



DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Qualitätsbeurteilung der Asphaltmastix

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

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab
Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko
und
Univ. Ass. Dipl.-Ing. Markus Hospodka

E230-3

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Straßenwesen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Pia Mandahus, BSc

Matr. Nr.: 0725393

Greinergasse 29
1190 Wien, Österreich
pia.mandahus@tuwien.ac.at

Kurzfassung

Im Laufe der letzten Jahre wurden vermehrt Korn- und Schollenausbrüche auf Asphaltstraßen ohne hohe verkehrliche oder klimatische Belastungen festgestellt. Die Ursache wird in einer unzureichenden Mastixqualität vermutet. Um der Ursache auf den Grund zu gehen, wird für Mastix (Bitumen mit Füller) ein geeignetes Prüfkriterium gesucht. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, eine geeignete Prüfung für die Qualität von Mastix in Asphalt zu finden.

Als Prüfgerät wurde das dynamische Scherrheometer gewählt. Bei diesem Versuchsaufbau wurde eine drei Millimeter hohe Probe mit einem Durchmesser von acht Millimeter kraftschlüssig zwischen zwei Platten eingebaut, und anschließend durch Oszillation beansprucht. Der Ermüdungsbruch sollte in der Mitte des Probekörpers eintreten [1]. Um dies sicherzustellen, wurde eine spezielle Geometrie gewählt. Mithilfe einer Silikonform konnte in der Mitte eine Einschnürung geschaffen werden, um so eine Spannungskonzentration an dieser Stelle zu erhalten. Es konnte somit garantiert werden, dass bei jedem Probekörper im Einschnürungsbereich ein Ermüdungsbruch stattfindet.

In einem Prüfprogramm wurden fünf verschiedene Füller mit einem Bitumen 70/100 (PG 58-28) in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt. Nach Auswertung der Abweichungen der Ergebnisse wurde ein Mischverhältnis von Bitumen:Füller = 1:1,5 gewählt, mit welchem die weiteren Versuche durchgeführt wurden.

Bevor die Ermüdungsversuche gestartet werden konnten, musste zuerst die linear viskoelastische (LVE) Grenze ermittelt werden. Nur innerhalb dieses Bereichs sind die gesuchten Parameter wie der komplexe Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenverschiebungswinkel δ definiert, und innerhalb dieses Bereichs sollten die Ermüdungsversuche stattfinden [2]. Es wurden deswegen mit jedem Füller Amplitudensweeps durchgeführt, um das LVE Limit zu bestimmen. Mit der so ermittelten Schubspannung wurden danach die Probekörper auf Ermüdung getestet.

Die entwickelte Prüfmethode erweist sich als geeignet, die rheologischen Eigenschaften und die Qualität der Asphaltmastix zu bestimmen.

Abstract

Over the past years an increase of damages on asphalt roads with no relation to traffic-related or climatic stresses has been observed. To identify possible reasons, a suitable criterion to address mastic quality (bitumen with filler) was searched. Therefore the aim of this thesis is to find a test for the quality of the mastic in asphalt.

As testing instrument, the dynamic shear rheometer was chosen. In this experimental setup a three millimeters high sample with a diameter of eight millimeters is mounted force-fit between two plates, and subsequently stressed by sinusoidal oscillation. The fatigue failure should occur in the middle of the specimen [1]. To guarantee this, a special geometry for the specimen is selected. With the use of a silicone mold, a necking is created in the middle, to receive a stress concentration at this point. It was thus possible to ensure that for all specimens a fatigue failure occurred.

In a testing program, five different fillers were mixed with a binder 70/100 (PG 58-28) in different ratios. After evaluation of the deviations of the results, a mixing ratio of bitumen:filler = 1:1.5 was determined, with which the fatigue tests were conducted.

Before the fatigue tests could be started, the linear viscoelastic (LVE) limit had to be determined. Only within this range the desired parameters such as the dynamic modulus $|G^*|$ and the phase lag δ are defined, and within this range the fatigue tests should take place [2]. Therefore, with all mastic samples amplitude sweeps were carried out to determine the LVE limit. With that shear stress the fatigue tests took place.

It could be shown, that the developed test method is capable to address the rheological parameter and the fatigue characteristics of mastic.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Bitumen	3
2.1	Defintion	3
2.2	Herstellung von Bitumen	4
2.3	Eigenschaften von Bitumen	5
2.3.1	Temperaturabhängigkeit und Verformungsverhalten	5
2.3.2	Adhäsion	5
2.3.3	Verhalten gegenüber Wasser	6
2.3.4	Verhalten gegenüber chemischen Stoffen	6
2.3.5	Wärmeleitfähigkeit	6
2.3.6	Alterung	6
2.4	Prüfverfahren für Bitumen	7
2.4.1	Konventionelle Prüfverfahren	7
2.4.2	Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren	7
2.5	Bitumenarten und Anwendungsgebiete	9
2.5.1	Straßenbaubitumen	10
2.5.2	Modifiziertes Bitumen	10
2.5.3	Industriebitumen	10
2.5.4	Bitumenemulsionen	11
3	Asphalt	12
3.1	Funktion	12
3.2	Aufbau	13
3.2.1	Gestein	13
3.2.2	Bitumen	14
4	Probenvorbereitung, Prüfmatrix	15
4.1	Probenauswahl	15
4.1.1	Bitumen	15
4.1.2	Füller	15
4.1.3	Mischverhältnis	16
4.2	Mischvorgang	16
4.3	Prüfmatrix	17

5	Prüfablauf.....	18
5.1	Füllerprüfungen	18
5.1.1	Bestimmung der Dichte nach EN 1097-7	18
5.1.2	Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach EN 1097-4 (Ridgen)	18
5.1.3	Bestimmung der Korngrößenverteilung.....	19
5.1.4	Bestimmung der Mineralogie mittels Röntgendiffraktometrie	20
5.1.5	Bestimmung der Oberflächengröße mittels BET-Verfahren	20
5.2	Mastixprüfung – Dynamisches Scherrheometer	21
5.3	Versuchsvorbereitung	22
5.3.1	Geometrie des Probekörpers	22
5.3.2	Einlegen der Probe	24
5.4	Versuchsablauf	27
5.4.1	Linear viskoelastisches Materialverhalten	27
5.4.2	Ermüdungsversuche	30
6	Ergebnisse & Interpretation	33
6.1	Ergebnisse der Füllerprüfungen	33
6.2	Mastixversuche - Wiederholbarkeit	36
6.3	Mastixversuche - Zusammenhang Lastzyklen – aufgebrauchte Schubspannung	37
6.4	Mastixversuche - Zusammenhang Lastzyklen – Anfangssteifigkeit	38
6.5	Fazit	39
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	40
	Literaturverzeichnis.....	42
	Abbildungsverzeichnis	45
	Tabellenverzeichnis	46
	Anhang	47

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Qualitätskontrolle von Mastix. Die Notwendigkeit eines solchen Prüfverfahrens ergibt sich aus dem vermehrten Auftreten von Schäden an Deckschichten, wobei aber kein systematischer Zusammenhang mit verkehrlichen oder klimatischen Belastungen gefunden werden konnte.

Die Schadensbilder (zu sehen in Abbildung 1.1) zeigen vor allem Korn- und Schollenausbrüche.



Abbildung 1.1 Korn- und Schollenausbrüche [3]

Möglicher Ansatzpunkt ist, dass hier eine mangelhafte Mastix vorliegt, also dass das Bitumen mit dem Füllermaterial nicht gut interagiert. Als eventuelle Ursachen der Schäden wurden entweder ein mangelndes Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix ausgemacht, eine ungünstige mineralogische Zusammensetzung der Feinteile oder ein minderwertiges Bitumen.

Durch den 4-Punkt-Biegebalken existiert bereits ein Prüfverfahren für Asphalt, allerdings fehlt ein geeigneter Versuch um die Mastix (Bitumen mit Füller) auf Ermüdung zu testen. Ermüdung ist die Verringerung der Festigkeit eines Materials bei wiederholter Belastung im Vergleich mit der Festigkeit unter einer Einzellast. [4]

Das entwickelte Prüfsystem soll natürlich zielgerichtet und selektiv, aber andererseits leicht umsetzbar und kurz sein, um zu hohe Kosten und Arbeitszeit zu vermeiden. Das dynamische

Scherrheometer erschien als Prüfgerät als beste Lösung, da es allgemein verfügbar ist, und ein Versuch rasch und einfach durchführbar ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch kleine Proben sorgfältig geprüft werden können. Näheres zum Aufbau und zu den Ergebnissen eines DSR ist im Hauptteil der Arbeit zu finden.

2 Bitumen

2.1 Definition

Die chemische Zusammensetzung von Bitumen kann je nach Herkunftsort sehr variieren, wobei sich in den Gebrauchseigenschaften oft keine Unterschiede erkennen lassen. Neben den Kohlenwasserstoffen und Kohlenwasserstoffderivaten setzt sich Bitumen unter anderem auch aus Schwefel, Stickstoff und Sauerstoff zusammen. (Siehe Tabelle 2.1) [5]

Tabelle 2.1 Zusammensetzung von Bitumen [5]

Chemisches Element	Abkürzung d. chem. 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

Alle Bitumen bestehen grundsätzlich aus drei verschiedenen Molekültypen:

- Dispersionsmittel: ölige, lösliche Bestandteile, Massen von 500-1500 g/mol
- Erdölharze: bestehen qualitativ aus denselben Stoffen wie das Dispersionsmittel, hat aber eine gute Klebefähigkeit
- Asphaltene: unlösliche, unschmelzbare Bestandteile mit Teilchenmassen von 5000-9000 u.

Dispersionsmittel und Erdölharze bilden zusammen die Gruppe der Maltene. [6]

Die mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit und Verformbarkeit hängen sehr stark von der Temperatur ab, d.h. Bitumen ist ein thermoplastischer Werkstoff. Bei niedrigen Temperaturen ist es spröde und kann brechen, bei höheren Temperaturen wird es zunehmend viskos und ist daher gut verformbar. [6]

Das Verhalten von Bitumen bei einer bestimmten Temperatur, hängt besonders vom Verhältnis Maltene/Asphaltene ab. [6]

Bitumen wird größtenteils für Bauzwecke benutzt, hierbei hauptsächlich als Bestandteil von Asphalt für den Straßenbau, aber auch für Abdichtungen von Dächern. Der derzeitige weltweite Bitumenverbrauch wird jährlich auf ca. 102 Mio. Tonnen geschätzt, wobei etwa 85 % davon für den Straßenbau verwendet werden. [7]

In der ÖNORM EN 12597 wird es als „nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich ist“ beschrieben. „Bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos oder nahezu fest.“ [8]

2.2 Herstellung von Bitumen

Die Gewinnung von Bitumen ist in Abbildung 2.1 dargestellt und erfolgt in Raffinerien aus Rohöl. Dort wird in zwei oder mehreren Stufen das Bitumen durch Destillation hergestellt. Im ersten Schritt werden bei ca. 300-400°C unter atmosphärischem Druck durch Verdampfen und anschließendem Kondensieren leichte Bestandteile wie Diesel, Benzin und Heizöl aufgrund ihrer unterschiedlichen Siedetemperatur voneinander getrennt. Im nächsten Schritt werden bei einem niedrigeren Druck von etwa 50 Millibar über Vakuum weitere schwere Öle abdestilliert, die vor allem als Schmiermittel zum Einsatz kommen. Endprodukt ist, neben schwerem Heizöl, das Destillationsbitumen, welches sich als schwerster Bestandteil am Boden sammelt. [9]

Danach können durch spezielle Bearbeitung einzelne Eigenschaften des Bindemittels verbessert werden. So kann zum Beispiel Oxidationsbitumen durch Einblasen von Luft, oder Polymerbitumen durch Zugabe von Polymeren hergestellt werden. [10]

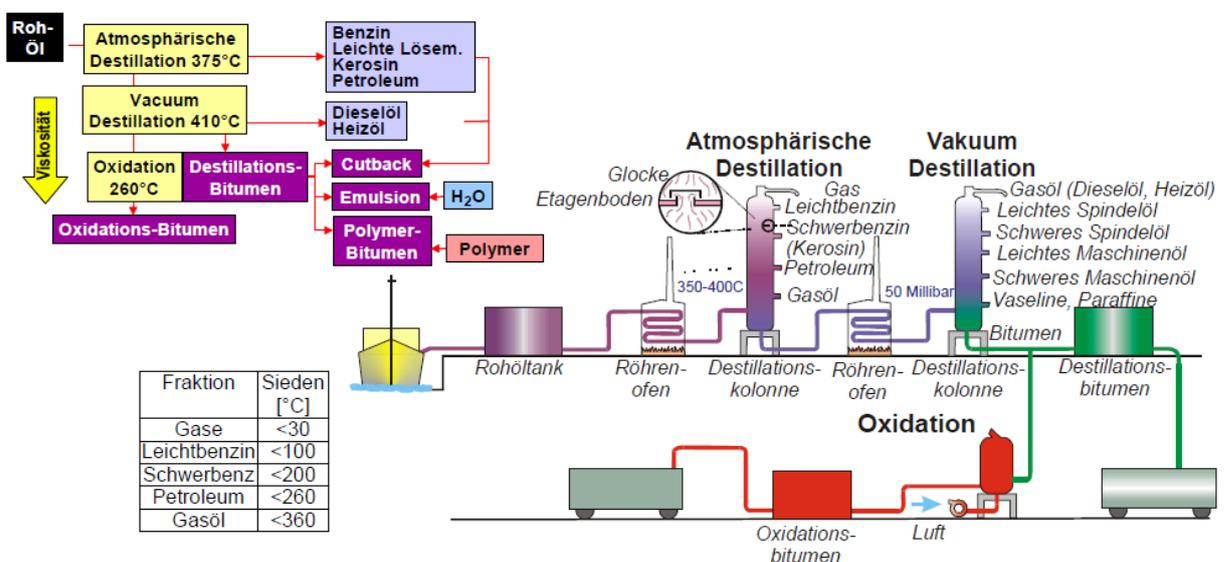


Abbildung 2.1 Gewinnung von Bitumen [11]

Bitumen kann nicht nur technisch hergestellt werden, es gibt auch natürliche Vorkommen wie zum Beispiel auf Trinidad in der Karibik. Das flüssige Bitumen sprudelt auf dieser Insel mit Mineralstoffen aus der Erde, und bildet einen rund 40 ha großen Asphaltsee und den damit größten solcher Seen weltweit. [12]

2.3 Eigenschaften von Bitumen

2.3.1 Temperaturabhängigkeit und Verformungsverhalten

Fast alle Eigenschaften von Bitumen sind temperaturabhängig, vor allem seine Konsistenz. Je tiefer die Temperatur ist, desto härter, spröder und elastischer ist das Bindemittel. Wird Bitumen erwärmt, wird es zuerst weicher und leichter verformbar, bis es schließlich flüssig wird. Deswegen wird Bitumen im heißen Zustand gemischt und verarbeitet, bis es bei kühleren Temperaturen das Bindemittel im Asphalt darstellt, und auch belastet werden darf. Durch diese Eigenschaft wird Bitumen als ein thermoplastischer Werkstoff bezeichnet. [5]

Bei welchen Temperaturen welche Konsistenz erreicht wird, ist von der Bitumensorte abhängig. Je härter das Bindemittel ist, desto höher muss die Temperatur sein um es zu verflüssigen. Um die Bitumenklasse zu bestimmen, können verschiedene Versuche durchgeführt werden, auf welche später in der Arbeit auszugsweise eingegangen wird. [5]

Die Steifigkeit hängt ebenfalls von der Temperatur und der Bindemittelsorte ab. Je härter das Bitumen ist, desto geringer ist der viskose Anteil. Außerdem ist der Verformungswiderstand auch von der Belastungsdauer abhängig. Wird das Bitumen nur kurz belastet, zeigt sich eher ein elastisches Verhalten, und das Bindemittel federt (fast vollständig) wieder in seinen Ausgangszustand zurück. Ist die Belastungszeit allerdings länger, kann die Verformung durch den viskosen Anteil auch dauerhaft sein. [5]

Eine weitere temperaturabhängige Eigenschaft ist das Relaxationsvermögen von Bitumen. Es kann sich durch viskose Verformung der Belastung bzw. der Spannung entziehen. Je härter die Bitumensorte ist, desto schlechter kann es Spannungen abbauen. Das Relaxationsvermögen wird besonders bei Fugen oder im Asphalt genützt. Da sich Asphalt durch klimatische Temperaturschwankungen ausdehnt bzw. zusammenzieht, muss das Bitumen die einwirkenden Kräfte abbauen. Falls die Temperatur zu schnell sinkt, wird das Bitumen härter, und kann die entstandenen Spannungen nicht mehr abbauen, woraus dann Kälterisse entstehen können. [5]

2.3.2 Adhäsion

Da das Bitumen die Funktion eines Bindemittels hat, ist das Haftverhalten bzw. die Adhäsion mit anderen Stoffen sehr wichtig. Im Straßenbau spielt vor allem die Klebewirkung mit Gestein eine große Rolle.

Für eine gute Verbindung zwischen Bitumen und Gestein ist die vollständige Benetzung der Gesteinskörner notwendig. Deswegen ist es auch wichtig, dass das Gestein vor dem Mischen des Asphalts gut getrocknet ist, bzw. dass kein Wasserfilm den Verbund mit Bitumen beeinträchtigen kann. Außerdem sollte aus demselben Grund kein Staub in den fertig gemischten Asphalt gelangen. Üblicherweise gilt für Gestein, dass (bezogen auf die

Oberflächenladung) saure Produkte schlechter haften, während neutrale bis basische Gesteine eine bessere Adhäsion aufweisen.

