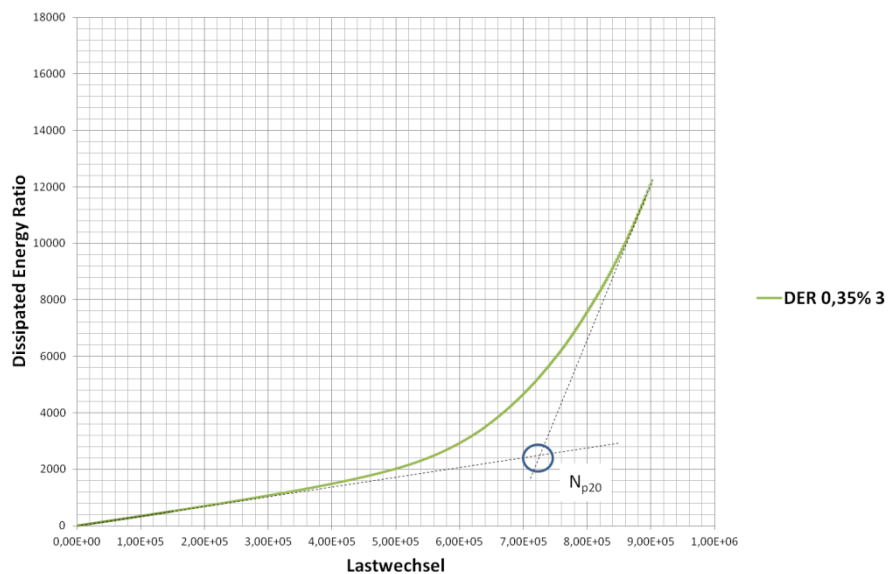
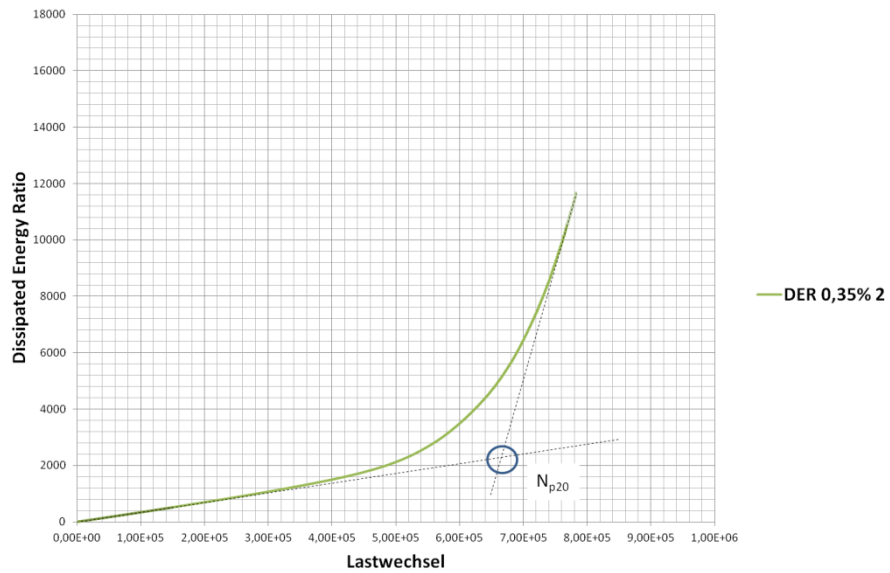
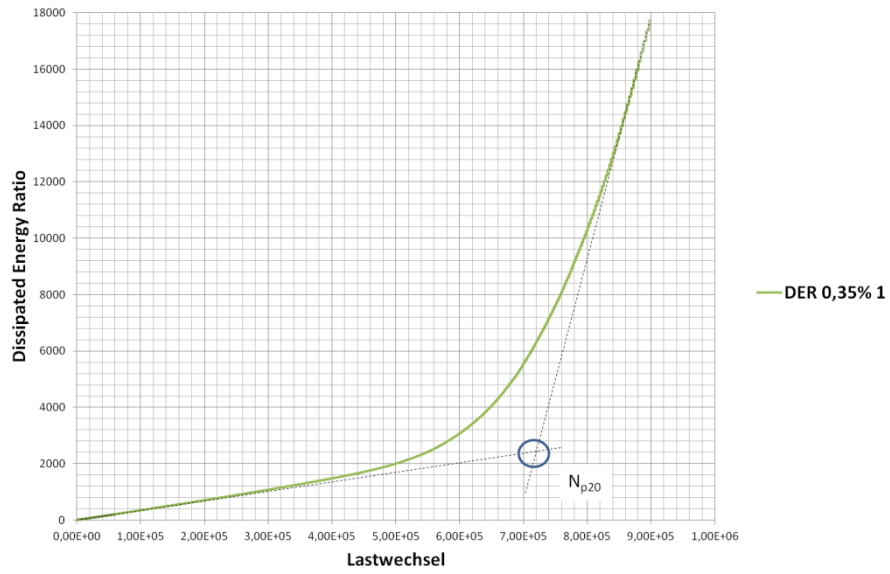
Ermittlung des Punktes N_{p20} , welcher die Ermüdungsfestigkeit angibt (Dehnung 0,25 %)



Ermittlung des Punktes N_{p20} , welcher die Ermüdungsfestigkeit angibt (Dehnung 0,30 %)



Ermittlung des Punktes N_{p20} , welcher die Ermüdungsfestigkeit angibt (Dehnung 0,35 %)



Ermittlung des Punktes N_p , welcher die Ermüdungsfestigkeit angibt (Dehnung 0,4 %)