2.3.3 Verhalten gegenüber Wasser

Bitumen ist wasserundurchlässig, und ist so gut wie unlöslich in Wasser. Außerdem ist auch die Diffusionswiderstandszahl sehr hoch, wodurch Bitumen auch gegen Wasserdampf praktisch undurchlässig ist. Deswegen werden Bitumenanstriche gerne als Korrosionsschutz oder zur Bauwerksabdichtung verwendet. [5]

2.3.4 Verhalten gegenüber chemischen Stoffen

Bitumen ist äußerst widerstandsfähig gegen sowohl organische als auch anorganische Salze, sowie gegen schwache Säuren und auch hoch konzentrierte Basen. Bei starken Säuren ist zu untersuchen, ob diese oxidierend wirken. Je härter das Bitumen ist (Bitumenklassen mit hoher Viskosität oder bei tiefen Temperaturen), desto beständiger ist es gegen chemische Angriffe. Anfällig ist Bitumen nur bei Stoffen aus den Erdölfraktionen. In Benzin, Öl oder Toluol ist Bitumen zum Beispiel fast vollständig löslich. [5]

Besonders wichtig für den Einsatz im Straßenbau ist vor allem die Widerstandsfähigkeit gegen Winterstreumittel (Tausalze) und auch Düngemittel aus der Landwirtschaft.

2.3.5 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Bitumen ist äußerst schlecht. Durch einen Wärmeleitkoeffizienten von 0,17 W/mK gilt der Stoff als wärmedämmend. [5]

2.3.6 Alterung

Die Alterung von Bitumen kann großteils auf zwei verschiedene Vorgänge zurückgeführt werden: die destillative und die oxidative Alterung.

2.3.6.1 Destillative Alterung

Die destillative Alterung kommt vor allem bei hohen Temperaturen, z.B. beim Einbau von Asphalt vor. Sie entsteht durch das Abdampfen weicherer Ölanteile, und kann somit zu einer Verfestigung des Bitumens führen. Je höher die Temperatur ist, desto höher ist auch der Anteil an verdampfenden Ölanteilen. Weichere Bitumensorten besitzen mehr dieser weicheren Ölanteile, wodurch hier ein stärkeres Altern beobachtet werden kann. Einen weiteren Effekt auf das Altern hat die spezifische Oberfläche der Bitumenprobe. Je größer die Verdampfungsfläche ist, desto größer ist der Anteil der destillativen Alterung.

2.3.6.2 Oxidative Alterung

Die oxidative Alterung beruht auf einer Interaktion mit Sauerstoff. Die Alterung erfolgt schneller, wenn ungehindert immer neue Luft zugeführt wird. Außerdem verstärkt auch eine

höhere Temperatur den Alterungsprozess von Bitumen. Ein weiterer Einflussfaktor ist das Licht. Während bei Dunkelheit die oxidative Alterung fast gar nicht voranschreitet, ist sie mit UV-Licht um einiges schneller. [5]

2.4 Prüfverfahren für Bitumen

2.4.1 Konventionelle Prüfverfahren

Da es verschiedene Bitumen gibt, welche je nach Zweck und Einsatzort jeweils ihre Vor- und Nachteile besitzen, ist es sinnvoll, es in unterschiedliche Klassen einzuteilen. Durch die nachfolgenden Prüfverfahren ist es möglich, eine Bitumenprobe aufgrund zum Beispiel ihrer Härte oder Streckeigenschaften in verschiedene Gruppen einzuteilen.

Ein großer Nachteil bei den konventionellen Prüfverfahren ist aber, dass das tatsächliche Gebrauchsverhalten nur über Erfahrungen abschätzbar wird.

Zu diesen Prüfungen zählen die Nadelpenetration, der Erweichungspunkt Ring und Kugel, der Brechpunkt nach Fraaß, die Kraft-Duktilität und die Elastische Rückstellung. Da diese Versuche während dieser Arbeit nicht zur Anwendung kamen, werden sie hier auch nicht weiter erläutert. [5]

2.4.2 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren

Im Gegensatz zu den konventionellen Prüfmethoden haben die Gebrauchsverhaltensorientierten Prüfverfahren (GVO) den großen Vorteil, dass sie eine Aussage über das Gebrauchsverhalten von Bitumen im Asphalt treffen können. Diese Versuche wurden speziell darauf ausgelegt, die Proben möglichst genauso zu beanspruchen, wie es im eingebauten Asphalt geschieht. Die Versuche werden bei den Temperaturen durchgeführt, welche auch bei den zu erwarteten Schäden auftreten. [1]

Außerdem werden bei den GVO Prüfverfahren sowohl das Originalbitumen getestet, als auch kurz- und langzeitgealterte Proben. Zu den Prüfverfahren zählen das Rotationsviscosimeter, der Biegebalkenrheometer, der Direkte Zugversuch und das dynamische Scherrheometer. Auf letzteres wird im nachfolgenden Kapitel noch genauer eingegangen.

Durch diese Prüfmethoden erhält man für jedes Bitumen eine Gebrauchs- oder Plastizitätsspanne, in welcher das Bindemittel eingesetzt werden kann. [1]

2.4.2.1 Dynamisches Scherrheometer (DSR)

Da der Aufbau und die Funktionsweise des dynamischen Scherrheometer im Hauptteil der Arbeit noch genauer beschrieben werden, wird hier nur ein kurzer Überblick über diesen Versuch gegeben.

Bei dieser Prüfung werden der komplexe Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenverschiebungswinkel δ gemessen. Ein Prüfkörper wird wie in Abbildung 2.2 ersichtlich zwischen zwei parallele Stahlplatten gelegt, welche je nach Prüfgeometrie entweder ein oder zwei Millimeter Abstand zueinander haben. Die obere Platte beginnt mit einer konstanten Frequenz zu oszillieren, um damit das Bitumen durch eine Scherspannung zu beanspruchen. Wichtig ist hierbei, dass ein guter Verbund zwischen den Stahlplatten und dem Bitumen herrscht, da sich sonst der Prüfkörper einfach ablösen könnte. [1]

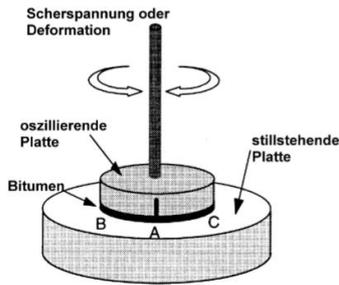


Abbildung 2.2 Arbeitsweise des DSR [1]

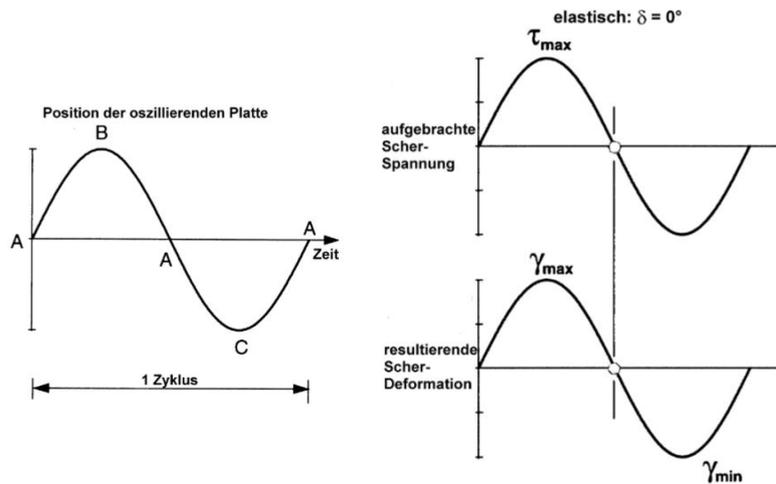


Abbildung 2.3 Spannungs- und Deformationsverlauf [1]

Der komplexe Schubmodul ist ein Maß für die Verformungsresistenz. Ist $|G^*|$ hoch, so ist die Probe schwer verformbar; ist $|G^*|$ niedrig, so ist das Bitumen leicht verformbar. Dieser Widerstand gegen Verformung kann in zwei Komponenten aufgeteilt werden: in den Realteil G' , auch Speichermodul genannt, und in den Imaginärteil G'' , auch Verlustmodul genannt.

$$G^* = G' + iG'' = \frac{\tau}{\gamma}$$

τ ...aufgebrachte Scherspannung

γ ...aufgebrachte Scherdeformation

Mithilfe des Phasenverschiebungswinkels kann man feststellen, ob sich der Prüfkörper eher elastisch oder viskos verhält (in Abbildung 2.3 dargestellt). Sollte δ bei 0° liegen, ist die getestete Substanz ideal elastisch, und es handelt sich hier um einen idealen Festkörper. Wenn δ bei 90° liegt, ist es ideal viskos, und damit eine ideale Flüssigkeit. Bitumen als auch Mastix ist viskoelastisch, und liegt deswegen immer zwischen 0 und 90° .

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360^\circ$$

δ ...Phasenverschiebungswinkel [δ]

Δt ...Zeitverschiebung zwischen τ_{\max} und γ_{\max} [s]

t...Zeit für eine Schwingung [s]

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

t...Zeit für eine Schwingung [s]

f...Frequenz [Hz]

Mit dem dynamischen Scherrheometer können zwei verschiedene Verhalten des Bindemittels untersucht werden: Einerseits die Verformungsresistenz bei hohen Temperaturen (z.B. Spurrinnen), und andererseits die Ermüdungsresistenz bei mittleren bis niedrigen Asphalttemperaturen. Deswegen gibt es auch zwei verschiedene Prüfprogramme. [1]

2.5 Bitumenarten und Anwendungsgebiete

Je nach Anwendungsgebiet sind bestimmte Eigenschaften von Bitumen mehr oder weniger gefordert. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, gibt es auch verschiedene Bearbeitungsverfahren.

Abbildung 2.4 gibt einen kleinen Überblick über die vielen Anwendungs- und Bitumenarten:

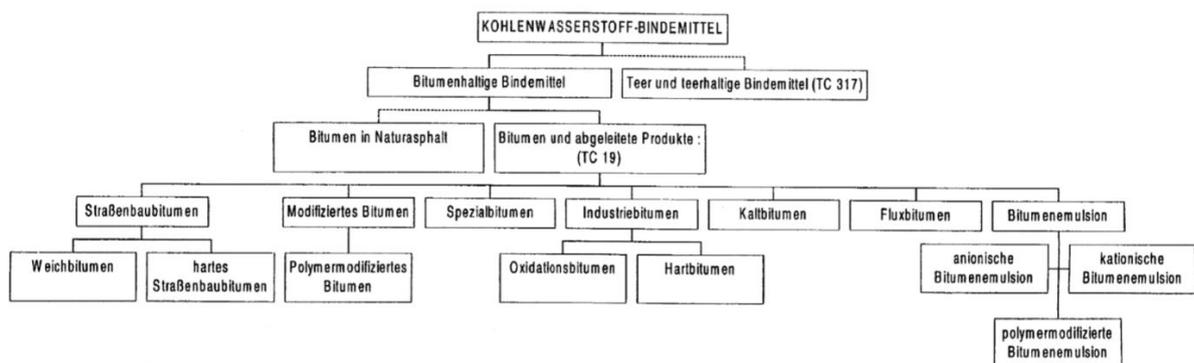


Abbildung 2.4 Übersicht über die verschiedenen Bitumenarten [13]

2.5.1 Straßenbaubitumen

Straßenbaubitumen ist laut ÖNORM EN 12597 „Bitumen zur Herstellung von Asphalt für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen“. [8] Es wird, wie schon weiter oben beschrieben, durch Destillation hergestellt. Die einzelnen Bitumensorten werden nach ihrer Eindringtiefe bei der Nadelpenetration benannt, welche zwischen 20 und 300 1/10mm liegt. In Österreich ist das Bitumen 70/100 das gebräuchlichste. [5]

2.5.2 Modifiziertes Bitumen

Modifiziertes Bitumen ist, „Bitumen, dessen rheologische Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung chemischer Zusätze modifiziert worden ist“. [8] Am meisten verbreitet ist polymermodifiziertes Bitumen (PmB), aber es gibt noch eine Reihe anderer Stoffe, mit welchen ein Bindemittel verändert werden kann. Darunter fallen unter anderem anorganische Salze wie z.B. Manganchlorid, Harze, Wachs oder auch Gummi.

Bei polymermodifiziertem Bitumen werden ca. 3-5 % Polymere meist gleich in der Raffinerie eingemischt. Dieser Zusatz bewirkt eine Erhöhung des Erweichungspunktes, wodurch eine größere Plastizitätsspanne (=Einsatzbereich) erreicht werden kann.

Für die Mischung zu Asphalt ist das bessere Haftverhalten an Gesteinskörnern erwähnenswert. Besonders große Verbesserungen zeigen vor allem elastomer- und thermoelastomermodifizierte Bitumen. [6] [14]

Die wichtigsten Polymere für die Herstellung von PmBs sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2 Wichtigste Polymergruppen für den Straßenbau [6]

PE	Polyethylen
SBS	Styrol-Butadien-Styrol
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer
EVA	Ethylen-Venylacetat-Copolymer
ACM	Ethylen-Acrylester-Copolymer

2.5.3 Industriebitumen

„Bitumen, das für andere Zwecke als zum Bau oder zur Erhaltung von Verkehrsflächen eingesetzt wird“. [8] Industriebitumen wird besonders in der Abdichtungstechnik (z.B. an Dächern) eingesetzt.

Es wird differenziert zwischen Oxidations- und Hartbitumen. Bei Ersterem wird nach der Destillation noch Luft eingeblasen, wodurch das Bitumen eine höhere Plastizitätsspanne von rund 100K bekommt, da der Erweichungspunkt nach Ring und Kugel weit höher als bei normalen Straßenbaubitumen ist. Hartbitumen ist eine Sonderform von Oxidationsbitumen, welches Eigenschaften eines harten Straßenbaubitumens besitzt. [5]

2.5.4 Bitumenemulsionen

Bitumenemulsion ist eine „Emulsion, in der die disperse Phase Bitumen ist“. [8] Das bedeutet, dass die Bitumentröpfchen mit einer kontinuierlichen Phase (Wasser) umgeben sind. Damit diese Flüssigkeit stabil gehalten werden kann, sind Emulgatoren und manchmal Stabilisatoren notwendig. Die Bitumentröpfchen sind hier zwischen 1 und 20 µm groß. [5]

Der Vorteil dieser Emulsionen ist, dass sie mit Gesteinkontakt brechen, das heißt dass sich Wasser und Bitumen trennen. Nach Abschluss des Abbindevorganges erlangt das Bindemittel seine volle Klebefähigkeit. Bitumenemulsionen werden deswegen für Oberflächenbehandlungen oder für die Verklebung von Asphaltsschichten („Vorspritzen“) verwendet.

3 Asphalt

3.1 Funktion

Die Funktion von Asphalt im Straßenbau besteht vor allem darin, die auftretenden Lasten durch Fahrzeuge sicher in den Untergrund abzuleiten. Es ist daher wichtig, dass im gesamten Aufbau keine unzulässigen Spannungen oder Verformungen entstehen, welche die Straße nachhaltig schädigen könnten. Außerdem muss während der gesamten Lebensdauer die Verkehrssicherheit gewährleistet sein, welche von der Ebenheit und von der Griffigkeit der Straße abhängt.

Dies alles kann wirtschaftlich nur dann erfüllt werden, wenn der Straßenaufbau wie in Abbildung 3.1 dargestellt schichtenweise erfolgt, und die einzelnen Teile miteinander verbunden werden, sodass sie als Ganzes statisch als Platte wirken kann.

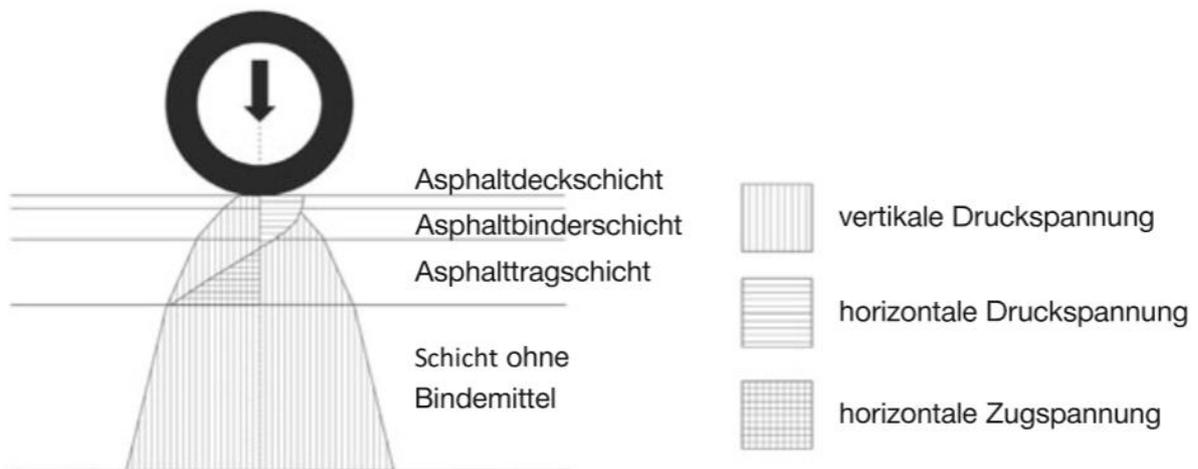


Abbildung 3.1 Aufbau Asphaltstraße [5]

Den einzelnen Schichten dieses Aufbaus kommen verschiedene Funktionen zu:

- Deckschicht: Sie dient zur direkten Aufnahme der Verkehrslasten, und muss diese an die darunterliegende Schicht weitergeben. Hier gibt es Anforderungen an die Polierbarkeit und die Griffigkeit der Oberfläche.
- Binderschicht: Die Binderschicht ist zwischen Deck- und Tragschicht angeordnet. Sie muss so ausgeführt werden, dass sowohl eine hohe Stand- als auch eine hohe Schubfestigkeit erzeugt wird. Als Bindemittel kommt meist polymermodifiziertes Bitumen zum Einsatz.
- Tragschicht: Sie soll die Verkehrslasten aufnehmen, verteilen, und in den Untergrund abtragen. Je nach zu erwartendem Verkehr kann sie stärker oder schwächer

ausfallen. Da sie nicht der Witterung und dem direkten Verkehr ausgesetzt ist, können die Qualitätsansprüche geringer ausfallen.

- Tragdeckschicht: Tragdeckschichten kommen nur im untergeordneten Straßennetz vor, da nur eine Schicht die Funktionen von Trag- als auch Deckschichten übernimmt. [5] [14]

3.2 Aufbau

Der Aufbau von Asphalt besteht im Wesentlichen aus ca. 93-96 M.-% Gestein und dementsprechend ca. 4-7 M.-% Bitumen. Je nach Art des Asphaltes können diese Werte aber variieren und noch stabilisierende Stoffe zugesetzt werden. [14]

3.2.1 Gestein

Das Gestein ist für die Lastabtragung zuständig, deswegen müssen hier hohe Qualitätsansprüche gestellt werden. Es muss eine hohe Druckfestigkeit besitzen, gegen das Wetter bzw. besonders gegen Frost beständig sein, und außerdem in Deckschichten eine ausreichende Griffigkeit aufweisen. [5]

Bei Gesteinskörnungen gibt es folgende Unterscheidungen:

Tabelle 3.1 Unterscheidungen bei Gesteinskörnungen [5]

Feinanteil:	Der feinste Anteil einer Gesteinsmischung. Er passiert auch das 0,063 mm Sieb.
Füller:	Gesteinskörnungen, welche überwiegend das 0,063 mm Sieb passieren. Es wird unterschieden in:
Fremdfüller:	Mineralischer Füller, der aus einer anderen Gesteinsmischung hergestellt wurde.
Mischfüller:	Füller mineralischen Ursprungs, der mit Calciumhydroxid gemischt wurde.
Feine Gesteinskörnung:	D ≤ 4 mm Anwendungsbereich Beton D ≤ 2 mm Anwendungsbereich Asphalt D ≤ 6,3 mm Anwendungsbereiche Schichten ohne Bindemittel
Grobe Gesteinskörnung:	d ≥ 2 mm, D ≥ 4 mm Anwendungsbereich Beton d ≥ 2 mm, D ≤ 45 mm Anwendungsbereich Asphalt d ≥ 1 mm, D > 2 mm Anwendungsbereiche Schichten ohne Bindemittel

Die unterschiedlichen Gesteinskörnungen können die Eigenschaften des Asphalts stark beeinflussen. Mit zunehmender Lagerungsdichte steigt die innere Reibung des Gemisches, was sich positiv auf die Verformungsbeständigkeit auswirkt. Hier wirkt sich ebenfalls ein hoher Anteil an gebrochenem Korn oder an Grobkorn positiv aus. [5]

Einen sehr großen Einfluss auf die Mischguteigenschaften hat der Füller. Diese Partikel bilden zusammen mit dem Bindemittel widerstandsfähige Filme, welche die Gesteinskörner

bedecken und miteinander verbinden. Bei zunehmendem Füller-Bitumen-Verhältnis steigt die Viskosität des gebildeten Mörtels an, wodurch die Festigkeit und damit auch der Verformungswiderstand erhöht werden. [5]

3.2.2 Bitumen

Die Wahl des Bindemittels beeinflusst die Gebrauchseigenschaften des Mischgutes enorm. Die Verdichtbarkeit des Asphaltes ist bei einem weichen Bitumen besser, allerdings wirkt es sich negativ auf die Verformungsbeständigkeit aus. Diese Änderung der Eigenschaften müssen für jede Asphaltsschicht ausgelotet und entschieden werden. Deswegen werden besonders in den unteren Tragschichten härtere Bitumen eingesetzt, und in den Deckschichten entweder polymermodifizierte Bindemittel oder weichere Bitumen. [5]

Der Bitumengehalt muss sehr sorgfältig ausgewählt werden, da sowohl zu viel als auch zu wenig Bindemittel schlecht für die Gebrauchseigenschaften sind. Da Bitumen eine zähe Flüssigkeit ist, kann es (wenn zu viel eingebracht wurde) zwischen den Gesteinskörnern als Schmiermittel wirken und einen großen negativen Einfluss auf den Verformungswiderstand nehmen. Außerdem benötigt Asphalt einen gewissen Hohlraumgehalt (2-6 Vol.-%), damit sich das Bitumen bei Erwärmung schadfrei ausbreiten kann. Sollte zu viel Bindemittel eingebaut sein, ist dieser notwendige Prozess womöglich verhindert und kann zu Schäden führen. Andererseits sollte aber das Bindemittel die Gesteinskörner vollständig umhüllen, um eine gute Korn-zu-Korn Haftung des Gemisches zu erreichen. [5]

Der optimale Bindemittelgehalt wird im Rahmen einer Erstprüfung im Labor ermittelt. Hier werden mehrere Mischungen mit unterschiedlichem Bitumengehalt hergestellt und anschließend geprüft. [5]

4 Probenvorbereitung, Prüfmatrix

4.1 Probenauswahl

4.1.1 Bitumen

Für alle Versuche wurde zur guten Vergleichbarkeit nur ein einziges Bitumen verwendet. Es handelt sich dabei um ein 70/100 (PG 58-28), welches als Straßenbaubitumen besonders in Deckschichten sehr oft in Gebrauch ist. In Tabelle 4.1 ist das verwendete Bitumen anhand von Prüfungsergebnissen beschrieben.

Tabelle 4.1 Eigenschaften des verwendeten Bitumen

Nadelpenetration	91 $\frac{1}{10}$ mm
Erweichungspunkt Ring und Kugel	47,0°C
Elastische Rückstellung	13 %

4.1.2 Füller

Die Versuche wurden mit fünf verschiedenen Füllern durchgeführt (Tabelle 4.2), welche jeweils entweder Kalkstein- oder Quarzmehl zuordenbar sind. Um die Kornverteilung zu ermitteln, wurden einerseits Luftstahlsiebungen nach EN 933-10 durchgeführt, und parallel dazu wurden die Korngrößen auch mittels Nasssiebung bzw. Sedigraphie festgestellt. Außerdem wurde jeder Füller mithilfe eines Röntgendiffraktometers (XRD) geprüft, welcher Aufschluss über die Mineralogie der einzelnen Proben gibt. Durch das BET-Verfahren konnten die Oberflächen ermittelt werden. Die Methoden sind in Kapitel 5.1, die Ergebnisse sind in Kapitel 6.1 beschrieben.

Tabelle 4.2 Getestete Füller

TU-Code	Sorte
F036	Kalksteinmehl
F038	Kalksteinmehl
F039	Quarzmehl
F040	Kalksteinmehl
F041	Quarzmehl

4.1.3 Mischverhältnis

Um das geeignetste Bitumen – Füller Verhältnis für die Ermüdungsversuche zu finden, wurden je sechs Amplitudensweeps mit unterschiedlichen Mischverhältnissen durchgeführt und die Abweichungen statistisch ausgewertet (Abbildung 4.1). Der Aufbau dieser Versuche ist in Kapitel 5.4.1 beschrieben.

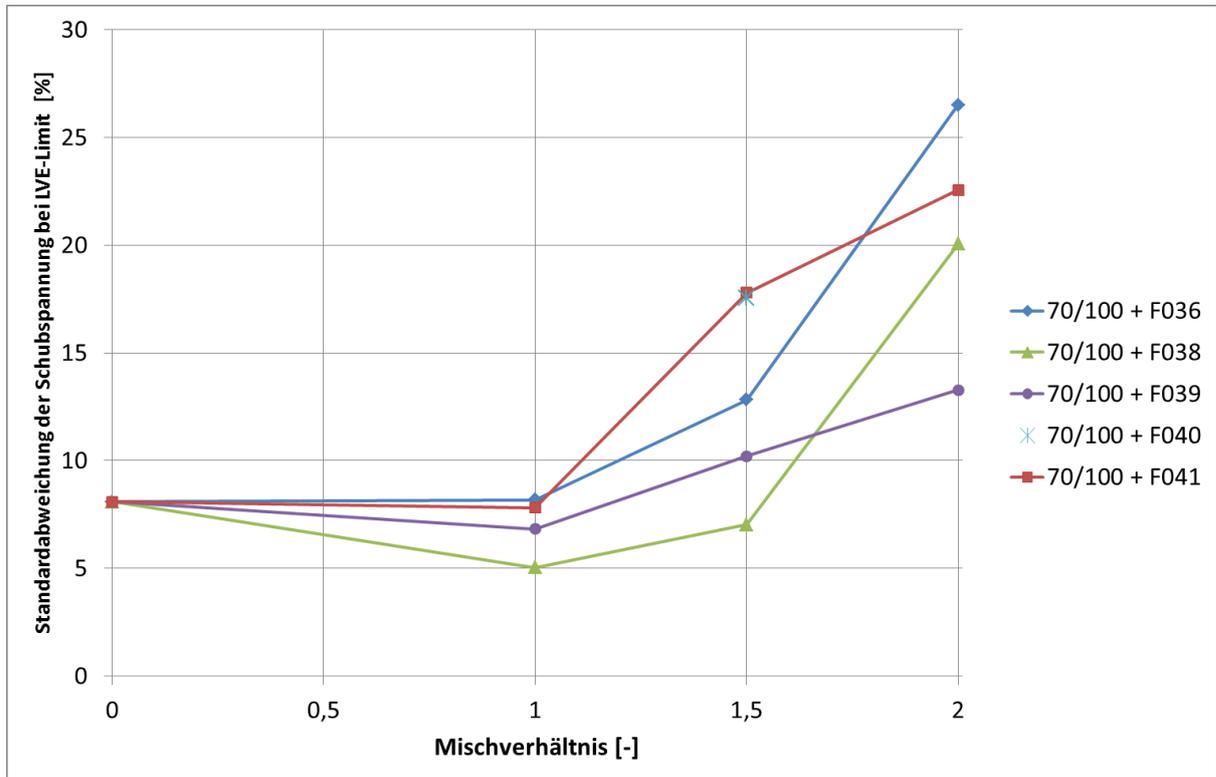


Abbildung 4.1 Standardabweichung bei unterschiedlichen Mischverhältnissen

Ursprünglich war geplant, die Ermüdungsversuche mit einem Mischverhältnis von Bitumen:Füller=1:2 durchzuführen. Dies war aber durch eine abnehmende Wiederholbarkeit nicht möglich. Da die Abweichungen der einzelnen Versuche mit dem Füllergehalt zunehmen, und dann teilweise schon bei über 25% sind, wurde ein geringerer Prozentsatz an Füller für die Mastix gewählt. Somit wurde für die Versuchsreihe ein Verhältnis Bitumen:Füller=1:1,5 verwendet.

4.2 Mischvorgang

Für die späteren Versuche mussten das Bitumen mit dem Füller zuerst zu einer homogenen Masse gemischt werden. Dazu wurden zuerst die Feinteile des Gesteins genau abgewogen, und dann für mindestens eine Stunde in den Wärmeschrank bei 180°C gestellt.

Beim Einwiegen des Bitumens wurde ein wenig mehr, als für die Mastix erforderlich erwärmt, verflüssigt und homogenisiert. Danach wurde das flüssige Bindemittel vorsichtig zu dem Füller gegossen, und dabei genau abgewogen.

Die Mastix wurde über einer Heißluftpistole so lange mit einem Glasstab gemischt, bis keine zusammenhaftenden Feinteile mehr zu erkennen waren. Durch die ständige Erwärmung der Heißluftpistole konnte verhindert werden, dass das Bitumen zu schnell auskühlt und sich wieder verfestigt.

Die fertige, homogene Mastix wurde danach sofort in den Kühlschrank gestellt, damit das Gemisch schnell auskühlt, und sich der Füller nicht absetzen kann.

4.3 Prüfmatrix

Mit dem gewählten Mischverhältnis (1:1,5) wurde mit jedem Füller eine Mastix hergestellt. Jeder Versuch wurde sechs Mal durchgeführt, einerseits um die Vergleichbarkeit zu eruieren, andererseits um etwaige Ausreißer zu erkennen und aus der statistischen Auswertung zu eliminieren. Alle Versuche wurden bei einer niedrigen Temperatur von 10°C und einer Frequenz von 30 Hz durchgeführt.

Mit jeder Mastix wurden zuerst Tests durchgeführt, um die Schubspannung für das linear viskoelastische Limit zu ermitteln (siehe Kapitel 5.4.1). Nachdem diese Grenze bekannt war, wurden mit der zuvor ermittelten Schubspannung $\tau_{p6,LVE}$ Ermüdungstests durchgeführt. Außerdem wurden danach noch Versuche mit einer Schubspannung von $1,5 \cdot \tau_{p6,LVE}$ und $2 \cdot \tau_{p6,LVE}$ gemacht (siehe Tabelle 4.3).

Der Index „p6“ wird in Kapitel 5.3.1 erläutert.

Tabelle 4.3 Prüfmatrix

	LVE	$\tau_{p6,LVE}$ (290 kPa)	$1,5 \cdot \tau_{p6,LVE}$ (435 kPa)	$2 \cdot \tau_{p6,LVE}$ (580 kPa)
F036	6x	6x	6x	6x
F038	6x	6x	6x	6x
F039	6x	6x	6x	6x
F040	6x	6x	6x	6x
F041	6x	6x	6x	6x

Das ergibt eine Gesamtanzahl von 120 Versuchen.

5 Prüfablauf

5.1 Füllerprüfungen

5.1.1 Bestimmung der Dichte nach EN 1097-7

Die EN 1097-7 beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des Volumens einer Probe. Das Prinzip dieses Vorganges basiert auf der Verdrängung von Wasser durch die Messprobe. In einem Pyknometer wird zuerst die Probe eingewogen, und danach mit Wasser aufgefüllt. Sobald auch die Masse bekannt ist, kann so auf die Dichte der Probe geschlossen werden.

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_1}}$$

m_0 ... Masse des leeren Pyknometers, einschließlich Stopfen [g]

m_1 ... Masse des Pyknometers mit der Messprobe [g]

m_2 ... Masse des Pyknometers mit Messprobe und Prüfflüssigkeit [g]

V ... Volumen des Pyknometers [ml]

ρ_1 ... Dichte der Prüfflüssigkeit [Mg/m³]

ρ_f ... Dichte des Füllers [Mg/m³] [15]

5.1.2 Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach EN 1097-4 (Ridgen)

Das Volumen des Füllers muss zuvor nach EN 1097-7 bestimmt werden. Danach kann der Füller mithilfe eines Verdichtungsgeräts verdichtet werden. Durch eine Schichtenhöhenmessung kann das Volumen des verdichteten Füllers, und damit auch der Hohlraumgehalt bestimmt werden. [16]

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

v ... Hohlraumgehalt [%]

m_2 ... Masse des verdichteten Füllers [g]

α ... Innendurchmesser der Bohrung im Fallblock [mm]

ρ_f ... Dichte des Füllers [Mg/m³]

h ... Höhe des verdichteten Füllers [mm]

5.1.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung

5.1.3.1 Luftstrahlsiebung

Die Korngrößenbestimmung mittels Luftstrahlsiebung wird in der EN 933-10 geregelt. Bei diesem Verfahren wird der Füller mithilfe von Sieben mit einer Nennöffnungsweite von 0,063 mm, 0,125 mm und 2 mm in mehrere Kornklassen unterteilt. Die Masse des Durchganges wird als prozentualer Wert auf die Masse des Ausgangswertes bezogen. [17]

5.1.3.2 Nasssiebung

Bei Proben mit einer Korngröße von 0,002 mm bis 2 mm wird eine Nasssiebung durchgeführt. Diese ist besonders von Vorteil, wenn die Probe zur Agglomeration neigt. Dazu wird der Siebvorgang durch eine Wasserspülung unterstützt. Die Probenrückstände werden nach der Siebung getrocknet und abgewogen um eine Sieblinie erstellen zu können. [18]

5.1.3.3 Sedigraphie

Die Sedigraphie wird im Korngrößenbereich von weniger als 0,063 mm eingesetzt. Durch die unterschiedliche Sinkgeschwindigkeit der Teilchen in einem Gravitationsfeld kann mithilfe des Stokes'schen Gesetzes die Teilchengröße berechnet werden. [19]

$$v_p = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f)}{9 \cdot \eta}$$

v_p ... Sedimentationsgeschwindigkeit [m/s]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

r ... Radius des sinkenden Gegenstandes [m]

ρ_p ... Dichte des Partikels [kg/m³]

ρ_f ... Dichte des Fluids [kg/m³]

η ... Dynamische Viskosität des Fluids [Pa·s]
[20]



Abbildung 5.1 Sedigraph der Universität für Bodenkultur

5.1.4 Bestimmung der Mineralogie mittels Röntgendiffraktometrie

Mithilfe der Röntgendiffraktometrie kann die mineralogische Zusammensetzung von Sedimenten bestimmt werden. Dazu wird die Probe mit Röntgenstrahlen einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt, wodurch es auf der Oberfläche des Minerals zur Beugung nach dem Bragg'schen Gesetz kommt. Da alle nicht-amorphen Minerale eine bestimmte Kristallstruktur aufweisen, kann durch Messung der Gitterabstände der Netzebenen auf eine Mineralgruppe geschlossen werden.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$$

n... Beugungsordnung []

λ ... Wellenlänge der Röntgenstrahlung [m]

d... Abstand zwischen parallelen Gitterebenen [m]

θ ... Glanz- oder Braggwinkel [21]



Abbildung 5.2 XRD der Universität für Bodenkultur



Abbildung 5.3 Füllerprobe für XRD

5.1.5 Bestimmung der Oberflächengröße mittels BET-Verfahren

Mithilfe des BET-Modells (benannt nach ihren Entdeckern Brunauer, Emmett und Teller) kann die spezifische Oberfläche [m^2/g] von porösen Feststoffen berechnet werden. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip der Gasadsorption. Ein Gas (hier Stickstoff) wird zu dem zu untersuchenden Material geleitet. Je nach Menge des verbrauchten Gases um die Feststoffpartikel vollständig durch Adsorption zu umhüllen, kann die spezifische Oberfläche ermittelt werden. [22] [23]

5.2 Mastixprüfung – Dynamisches Scherrheometer

Für diese Versuchsreihe wurde das dynamische Scherrheometer MCR300 SP von der Firma Anton Paar GmbH verwendet.



Abbildung 5.4 Dynamisches Scherrheometer



Abbildung 5.5 Platte-Platte Sensor

Die Versuche wurden mit dem Platte-Platte Sensor durchgeführt. Hierbei sind die obere und die untere Platte eben und parallel (im Gegensatz zum Platte-Kegel Sensor, bei welchem der obere Teil kegelförmig zur Mitte hin verjüngt). Der große Vorteil dieses Systems ist, dass sich kein Füllerpartikel in der Mitte verkeilen und damit ungenaue Messergebnisse liefern kann.

Die Versuche wurden im „Controlled Stress“ Modus durchgeführt. Hierbei wird die Schubspannung vorgegeben, und die daraus resultierende Verformung gemessen. Die Berechnung des komplexen Schubmoduls und des Phasenverschiebungswinkels wird automatisch durch den angeschlossenen Computer mithilfe der nachfolgenden Formeln durchgeführt. [1]

$$\tau = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot r^3}$$

τ ...Scherspannung [Pa]

M...maximal aufgebrachtes Drehmoment [Nm]

r...Plattenradius [m]

$$\gamma = \frac{\alpha \cdot r}{h}$$

γ ...Deformation []

α ...Verdrehwinkel [rad]

r ...Plattenradius [m]

h ...Messspalt [m]

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

G^* ...komplexer Schubmodul [Pa]

τ_{max} ...Spannung [Pa]

γ_{max} ...Deformation []

5.3 Versuchsvorbereitung

5.3.1 Geometrie des Probekörpers

Die Proben bei einem dynamischen Scherrheometer haben je nach Steifigkeit einen Durchmesser von 25 oder 8 mm. Aufgrund der hohen Steifigkeit der Mastix (bei 10°C) wurde in dieser Versuchsreihe ein Sensor mit 8 mm Durchmesser verwendet. Die Notwendigkeit hierfür ergab sich aus dem begrenzten maximalen Drehmoment des Rheometers. Im Gegensatz zu der in den SHRP Richtlinien vorgegebenen Höhe von 2 mm beträgt die Höhe des Probekörpers bei diesen Tests 3 mm. Noch höhere Probekörper sind wegen einer möglichen unzureichenden Temperierung nicht sinnvoll.

Ein großes Problem bei den Ermüdungsmessungen des DSR ist das Abscheren der Probe an der oberen oder unteren Metallplatte. Da in diesem Fall aber der Verbund zwischen Platte und Probe getestet wird, und nicht (wie gewünscht) die Kohäsion in der Mastix selbst, ist der Versuch nicht bzw. nur zum Teil aussagekräftig. Abbildung 5.7 und Abbildung 5.6 zeigen jeweils einen Adhäsions- und einen Kohäsionsbruch. Um dieses Problem zu lösen, wurde der zylindrische Probekörper mit einer Einschnürung versehen, an welcher der Bruch stattfinden soll.

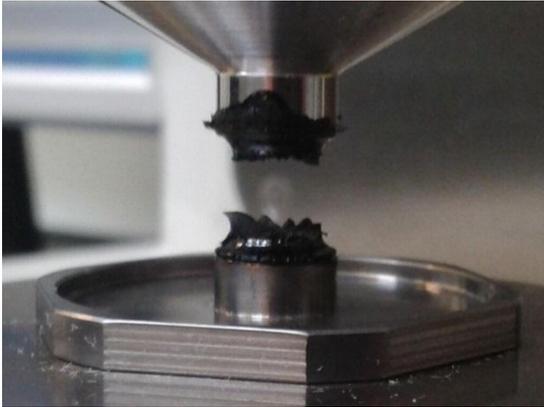


Abbildung 5.6 Bruch innerhalb des Probekörpers - Kohäsionsbruch



Abbildung 5.7 Bruch oberhalb des Probekörpers - Adhäsionsbruch

Diese Einschnürung in der Mitte ist allerdings nur mit speziellen Probekörperformen möglich. Diese sind aus Silikon gegossen, wodurch sie hitzebeständig und biegsam sind. Für diese Untersuchungen standen vier verschiedene Silikonförmchen mit verschiedenen großen Einschnürungen zur Auswahl. Die Einschnürungen beliefen sich auf 0,5-2 mm. Durch die Spannungskonzentration bei der Einschnürung des Probekörpers (Querschnitt-Durchmesser 6-7,5 mm) tritt genau an dieser Stelle der Bruch auf.

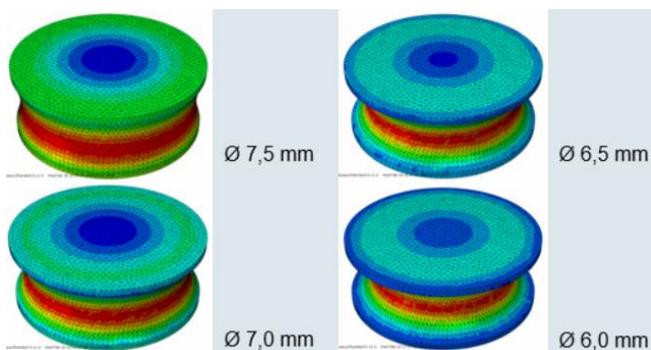


Abbildung 5.8 Spannungen in den verschiedenen Probekörpern

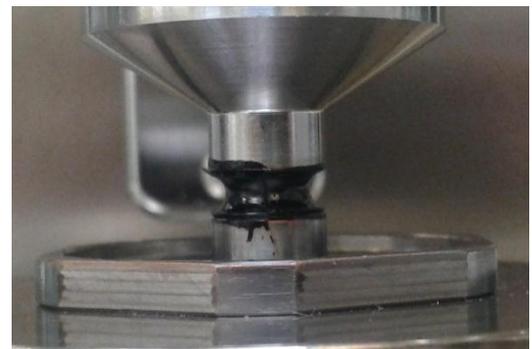


Abbildung 5.9 Fertiger Probekörper mit Einschnürung

Bei diesen Versuchen wurde schließlich die 6 mm Probekörperform (2 mm Einschnürung) verwendet, da bei dieser Form der Riss *immer* innerhalb der Mastix stattfand.

Abbildung 5.8 zeigt die Finite Elemente Modellierung der verschiedenen Silikonformen mit einer parabolischen Einschnürung. Die Spannungen sind bei der Einschnürung in der Mitte des Probekörpers am höchsten. Außerdem ist die geringe Spannung am Rand gut zu erkennen. An dieser Stelle könnte es durch den Einbau der Mastix in das Rheometer zu Beeinflussungen und damit zu Verfälschungen der Ergebnisse kommen, falls sich der Probekörper ablösen sollte. Da die Spannungen an dieser Stelle aber sehr gering sind, ist dieser Einflussfaktor als gering einzuschätzen und damit vernachlässigbar. In Abbildung 5.9 ist ein fertiger Probekörper mit Einschnürung zu sehen.

Durch die Einschnürung ist der von der verwendeten Software (US200) berechnete komplexe Schubmodul $|G^*|$ mithilfe der Formeln aus 5.2 falsch, da der Computer mit einem vollen zylindrischen Probekörperdurchmesser von 8 mm rechnet, die Mitte des Probekörpers aber nur einen Durchmesser von 6 mm besitzt. Um trotzdem mit den Ergebnissen des Computers rechnen zu können, wurden Indizes eingeführt. Der Index „p6“ steht für die *parabolische* Einschnürung der 6 mm Form. Die durch diese Versuche gewonnenen Ergebnisse mit dem Index p6 sind daher nur mit Ergebnissen mit Einschnürung vergleichbar.

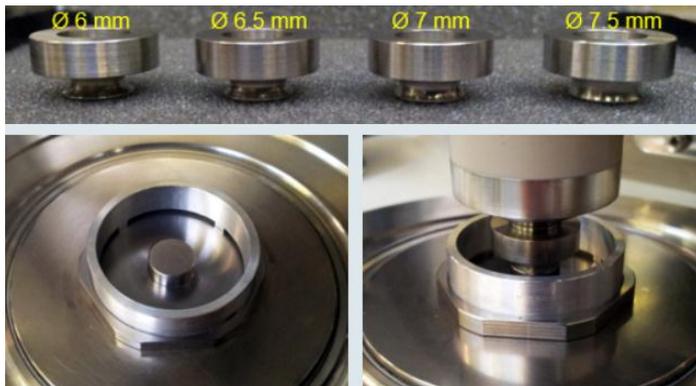


Abbildung 5.10 Formen für das Gießen der Silikonformen



Abbildung 5.11 Silikonform 6 mm

Die Silikonform wurde eingeschnitten, damit diese nach dem Eingießen der Probe und vor dem Starten des Versuchs leicht entfernt werden kann. Damit sie während des Abkühlprozesses der eingegossenen Mastix ihre Form behält, und die Geometrie des Probekörpers eingehalten wird, wurde die Form mit einem Gummiband zusammengehalten.

5.3.2 Einlegen der Probe

Zuerst muss der Messsensor des DSR auf die Prüftemperatur von 10°C abgekühlt werden, welche dann für mindestens 10 Minuten konstant gehalten werden muss. Nachdem sämtliche Prüfteile auf die Messtemperatur abgekühlt wurden, muss die Festlegung des Nullpunktes (Abstand zwischen Platte und Messsensor = 0 mm) vorgenommen werden.

Noch bei dieser Temperatur wird der Messsensor nach oben gefahren, um die Silikonform für den Probekörper einzulegen. Danach fährt der Stempel genau so weit hinunter, dass die Form nicht berührt wird (Abbildung 5.12).

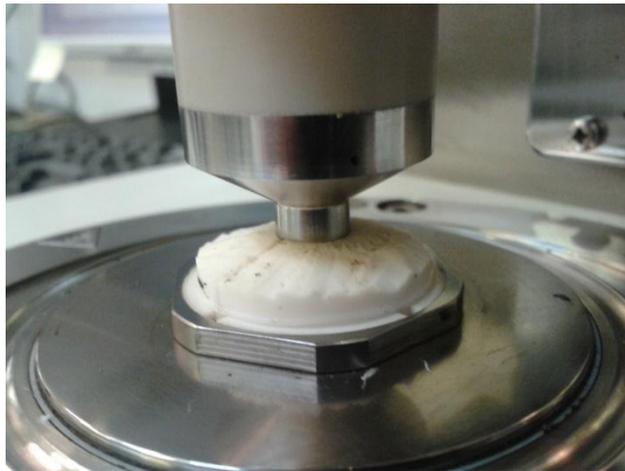


Abbildung 5.12 Silikonform mit Messsensor

Nach Einlage der Silikonform wird die Rheometertemperatur auf 125°C eingestellt. Während dieser Aufheizphase kann die Mastix ebenfalls erwärmt, verflüssigt und homogenisiert werden. Durch die Erwärmung des Silikons wird die später eingefüllte Mastix nicht so schnell erkalten und eventuell Hohlräume bilden.

Sobald das Rheometer die Temperatur von 125°C erreicht hat, kann die heiße, flüssige Mastix eingegossen werden. Der Sensor muss sofort auf die Messposition von 3 mm eingestellt werden, damit ein guter Verbund mit der erhitzten Mastix hergestellt werden kann.



Abbildung 5.13 Eingefüllte Mastix

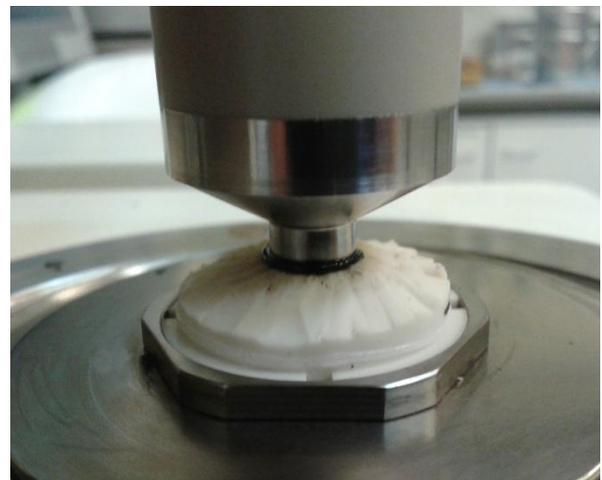


Abbildung 5.14 Eingefüllte Mastix mit Messsensor

Sobald der Sensor die erforderliche Position erreicht hat, wird die Temperatur wieder auf 10°C abgesenkt. Nach 10 Minuten Wartezeit können etwaige Überstände der Mastix mit einer kleinen Spachtel von der Silikonform getrimmt, und diese dann auch entfernt werden. Das Gummiband, welches die Silikonform zusammenhält, muss für die Entnahme der Silikonform zerschnitten werden.

Um eine konstante Temperatur im gesamten Probekörper garantieren zu können, muss abermals 10 Minuten temperiert werden. Erst nach dieser Wartezeit kann der Versuch gestartet werden.

Um sicherzustellen, dass nach Ablauf der Wartezeit die Temperatur im Probekörper auch wirklich erreicht ist, wurde diese kontrolliert. Zur Durchführung dieser Kontrolle wurden während der Probekörpervorbereitung drei Thermoelementfühler eingebaut (jeweils einer in der Probe unten, in der Mitte und oben). Die Auswertung der Daten (zu sehen in Abbildung 5.15) zeigt zu Versuchsbeginn eine konstante Temperatur von 10°C.

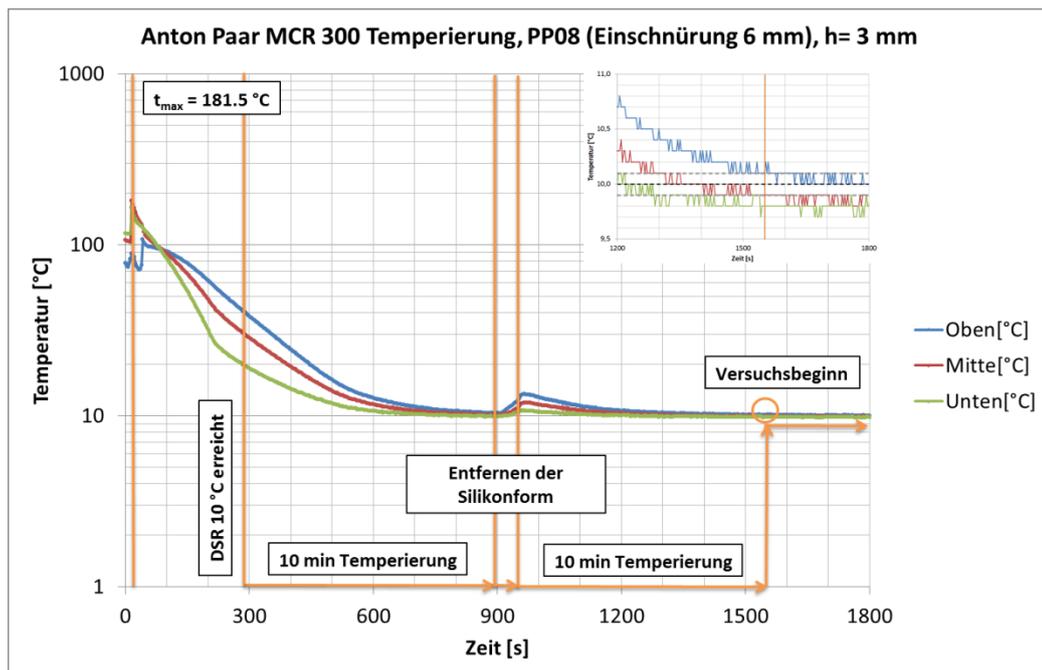


Abbildung 5.15 Temperaturmessung

Tabelle 5.1 gibt eine kurze Zusammenfassung für das Einlegen der Probe in das Rheometer.

Tabelle 5.1 Zusammenfassung für das Einlegen der Probe

10°C einstellen
10 min warten
Nullpunkt einstellen
Probekörperform einlegen
Auf 125°C erwärmen
Mastix eingießen
Auf 10°C abkühlen
10 min warten
Etwaige Mastixreste vom Gerät und der Form entfernen
Probekörper ausformen
10 min warten
Versuch starten

5.4 Versuchsablauf

5.4.1 Linear viskoelastisches Materialverhalten

Die viskoelastischen Parameter, wie zum Beispiel der komplexe Schubmodul und der Phasenverschiebungswinkel sind nur bei linear viskoelastischen (LVE) Bedingungen definiert. Deshalb müssen die Lastzyklen im LVE-Bereich stattfinden, in welchem das Verhältnis von Spannung und Dehnung nur von der Temperatur und Frequenz, nicht aber von der Höhe der aufgetragenen Belastung abhängt. Der komplexe Schubmodul ist innerhalb dieses Bereiches (nahezu) konstant. Abbildung 5.16 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung innerhalb des LVE-Bereichs.

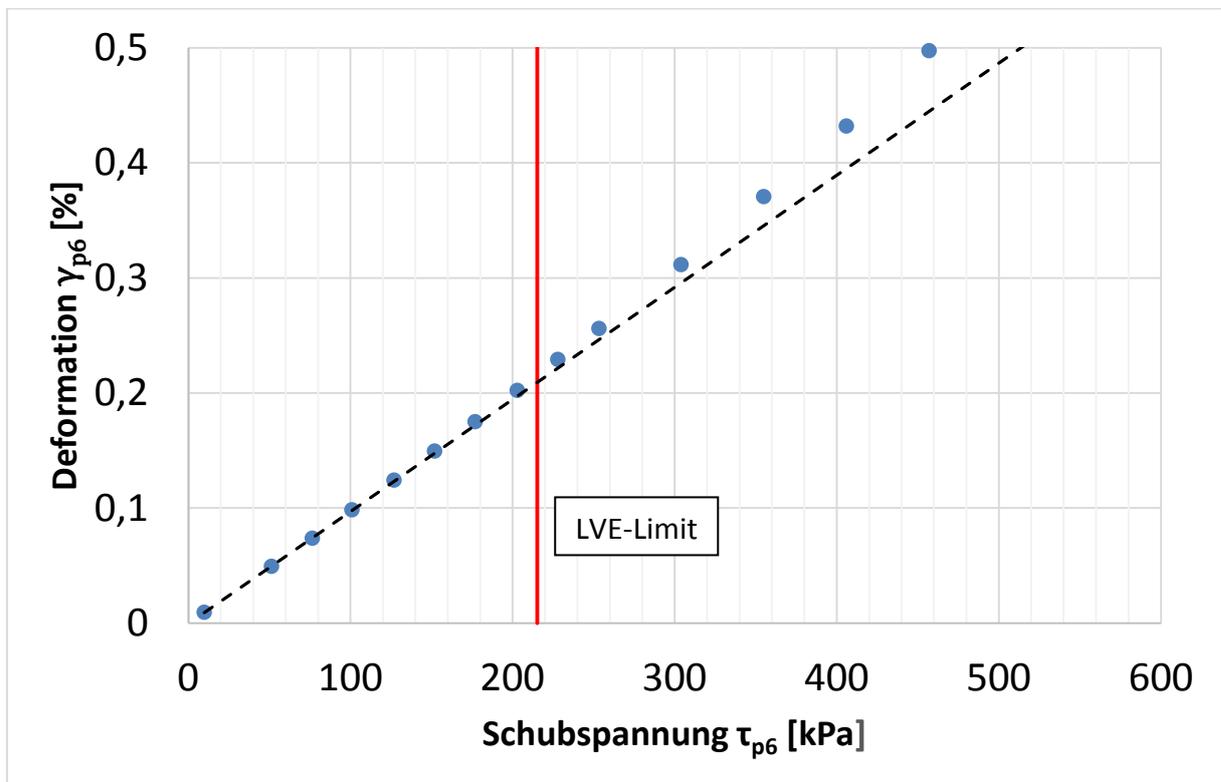


Abbildung 5.16 LVE-Limit: Linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung

Dieser Bereich wird durch eine prozentuelle Reduktion des ursprünglichen komplexen Schubmoduls $|G^*|$ ermittelt. In der SHRP Studie wird dieser Grenzwert mit 95% des $|G^*|$ angegeben bzw. festgelegt. [24]

Um diese Grenze zu ermitteln, wurde ein Amplitudensweep durchgeführt, bei welchem sich die Schubspannung stetig von 10 kPa bis 600 kPa erhöht (siehe Tabelle 5.2). Um eine Veränderung der Messwerte durch vorzeitige Schädigung infolge hoher Schubspannung zu verhindern, wurde der Probekörper nicht durchgehend durch Oszillation beansprucht.

Tabelle 5.2 Stufen des Amplitudensweeps

Schubspannung τ_{p6} [kPa]	Frequenz f [Hz]	Temperatur T [°C]	Messpunkte [-]
10	30	10	2
50	30	10	2
75	30	10	2
100	30	10	2
125	30	10	2
150	30	10	2
175	30	10	2
200	30	10	2
225	30	10	2
250	30	10	2
300	30	10	2
350	30	10	2
400	30	10	2
450	30	10	2
500	30	10	2
550	30	10	2
600	30	10	2

Das Ergebnis eines solchen Tests ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Es zeigt die Reduktion des komplexen Schubmoduls mit steigender Schubspannung. Da das LVE-Limit bei 95% des $|G^*|$ erreicht ist, kann an dieser Stelle die Schubspannung für die Ermüdungsprüfung abgelesen werden.

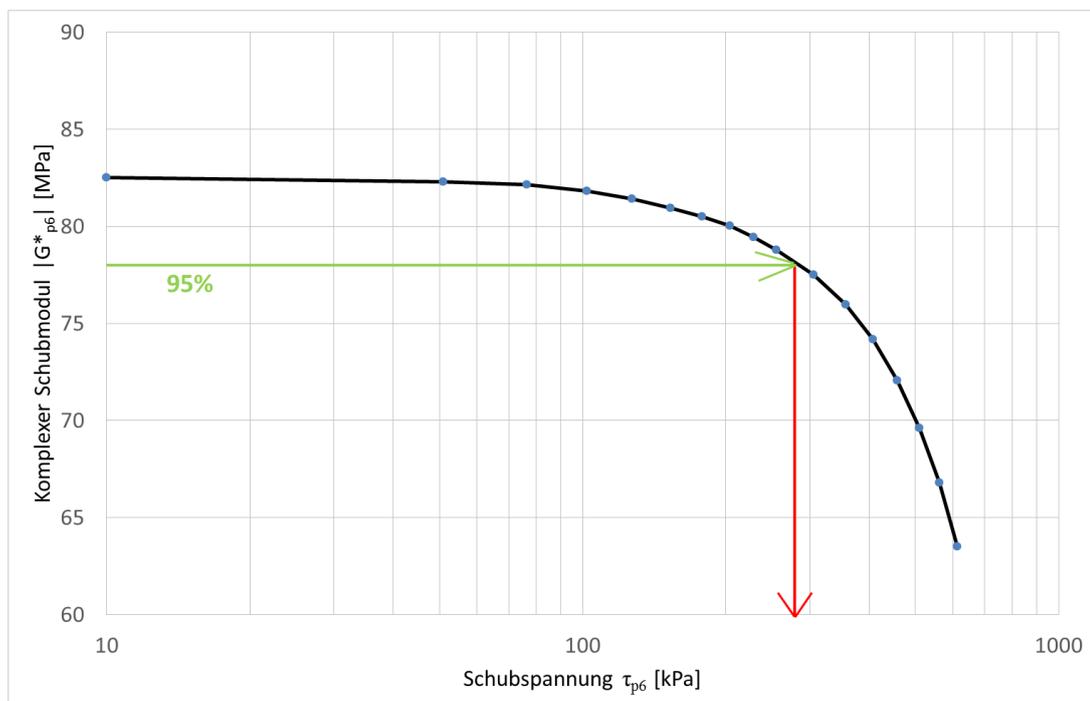


Abbildung 5.17 Amplitudensweep zur Ermittlung des LVE Limits

Dieser Versuchsablauf wurde für jede Probe sechs Mal durchgeführt, was bei fünf Proben zu insgesamt 30 Versuchen führt. Danach wurde für jede Probe der Mittelwert der Schubspannung beim LVE-Limit berechnet.

Tabelle 5.3 LVE Versuchsergebnisse

F036	G^*_{p6} [MPa]	0,95 G^*_{p6} [MPa]	0,95 τ_{p6} [kPa]
Versuch #1	97,24	92,38	218,68
Versuch #2	89,00	84,55	312,95
Versuch #3	89,09	84,64	291,01
Versuch #4	80,61	76,58	319,22
Versuch #5	88,60	84,17	307,44
Versuch #6	85,74	81,45	280,99
Mittelwert	88,38	83,96	288,38

F038	G^*_{p6} [MPa]	0,95 G^*_{p6} [MPa]	0,95 τ_{p6} [kPa]
Versuch #1	106,20	100,89	321,58
Versuch #2	99,64	94,66	292,76
Versuch #3	103,55	98,37	277,74
Versuch #4	102,91	97,76	283,19
Versuch #5	96,42	91,60	279,44
Versuch #6	98,32	93,40	323,17
Mittelwert	101,17	96,11	296,31

F039	G^*_{p6} [MPa]	0,95 G^*_{p6} [MPa]	0,95 τ_{p6} [kPa]
Versuch #1	74,83	71,09	264,60
Versuch #2	82,06	77,96	289,86
Versuch #3	82,52	78,39	270,92
Versuch #4	75,26	71,50	261,62
Versuch #5	77,88	73,99	306,14
Versuch #6	94,22	89,51	337,71
Mittelwert	81,13	77,07	288,48

F040	G^*_{p6} [MPa]	0,95 G^*_{p6} [MPa]	0,95 τ_{p6} [kPa]
Versuch #1	103,20	98,04	246,52
Versuch #2	101,91	96,81	274,87
Versuch #3	112,51	106,88	243,86
Versuch #4	104,45	99,23	336,46

Versuch #5	110,80	105,26	233,38
Versuch #6	98,99	94,04	345,47
Mittelwert	105,31	100,04	280,09

F041	G^*_{p6} [MPa]	0,95 G^*_{p6} [MPa]	0,95 τ_{p6} [kPa]
Versuch #1	98,72	93,78	304,47
Versuch #2	103,55	98,37	219,26
Versuch #3	111,00	105,45	322,86
Versuch #4	105,25	99,99	215,25
Versuch #5	107,60	102,22	274,75
Versuch #6	111,05	105,50	322,93
Mittelwert	106,19	100,89	276,59

Aus Tabelle 5.3 ist ein leicht schwankender Mittelwert der Schubspannung (ca. 290 kPa) ersichtlich. Um aber die Vergleichbarkeit der Ermüdungsversuche zu garantieren, wurde als Belastung stets dieser Mittelwert aufgebracht.

5.4.2 Ermüdungsversuche

Bei Ermüdungsprüfungen wird eine Belastung so lange wiederholt aufgebracht, bis ein Versagen bzw. ein Bruch des Probekörpers auftritt. Diese Versuche wurden ebenfalls im Controlled Stress Modus durchgeführt. Das Ergebnis des komplexen Schubmoduls und des Phasenverschiebungswinkels sieht qualitativ immer gleich aus.

Man kann zwischen drei Phasen des $|G^*|$ unterscheiden:

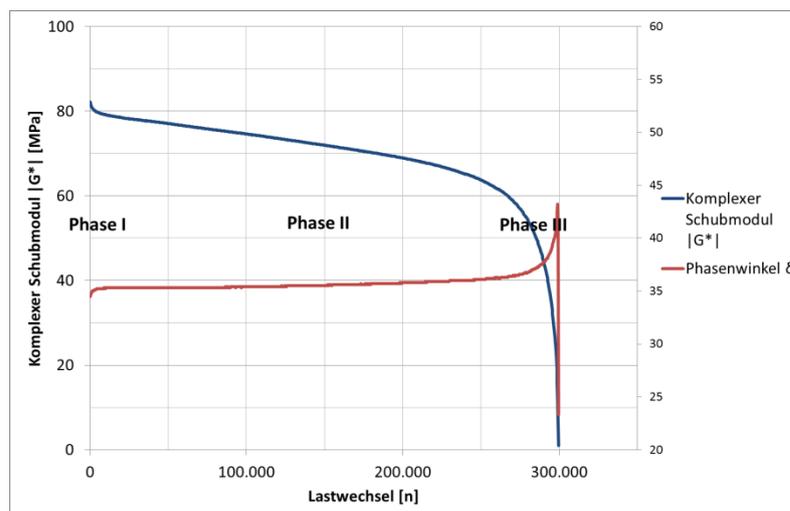


Abbildung 5.18 Typischer Ermüdungsversuch

Phase I ist durch einen besonders starken Abfall des komplexen Schubmoduls charakterisiert. Dieser schnelle Verlust des Verformungswiderstandes ist nicht nur durch Ermüdung zu erklären, sondern auch durch Erwärmung des Probekörpers aufgrund von freigegebener Energie zu Anfang des Versuchs. Da Bitumen mit höherer Temperatur weicher wird, sinkt der Verformungswiderstand ab. [3] [25]

Ein weiterer Grund für den schnellen $|G^*|$ -Abfall ist Thixotropie. Thixotropie ist der konstante Abfall der Viskosität bei Aufbringung einer Scherbelastung auf eine Probe. Dieser Vorgang ist zumindest teilweise reversibel, d.h. während die Belastung pausiert, kann die Viskosität zeitabhängig wiederhergestellt werden. [26]

Der Phasenverschiebungswinkel δ verhält sich spiegelverkehrt zum komplexen Schubmodul, d.h. in Phase I steigt er zuerst einmal rapide an.

In *Phase II* ist der Abfall des $|G^*|$ wesentlich geringer, der Funktionsgraph ist beinahe linear. Der Phasenverschiebungswinkel δ steigt im Vergleich zu Phase I geringer an. In dieser Phase ist die Ermüdung mittels Mikro-Rissen vorherrschend.

Phase III entspricht dem Zusammenschluss und der Ausbreitung der Mikro-Risse zu Makro-Rissen bis zum vollständigen Bruch des Probekörpers. Die Prüfung kann in dieser Phase nicht mehr als homogen angesehen werden. Meistens wird der Ermüdungsbruch durch einen Verlust von 50% des Anfangs - $|G^*|$ definiert. Der Phasenverschiebungswinkel steigt durch die Makrorisse im Probekörper noch einmal stark, um dann beim Bruch schlagartig abzusinken. [25]

Bei diesen Prüfungen wurde, wie in Tabelle 5.4 ersichtlich, jeder Füller mit den Schubspannungen von 290 kPa (LVE-Limit), 435 kPa (LVE-Limit *1,5) und 580 kPa (LVE-Limit *2) belastet. Das Ende des Versuchs wurde beim vollständigen Bruch des Probekörpers angenommen.

Tabelle 5.4 Übersicht der Ermüdungsversuche

Füller	Temperatur	Schubspannung τ_{p6}	Anzahl
F036	10°C	290 kPa	6x
F036	10°C	435 kPa	6x
F036	10°C	580 kPa	6x
F038	10°C	290 kPa	6x
F038	10°C	435 kPa	6x
F038	10°C	580 kPa	6x
F039	10°C	290 kPa	6x
F039	10°C	435 kPa	6x
F039	10°C	580 kPa	6x

F040	10°C	290 kPa	6x
F040	10°C	435 kPa	6x
F040	10°C	580 kPa	6x
F041	10°C	290 kPa	6x
F041	10°C	435 kPa	6x
F041	10°C	580 kPa	6x

6 Ergebnisse & Interpretation

6.1 Ergebnisse der Füllerprüfungen

Durch die Luftstrahl- und Nasssiebung und der Sedigraphie ließ sich die Korngröße der Füller bestimmen. Bei den sehr kleinen Korngrößen (<0,0063 mm) zeigen sich kaum Unterschiede bei den verschiedenen Füllern, allerdings kann zwischen 0,0063 und 0,2 mm vor allem beim F039 auf größere Partikel geschlossen werden. Im Gegensatz dazu sind bei der Nasssiebung alle Körner des F041 kleiner als 0,063 mm. Dieses Produkt wird aber nicht für die Asphaltherstellung verwendet. In Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 sind die Korngrößenverteilungen der Füller ersichtlich. Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse aus der Dichte- und der Hohlraumbestimmung.

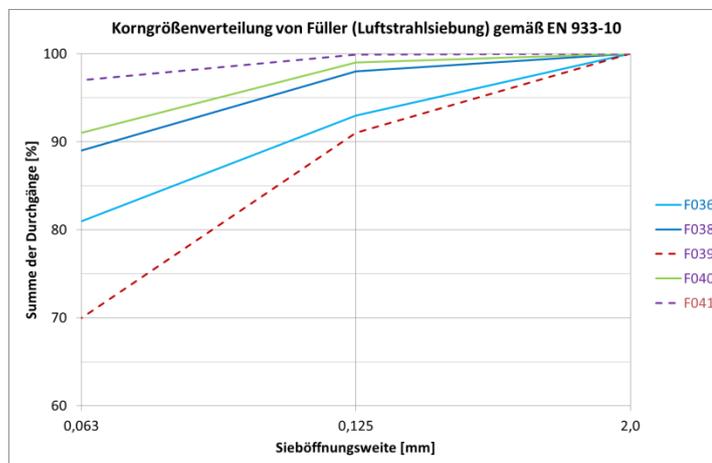


Abbildung 6.1 Kornverteilung durch Luftstrahlsiebung (EN 933-10)

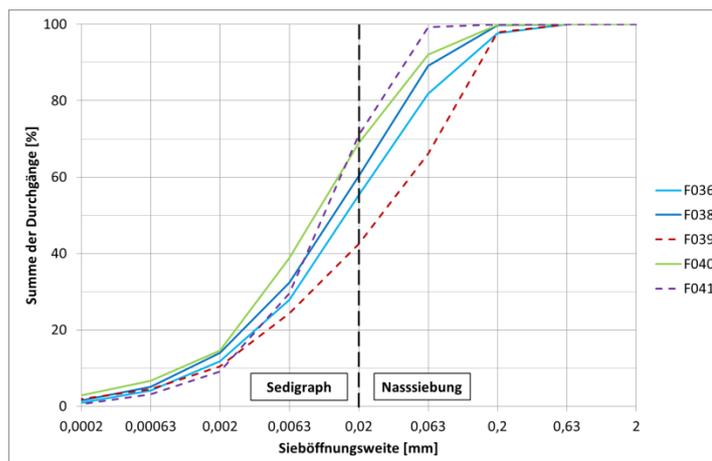


Abbildung 6.2 Korngrößenverteilung durch Sedigraph (<0,02 mm) und Nasssiebung (>0,02 mm)

Tabelle 6.1 Zusammenfassung der Eigenschaften der Füller

TU-Code	Sorte	Dichte ρ [g/cm ³] EN 1097-7	Ridgen V [V.-%] EN 1097-4
F036	Kalksteinmehl	2,79	34,1
F038	Kalksteinmehl	2,75	33,2
F039	Quarzmehl	2,70	32,7
F040	Kalksteinmehl	2,75	33,6
F041	Quarzmehl	2,65	38,9

Durch die Röntgendiffraktometrie wurde die mineralogische Zusammensetzung der Füller untersucht. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt. Die Kalksteinmehle (F036, F038 und F040) haben alle einen Karbonatanteil von $\geq 90\%$ und sind somit eindeutig dem Kalkstein zuordenbar. Das Quarzmehl von Carl Roth hat ebenfalls die zu erwartende Mineralogie, und besteht zu 99 % aus Quarz. Die anderen Bestandteile sind nur in Spuren vorhanden. Eine größere Überraschung gab es beim Füller F039. Hier konnten nur 22 % Quarzanteile festgestellt werden, während Kalzit und Dolomit (=Karbonate) zusammen auf 56 % kommen. Daher ist es eigentlich nicht mehr als Quarzmehl einzustufen.

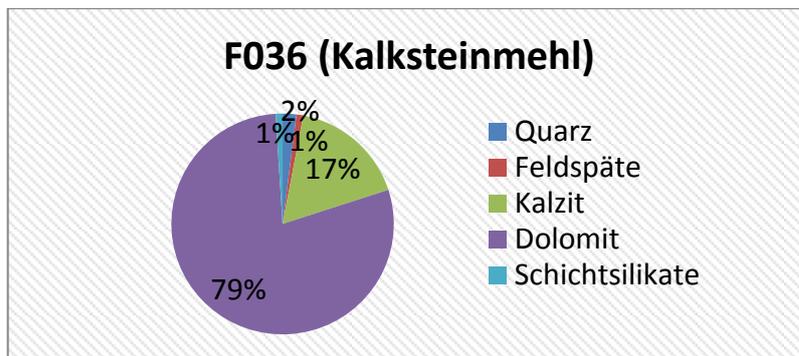


Abbildung 6.3 Mineralogie F036 (mittels XRD)

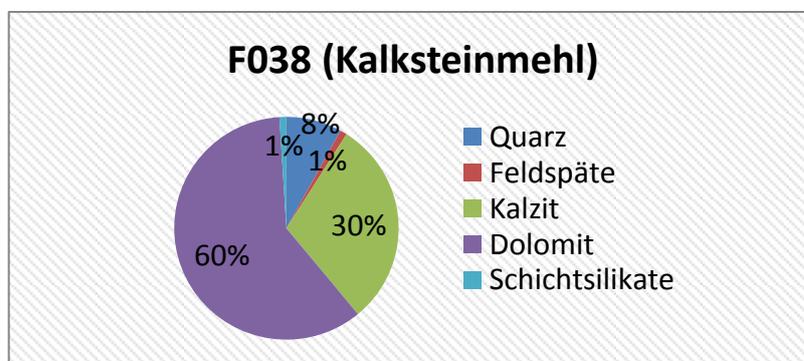


Abbildung 6.4 Mineralogie F038 (mittels XRD)

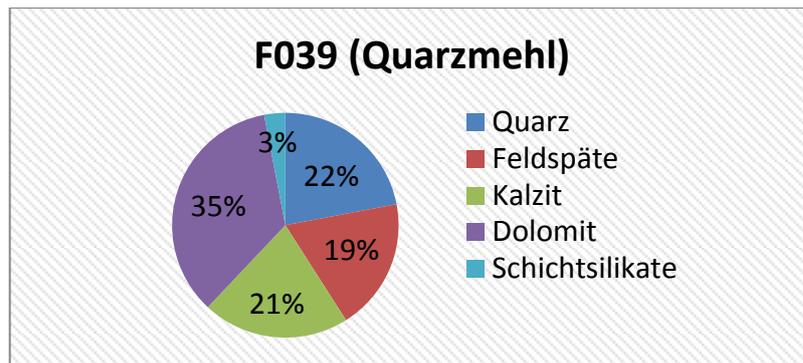


Abbildung 6.5 Mineralogie F039 (mittels XRD)

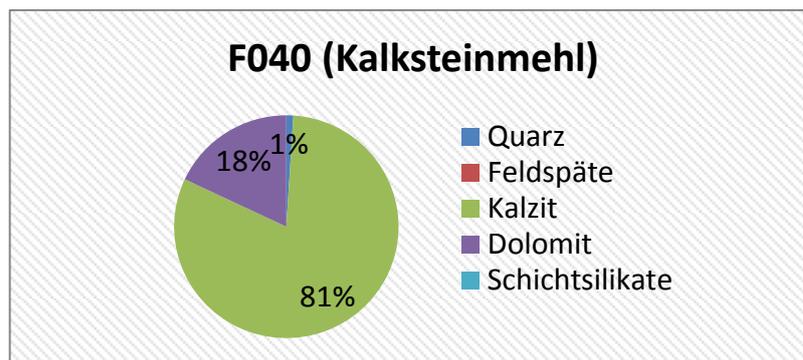


Abbildung 6.6 Mineralogie F040 (mittels XRD)

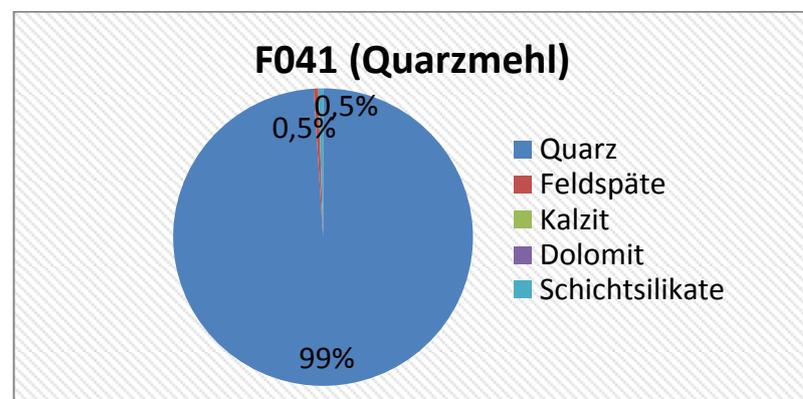


Abbildung 6.7 Mineralogie F041 (mittels XRD)

Das BET-Verfahren lieferte kaum Überraschungen. Die Füller F036-F040 besitzen annähernd dieselbe Oberfläche, einzig das Quarzmehl F041 zeigt hier ein anderes Ergebnis, welches allerdings für Quarzmehl normal ist.

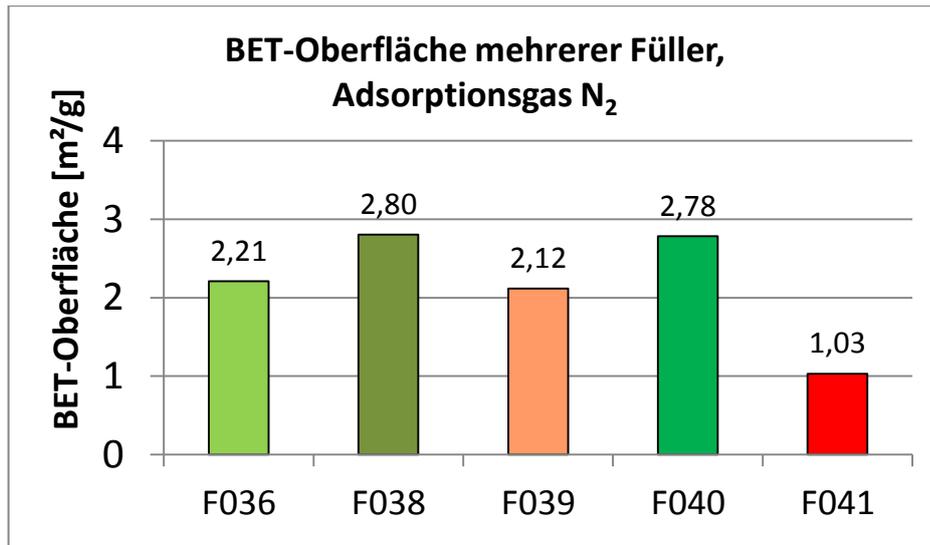


Abbildung 6.8 BET-Oberfläche

6.2 Mastixversuche - Wiederholbarkeit

Da sämtliche Ermüdungsversuche pro Füller und Laststufe sechs Mal durchgeführt wurden, konnte eine gute Wiederholbarkeit festgestellt werden. In Abbildung 6.9 sind die Prüfungen von F041 abgebildet. Sowohl bei 580 kPa als auch bei 290 kPa gab es je einen Ausreißer, welcher aus der statistischen Auswertung entfernt wurde. Alle anderen Ergebnisse haben eine geringe Varianz.

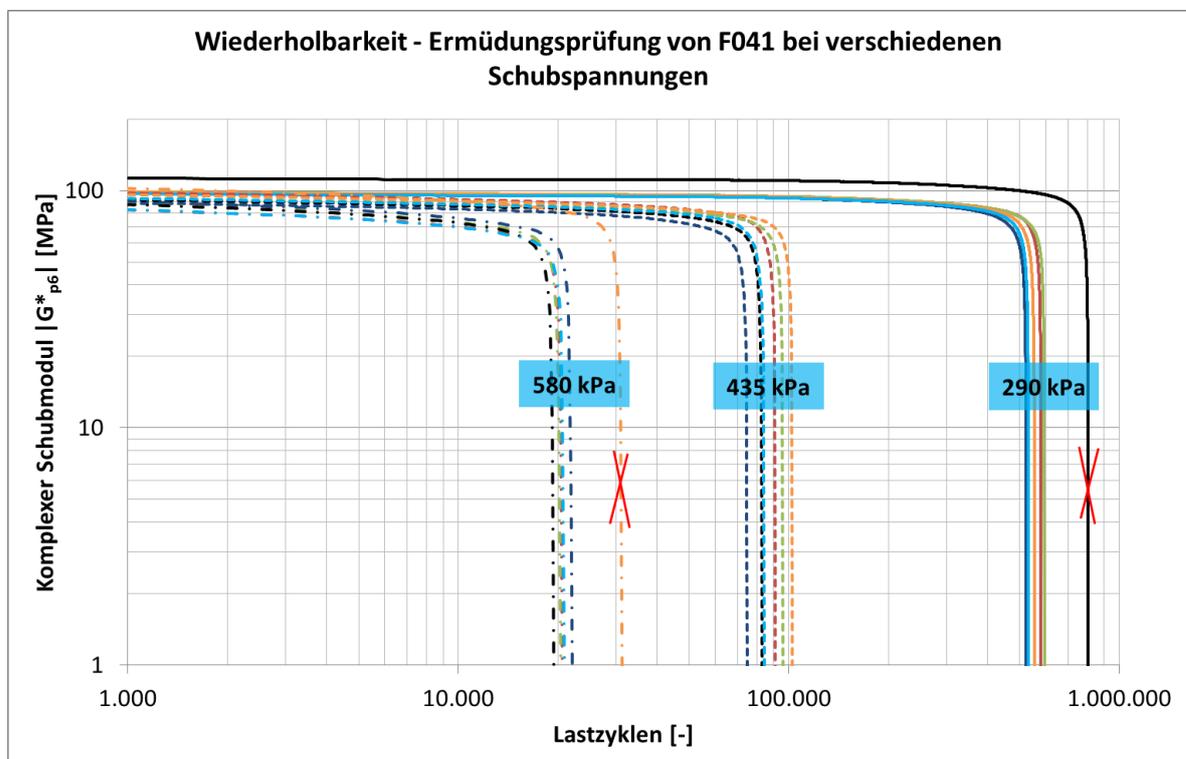


Abbildung 6.9 Ermüdungsprüfung von F041 bei 290, 435 und 580 kPa

Bei jeder Schubspannung wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichungen liegen bei jeder Laststufe zwischen 5 und 19 %. Aufgrund der geringen Streuung der Ergebnisse kann auch von einem geeigneten Versuchsaufbau gesprochen werden, welcher für diese Mastixprüfungen entwickelt wurde.

6.3 Mastixversuche - Zusammenhang Lastzyklen - aufgebrachte Schubspannung

Einen Zusammenhang kann man zwischen den Lastzyklen und der aufgebrachten Schubspannung erkennen. Alle fünf Mastixproben weisen wie in Abbildung 6.10 ersichtlich einen exponentiellen Trend mit einem ausgezeichneten Bestimmtheitsmaß ($R^2 > 0,98$) auf.

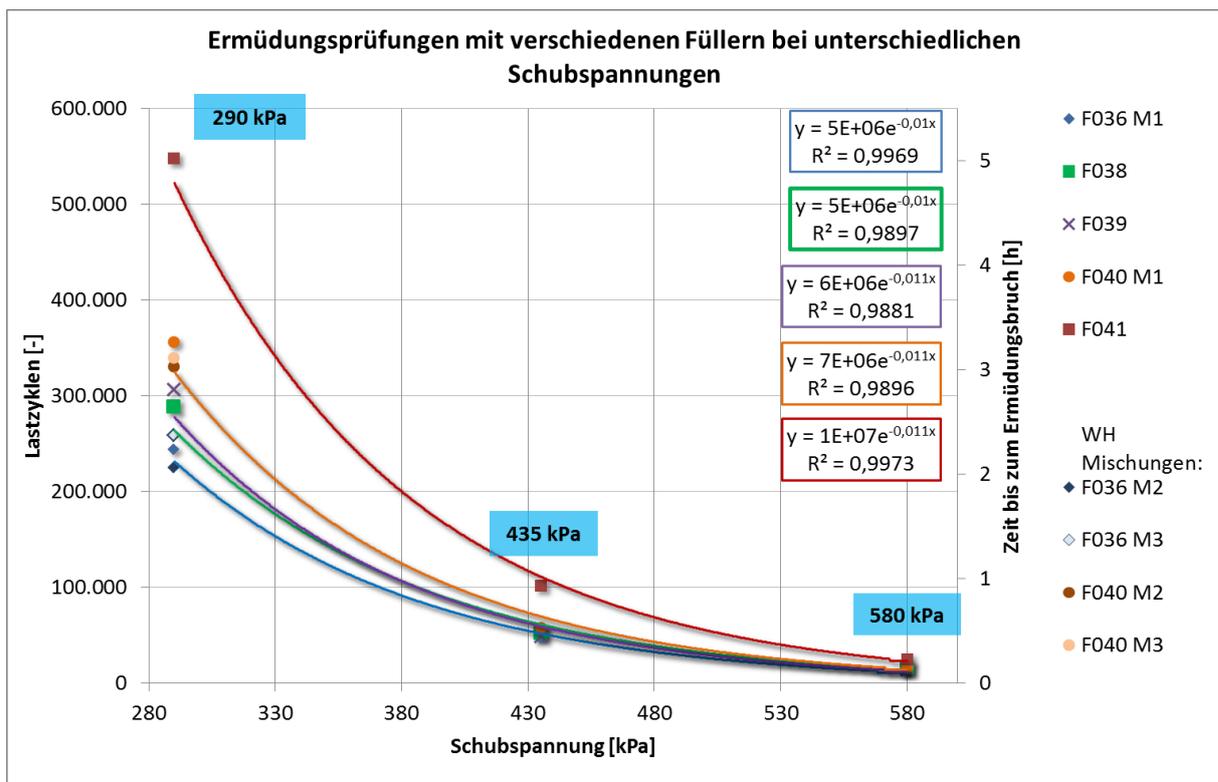


Abbildung 6.10 Zusammenhang Lastzyklen – aufgebrachte Schubspannung

Ebenfalls in Abbildung 6.10 kann man die vergleichsweise lange Prüfungsdauer von Füller F041 erkennen. Während die Mastix mit den Füllern F036-F040 bereits bei 250.000 bis 350.000 Lastzyklen versagen (beim LVE Limit $\tau_{p6}=290$ kPa), kann man die Mischung mit F041 bis 550.000 Lastzyklen (ca. fünf Stunden Prüfdauer) ohne Bruch belasten. Eine mögliche Erklärung für diese gute Performance bei den Ermüdungsprüfungen ist die Kornform. Ob dies aber der einzige Grund ist, lässt sich in dieser Versuchsreihe nicht komplett klären.

Man kann in dieser Abbildung auch erkennen, dass die Ergebnisse der Füller F036-F040 kaum voneinander abweichen, vor allem ist kein Unterschied zwischen dem Kalksteinmehlen (F036, F038 und F040) und dem „Quarzmehl“ (F039) ersichtlich. Durch die schon in Kapitel

6.1 beschriebene Nasssiebung und der Sedigraphie weiß man, dass die Korngrößen dieser Füller annähernd gleich groß sind, allerdings sind in F039 nur 22% Quarzanteil. Möglicherweise ergibt sich ein differenzierteres Bild, wenn diese Ermüdungsprüfungen mit einem Füller mit einem höheren Quarzanteil durchgeführt werden.

Von F036 und F040 wurden Wiederholungsmischungen (M2 und M3) angefertigt, und auch diese mit denselben Bedingungen bei 290 kPa getestet. Wie in Tabelle 6.2 ersichtlich gibt es nur geringe Abweichungen und somit eine gute Wiederholbarkeit auch bei mehreren Mischversuchen.

Tabelle 6.2 Abweichungen der Wiederholungsmischungen

Füller	Mischung	Lastzyklen [-]	Abweichung [%]
F036	M1	243.600	-
	M2	225.300	-8,12
	M3	258.600	+5,80
F040	M1	356.400	-
	M2	330.600	-7,80
	M3	339.900	-4,85

6.4 Mastixversuche - Zusammenhang Lastzyklen - Anfangssteifigkeit

Ein linearer Zusammenhang ist zwischen Anzahl der Lastzyklen bis zum Ermüdungsbruch und der Anfangssteifigkeit $|G^*_{p6}|_{n=1}$ erkennbar (Abbildung 6.11). Je höher der komplexe Schubmodul am Anfang des Ermüdungsversuchs ist, desto länger dauert es auch, bis der Probekörper bricht. Dieser lineare Zusammenhang zeigt sich am deutlichsten bei einer Schubspannung von 290 kPa, und wird zunehmender Belastung schlechter. Dies ist dadurch erklärbar, dass bei dieser Schubspannung das LVE-Limit erreicht ist, und bei 435 und bei 580 kPa die Versuche nicht mehr im linear viskoelastischen Bereich stattfinden.

Wie schon in Kapitel 6.3 beschrieben, passen die Ergebnisse der Wiederholungsmischungen (M2 und M3) von F036 und F040 zu den ersten Mischungen (M1).

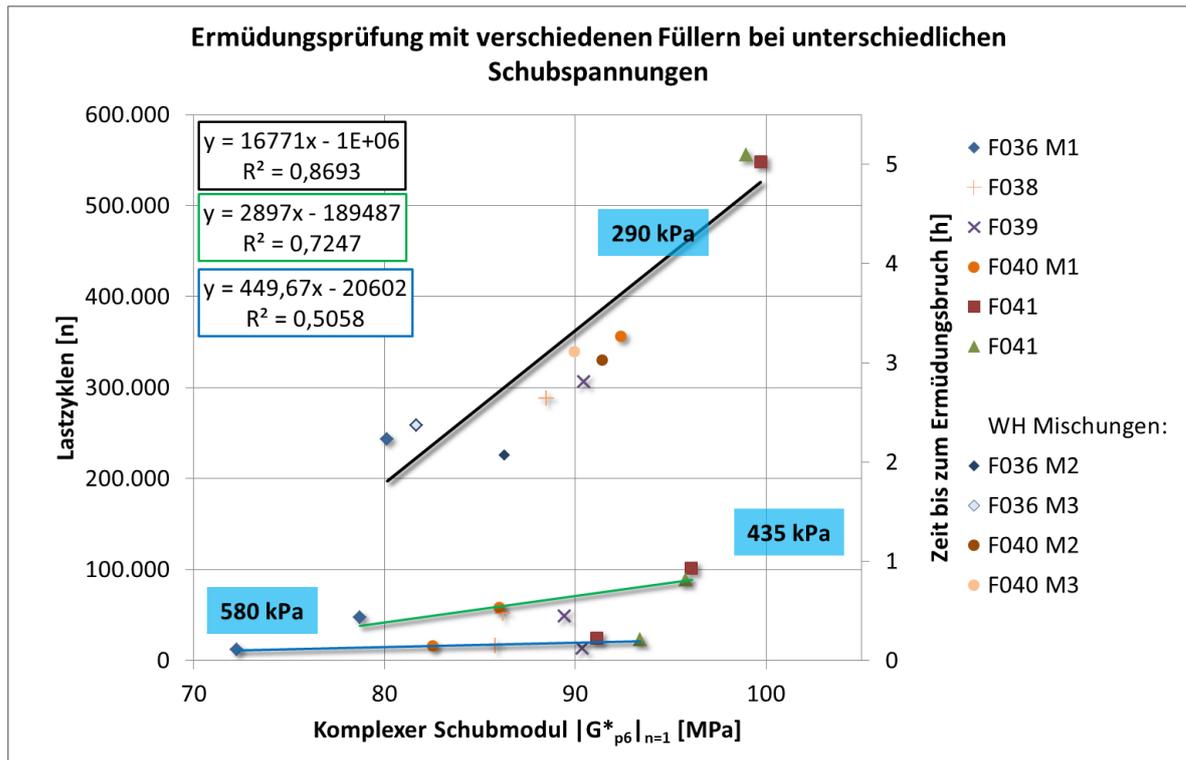


Abbildung 6.11 Zusammenhang Lastzyklen - Anfangssteifigkeit

6.5 Fazit

Obwohl einige interessante Aspekte herausgefunden werden konnten, konnte leider kein unterschiedliches Ermüdungsverhalten von Kalkstein- und Quarzmehl festgestellt werden. Sowohl die Anfangssteifigkeit $|G^*_{p6}|$ als auch die Dauer bis zum Bruch sind so ähnlich, dass aufgrund dieser Parameter nicht gesagt werden kann, ob es sich um einen qualitativ guten oder schlechten Füller handelt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Versuchsaufbau mit den eigens entwickelten Probekörperformen hat sich als äußerst sinnvoll erwiesen. Durch die Einschnürung in der Mitte konnte sichergestellt werden, dass sich der Probekörper nicht von der oberen oder der unteren Platte löst, immer ein Ermüdungsbruch der Mastixprobe stattfindet. Diese Art der Probenvorbereitung ist allerdings sehr zeitintensiv, da die Probe erst im Rheometer eingefüllt werden kann, und somit das Gerät länger belegt ist. Daher wäre es für weitere Versuche hilfreich, die zu untersuchenden Proben schon außerhalb des Rheometers fertigstellen zu können, um eine schnellere Durchführung der Prüfungen garantieren zu können. Die Versuchsdauer beträgt bei den widerstandsfähigsten Proben rund fünf Stunden und ist im Sinne einer praxisgerechten Prüfdauer noch akzeptabel.

Die Wiederholbarkeit hat sich in dieser Versuchsreihe als ausgezeichnet herausgestellt. Einerseits konnten die Prüfungen ohne große Abweichungen reproduziert werden. Andererseits war es auch möglich, mit zwei verschiedenen Füllern Vergleichsproben zu mischen und zu prüfen, welche alle zu ähnlichen Ergebnissen führten wie die ersten Versuche.

Der Graph bei den Ermüdungsversuchen ist qualitativ gleich wie in der herrschenden Literatur. [25] [27] Die in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Phasen I-III sind in dieser Versuchsreihe eindeutig zu erkennen und für die Ermüdung charakteristisch. Auch das zeigt den einwandfreien Versuchsaufbau, und dass die Probenvorbereitung mithilfe der Silikonformen und der Einschnürung keinen negativen Einfluss auf die Prüfung hat.

Leider konnte aber kein unterschiedliches Ermüdungsverhalten von Kalkstein- und Quarzmehl festgestellt werden. Sowohl die Dauer des Versuchs als auch die viskoelastischen Parameter sind so ähnlich, dass man anhand der Prüfungsergebnisse nicht auf einen qualitativ guten oder schlechten Füller schließen könnte. Eine mögliche Erklärung waren unterschiedliche Korngrößen der verschiedenen Füller. Größere Körner stellen aufgrund der kleinen Oberfläche einen schlechteren Verbund mit dem Bitumen her, womit es zu einer geringeren Steifigkeit der Mastix kommt. Bei einer größeren Oberfläche zwischen Bitumen und Füller kann hingegen die vergrößerte Adhäsionsfläche eine Steifigkeitszunahme bewirken. [28] Da diese Möglichkeit durch die Nasssiebung und die Sedigraphie ausgeschlossen wurde, und alle Füller fast dieselben Korngrößen aufweisen, fehlt eine Erklärung für die ähnlichen Ergebnisse bei den Ermüdungsprüfungen.

Die Füllerprüfungen haben allerdings einen anderen Aspekt zum Vorschein gebracht. F039 wurde ursprünglich als Probe eines Quarzmehls getestet, die Röntgendiffraktometrie zeigte aber, dass dieser Füller nur zu 22 % aus Quarzmehl besteht, und zu 56% aus Kalksteinmehl. Möglicherweise ist dieser gravierende Unterschied auf Schwankungen innerhalb eines

Steinbruches zurückzuführen. Abgesehen von dieser Probe wurden außerdem drei eindeutige Kalksteinmehle und ein aus Seesand hergestelltes Quarzmehl geprüft. Es wäre also noch vorteilhaft ein Quarzmehl aus einem Steinbruch zu testen (wie es in der Asphaltproduktion verwendet wird).

Literaturverzeichnis

- [1] J. Litzka, R. Strobl, F. Pass und H. Augustin, „Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung,“ in *Straßenforschung Heft 479*, Republik Österreich, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Bundesstraßenverwaltung, Wien, 1999.
- [2] G. D. Airey, B. Rahimzadeh und A. C. Collop, „Viscoelastic linearity limits for bituminous materials,“ *Materials and Structures*, pp. 643-647, 12. 2003.
- [3] J. Rompu, H. D. Benedetto, G. Gauthier und T. Gallet, „New fatigue test on bituminous binders and mastics using an annular shear rheometer prototype and waves propagation,“ in *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, London, Taylor & Francis Group, 2009.
- [4] „ÖNorm EN 12697-24: 2012 - Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Beständigkeit gegen Ermüdung“.
- [5] G. Neroth und D. Vollenschaar, *Wendehorst Baustoffkunde*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2011.
- [6] Thienel, „Universität der Bundeswehr München,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/skripte>. [Zugriff am 13. 06. 2015].
- [7] „European Bitumen Association,“ [Online]. Available: www.eurobitume.eu/de/national/switzerland/was-ist-bitumen. [Zugriff am 06. 04. 2015].
- [8] ÖNORM EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie, Ausgabe: 01-2001.
- [9] „Arbit,“ [Online]. Available: www.arbit.de/alles-ueber-bitumen/vom-rohstoff-zum-werkstoff/. [Zugriff am 24. 03. 2015].
- [10] „Die Bitumenbahn,“ [Online]. Available: www.derdichtebau.de. [Zugriff am 24. 03. 2015].
- [11] „Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,“ [Online]. Available: www.ifb.ethz.ch/education/bachelor_werkstoffe1/2011FS/Werkstoffe1_Bitumen2011.pdf. [Zugriff am 24. 03. 2015].
- [12] „Wikipedia,“ [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/La_Brea_Pitch_Lake. [Zugriff

am 24. 03. 2015].

- [13] ÖNORM EN 12591: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Anforderungen an Straßenbaubitumen, 2009.
- [14] Hartner, Gestrata Asphalt Handbuch, Wien, 1996.
- [15] „EN 1097-7: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller – Pyknometer-Verfahren,“ 2008.
- [16] „EN 1097-4: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller,“ 2008.
- [17] „Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen - Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung),“ 2009.
- [18] „Spektrum.de,“ [Online]. Available: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/siebanalyse/14923>. [Zugriff am 11. 03. 2016].
- [19] „Uni Leipzig,“ [Online]. Available: <http://geographie.physgeo.uni-leipzig.de/landschaft/labor/#korn>. [Zugriff am 11. 03. 2016].
- [20] „Wikipedia,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Stokessche_Gleichung. [Zugriff am 11. 03. 2016].
- [21] „Uni Leipzig,“ [Online]. Available: <http://www.uni-leipzig.de/~geologie/Ausstattung/Diffrak.html>. [Zugriff am 11. 03. 2016].
- [22] „Chemie.de,“ [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/BET-Messung.html>. [Zugriff am 11. 03. 2016].
- [23] „Universität Jena,“ [Online]. Available: https://www.ipc.uni-jena.de/downloads/Lehre/Pharmazie/PC/Praktikum/04_BET.pdf. [Zugriff am 11. 03. 2016].
- [24] D. Anderson, „Binder Characterisation and Evaluation, Vol 3: Physical Characterization,“ in *SHRP-A-369, Strategic Highways Research Program*, Nat. Research Council, Washington, D.C., 1994.

- [25] B.Delaporte, J. V. Rompu, H. D. Benedetto, P.Chaverot und G. Gauthier, „New procedure to evaluate fatigue of bituminous mastics using an annular shear rheometer prototype,“ *Pavement Cracking*, 2008.
- [26] F. Pérez-Jiménez, R. Botella und R. Miró, „Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests,“ *Construction and Building Materials* 31, pp. 212-219, 2012.
- [27] M.-C. Liao, J.-S. Chen und K.-W. Tsou, „Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 916-923, 07 2012.
- [28] J.-S. Chen, P.-H. Kuo, P.-S. Lin, C.-C. Huang und K.-Y. Lin, „Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler,“ *Materials and Structures*, pp. 1015-1024, 2008.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Korn- und Schollenausbrüche [3]	1
Abbildung 2.1 Gewinnung von Bitumen [11]	4
Abbildung 2.2 Arbeitsweise des DSR [1]	8
Abbildung 2.3 Spannungs- und Deformationsverlauf [1]	8
Abbildung 2.4 Übersicht über die verschiedenen Bitumenarten [13]	9
Abbildung 3.1 Aufbau Asphaltstraße [5]	12
Abbildung 4.1 Standardabweichung bei unterschiedlichen Mischverhältnissen	16
Abbildung 5.1 Sedigraph der Universität für Bodenkultur.....	19
Abbildung 5.2 XRD der Universität für Bodenkultur	20
Abbildung 5.3 Füllerprobe für XRD	20
Abbildung 5.4 Dynamisches Scherrheometer	21
Abbildung 5.5 Platte-Platte Sensor	21
Abbildung 5.6 Bruch innerhalb des Probekörpers - Kohäsionsbruch	23
Abbildung 5.7 Bruch oberhalb des Probekörpers - Adhäsionsbruch	23
Abbildung 5.8 Spannungen in den verschiedenen Probekörpern	23
Abbildung 5.9 Fertiger Probekörper mit Einschnürung	23
Abbildung 5.10 Formen für das Gießen der Silikonformen	24
Abbildung 5.11 Silikonform 6 mm.....	24
Abbildung 5.12 Silikonform mit Messsensor	25
Abbildung 5.13 Eingefüllte Mastix	25
Abbildung 5.14 Eingefüllte Mastix mit Messsensor	25
Abbildung 5.15 Temperaturmessung.....	26
Abbildung 5.16 LVE-Limit: Linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung.....	27
Abbildung 5.17 Amplitudensweep zur Ermittlung des LVE Limits	28
Abbildung 5.18 Typischer Ermüdungsversuch	30
Abbildung 6.1 Kornverteilung durch Luftstrahlsiebung (EN 933-10)	33
Abbildung 6.2 Korngrößenverteilung durch Sedigraph (<0,02 mm) und Nasssiebung (>0,02 mm).....	33
Abbildung 6.3 Mineralogie F036 (mittels XRD)	34
Abbildung 6.4 Mineralogie F038 (mittels XRD)	34
Abbildung 6.5 Mineralogie F039 (mittels XRD)	35
Abbildung 6.6 Mineralogie F040 (mittels XRD)	35
Abbildung 6.7 Mineralogie F041 (mittels XRD)	35
Abbildung 6.8 BET-Oberfläche	36
Abbildung 6.9 Ermüdungsprüfung von F041 bei 290, 435 und 580 kPa	36
Abbildung 6.10 Zusammenhang Lastzyklen – aufgebrauchte Schubspannung	37
Abbildung 6.11 Zusammenhang Lastzyklen - Anfangssteifigkeit	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Zusammensetzung von Bitumen [5].....	3
Tabelle 2.2 Wichtigste Polymergruppen für den Straßenbau [6]	10
Tabelle 3.1 Unterscheidungen bei Gesteinskörnungen [5].....	13
Tabelle 4.1 Eigenschaften des verwendeten Bitumen.....	15
Tabelle 4.2 Getestete Füller	15
Tabelle 4.3 Prüfmatrix.....	17
Tabelle 5.1 Zusammenfassung für das Einlegen der Probe	26
Tabelle 5.2 Stufen des Amplitudensweeps	28
Tabelle 5.3 LVE Versuchsergebnisse	29
Tabelle 5.4 Übersicht der Ermüdungsversuche	31
Tabelle 6.1 Zusammenfassung der Eigenschaften der Füller.....	34
Tabelle 6.2 Abweichungen der Wiederholungsmischungen.....	38

Anhang

Bitumen – Prüfberichte

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology	Institut für Verkehrswissenschaften Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen Gußhausstraße 28 / E230-3 1040 Wien Tel.: +43-1-58801-23301 Fax.: +43-1-58801-23399 DVR:0005886			
	Prüfbericht: Konventionelle Bitumenprüfung			
		P311 Seite 1 von 1		
AuftraggeberIn Datum Projekt ProjektleiterIn PrüferIn	Land Oberösterreich 01.02.2016 14423 Markus Hospodka Markus Hospodka			
Probedaten				
Bitumenprobe	70/100	Alterungsstufe A		
Laborcode	B287A			
Prüfergebnisse				
Nadelpenetration				
Gerät	FröWag 1.572	Messung 1	90,3 1/10mm	
Norm	EN 1426	Messung 2	91,5 1/10mm	
		Messung 3	N/V	
		Prüfergebnis	91 1/10mm	
Erweichungspunkt Ring und Kugel				
Gerät	FröWag 1.640	Messung 1	46,96 °C	
Norm	EN 1427	Messung 2	47,06 °C	
Badflüssigkeit	Wasser	Prüfergebnis	47,0 °C	
Elastische Rückstellung				
Gerät	Straßentest	Messung 1	Probe 1	Probe 2
Norm	EN 13398	Ausziehlänge	200 mm	200 mm
Temperatur	25,0 °C	Lichte Weite d	25 mm	27 mm
Ausziehgeschw.	50 mm/min	Elast. Rückstellung R _e	12,5 %	13,5 %
		Prüfergebnis	13 %	
Anmerkungen				

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology	Institut für Verkehrswissenschaften Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen Gußhausstraße 28 / E230-3 1040 Wien Tel.: +43-1-58801-23301 Fax.: +43-1-58801-23399 DVR:0005886
---	---

Prüfbericht: Bestimmung der Gebrauchsspanne (SUPERPAVE Performance Grade)	P309 Seite 1 von 2
AuftraggeberIn - Datum 01.02.2016 Projekt - ProjektleiterIn Nicht vorhanden PrüferIn -	

Probedaten			
Bitumenprobe	70/100	Laborcode	B287A

Prüfergebnisse			
High Temperature Performance Grade			
<u>Anforderung:</u>	DSR (Originalbitumen, A)	$G^*/\sin \delta > 1 \text{ kPa}$	67,9 °C
	DSR (RTFOT-gealtert, B)	$G^*/\sin \delta > 2,2 \text{ kPa}$	63,9 °C
High Temperature Performance Grade laut SUPERPAVE			58 °C
Low Temperature Performance Grade			
<u>Anforderung:</u>	BBR(RTFOT + PAV-gealtert, C)	S (60s) < 300 MPa	-21,7 °C
		m-Wert (60s) > 0,3 [-]	-21,8 °C
<u>Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip:</u>		$\delta (2h, T_{\min}) = \delta (60s, T_{\min} - 10^\circ\text{C})$	
		S < 300 MPa	-31,7 °C
		m-Wert > 0,3 [-]	-31,8 °C
Low Temperature Performance Grade laut SUPERPAVE			-28 °C
PERFORMANCE GRADE			PG 58-28

Anmerkungen



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**
Vienna University of Technology

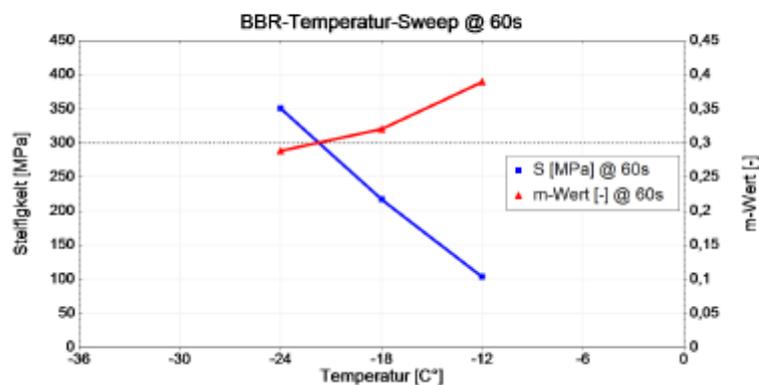
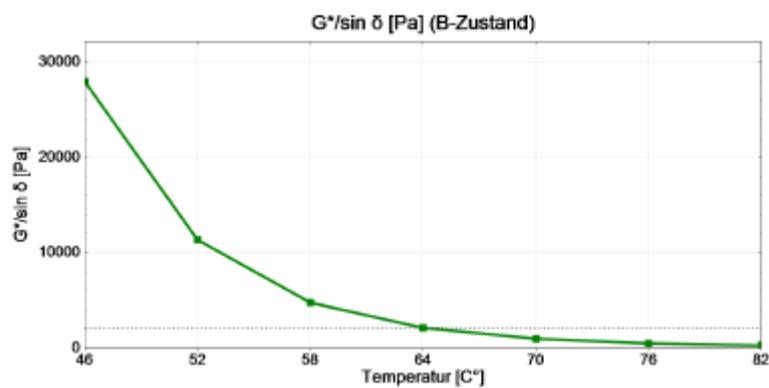
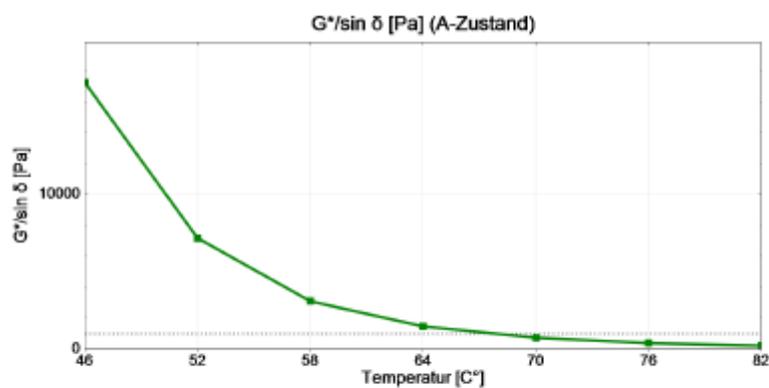
Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen
Gußhausstraße 28 / E230-3
1040 Wien
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax.: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

**Prüfbericht: Bestimmung der Gebrauchsspanne
(SUPERPAVE Performance Grade)**

**P309
Seite 2 von 2**

AuftraggeberIn	-
Datum	01.02.2016
Projekt	
ProjektleiterIn	Nicht vorhanden
PrüferIn	-

Prüfergebnisse



Füller - Prüfberichte

F036

Fb.: A057 01 F1

Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung) EN 933-10	
Auftraggeber:	unbekant
Labornummer:	375/15
Art der Probe:	F036 Kalksteinmehl TU - Wien

Trockenmasse der Meßprobe M_1 :	50 [g]
-----------------------------------	--------

Sieböffnungsweite [mm]	Masse des Siebrückstandes (R_i) [g]	Anteil des Siebrückstandes $(R_i/M_1)*100$ [%]	Summe der Durchgänge $100-(100*R_i/M_1)$ [%]
2,0	0,0	0	100
0,125	3,5	7	93
0,063	9,4	19	81

Datum:	25.09.2015	Prüfer:	Holzinger
--------	------------	---------	-----------

F041



Spezifikation

Artikelnummer:	4651		
Quarz			
>99 % pulv., <125 µm			
CAS-Nummer:	14808-60-7	Druckdatum:	28.03.2015
Formel:	SiO ₂		
Dichte:	2,65		
Molekulargewicht:	60,08 g/mol		

Typanalyse

Gehalt	>99 %
Al₂O₃	0,3 %
Fe₂O₃	0,05 %
CaO + MgO	0,1 %
Na₂O + K₂O	0,2 %
Glühverlust	0,25 %
<i>Partikelgrößenverteilung:</i>	
>125 µm	0,1 %
>100 µm	0,5 %
>63 µm	1-3 %
>40 µm	12 %

Unsere Produkte sind für Laborzwecke geprüft.
Die Angaben beziehen sich auf den aktuellen Stand der Produktqualität.
Wir behalten uns vor, notwendige Änderungen durchzuführen.

O. Lautenschläger
Head of Quality Control

S.Hildebrandt
Quality Management

Dieses Dokument wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Carl Roth GmbH + Co. KG
Schoemperlenstraße 3-5
76185 Karlsruhe

Telefon 0721/5606-0
Telefax 0721/5606-149
E-Mail: info@carlroth.de

Die Firma ist eine Kommanditgesellschaft mit Sitz in Karlsruhe, Reg. Gericht Mannheim HRA 100055. Persönlich haftende Gesellschafterin ist die Firma Roth Chemie GmbH mit Sitz in Karlsruhe, Reg. Gericht Mannheim HRB 100428. Vorsitzender des Aufsichtsrats: Eberhard Gaul
Geschäftsführer: Dr. Alfred Wagner und Lothar Haidmann



Seite 1 von 1

Fülleruntersuchungen

Dichte- und Hohlraumbestimmung nach 1097-7 und 1097-4

TU-Code	Sorte	Dichte ρ [g/cm ³]		Ridgen V [V.-%]	
		EN 1097-7		EN 1097-4	
F036	Kalksteinmehl	2,79	-	34,1	-
F038	Kalksteinmehl	2,75	-	33,2	-
F039	Quarzmehl	2,70	-	32,7	-
F040	Kalksteinmehl	2,75	2,71*	33,6	28*
F041	Quarzmehl	2,65	2,65**	38,9	-

Dichte und Hohlraumgehalt wurden (wenn nicht anders angegeben) von der BPS untersucht.

*Nievelt

**Fa. Carl Roth

Luftstrahlsiebung nach EN 933-10

Sieböff nungs weite [mm]	Masse des Siebrückstandes (Ri)														
	F036			F038			F039			F040			F041**		
	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]
2,0	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	-	0	100
0,125	3,5	7	93	0,8	2	98	4,5	9	91	0,7	1	99	-	0,1	99,9
0,063	9,4	19	81	5,7	11	89	15	30	70	4,5	9	91	-	3	97

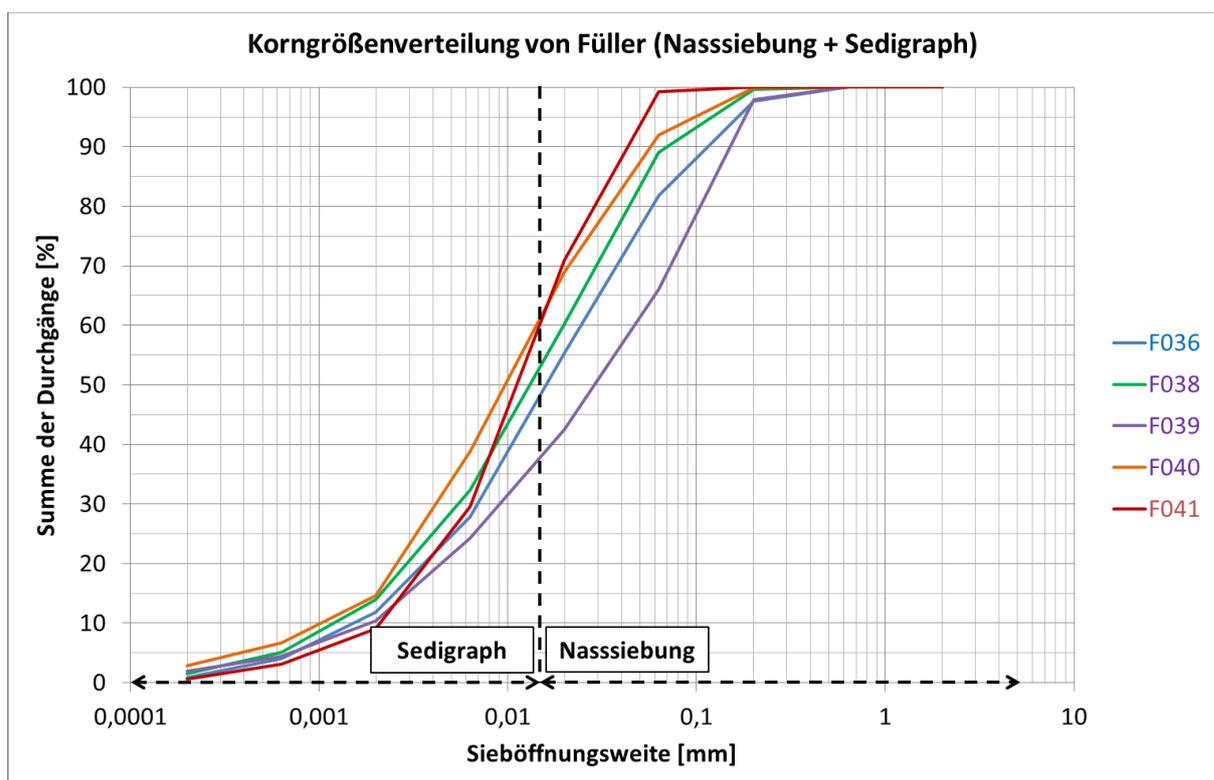
Luftstrahlsiebung von der BPS durchgeführt

**Fa. Carl Roth

Nasssiebung und Sedigraphie

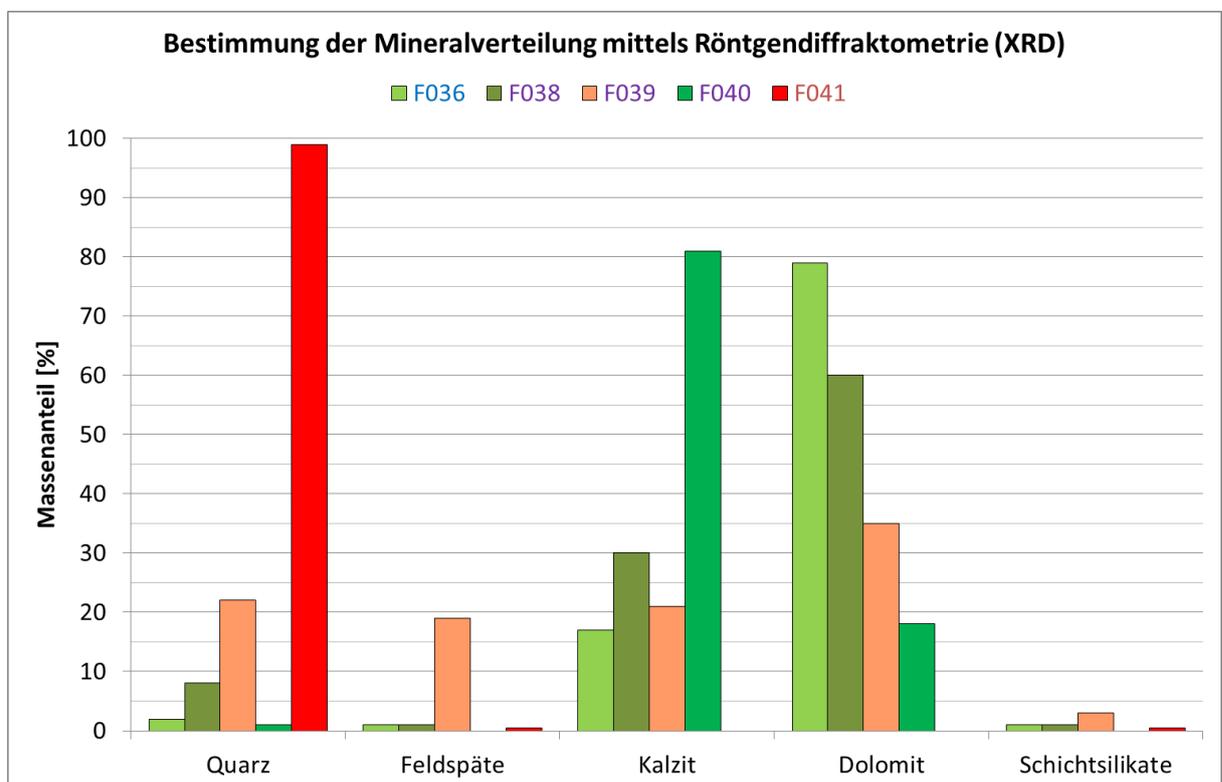
Sieböffnungs- weite	Masse des Siebrückstandes (Ri)				
	F036	F038	F039	F040	F041
[mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
6,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,63	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,2	97,6	99,7	97,9	99,9	100,0
0,063	81,8	89,1	66,1	92,0	99,2
0,02	55,3	60,3	42,5	68,9	71,0
0,0063	27,9	32,3	24,3	38,8	29,6
0,002	11,8	13,9	10,4	14,6	9,1
0,00063	4,1	5,1	4,5	6,7	3,1
0,0002	0,9	1,5	1,9	2,9	0,6

Nasssiebung und Sedigraphie an der BOKU-IGAG durchgeführt



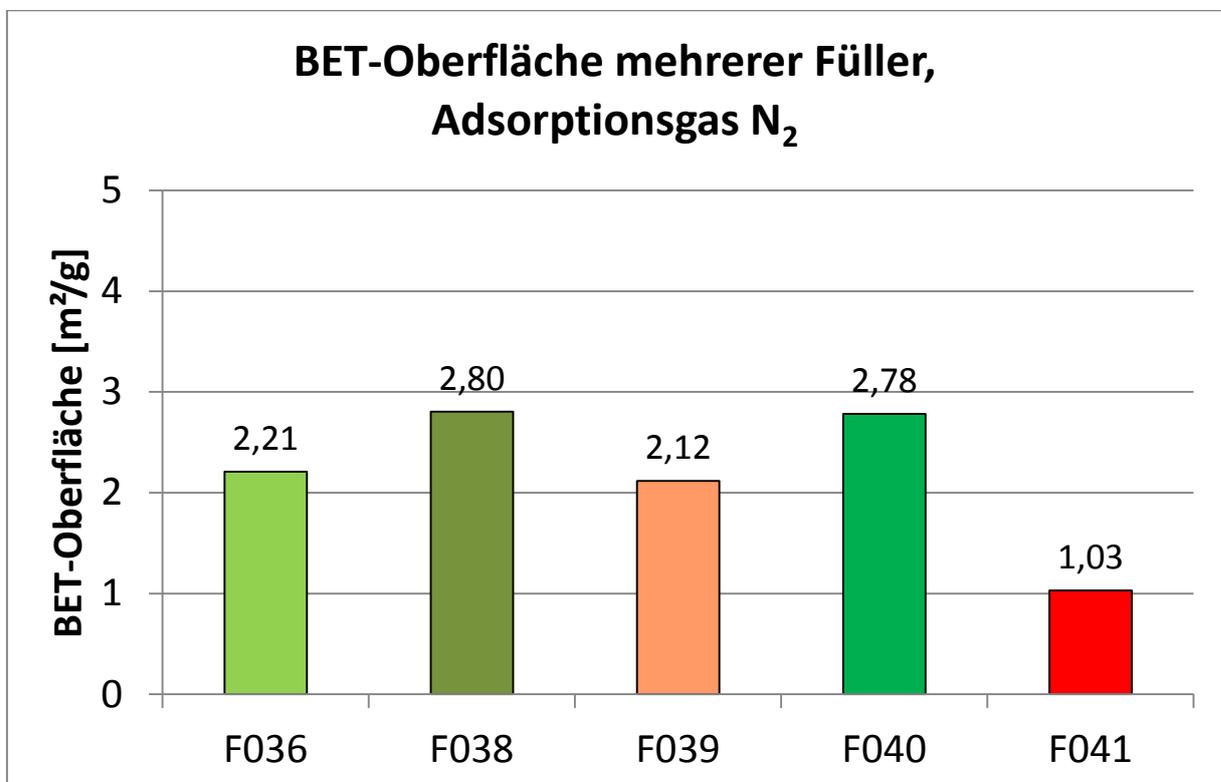
Mineralogiebestimmung mittels Röntgendiffraktometrie

	F036	F038	F039	F040	F041
	BOKU	BOKU	BOKU	BPS	BOKU
Quarz	2	8	22	91	1
Feldspäte	1	1	19	5	-
Kalzit	17	30	21	4	81
Dolomit	79	60	35	-	18
Schichtsilikate	1	1	3	-	Spuren
Quarz	2	8	22	91	1
Karbonate	96	90	56	4	99



BET Messung, durchgeführt an der TU Wien – IMC

TU-Code	Single Point Surface Area [m ² /g]	BET Surface Area [m ² /g]
F036	2,1148	2,2086
F038	2,6867	2,8048
F039	2,0044	2,1174
F040	2,6604	2,7833
F041	0,9811	1,0315



Ergebnisse der Amplitudensweeps mit dem Füller F036

	LVE-Limit	0,95 G* _{p6} [MPa]	0,95 τ _{p6} (kPa)	G* _{p6} [MPa]
B287A (70/100)	0,95	20,61	183,50	21,69
	0,95	20,37	187,83	21,44
	0,95	20,46	187,29	21,54
	0,95	17,84	164,66	18,78
	0,95	18,79	165,77	19,78
	0,95	17,66	203,39	18,59
Mittelwert		19,29	182,07	20,30
sd abs		1,36	14,74	1,43
sd %		7	8	7
B401A (1:1 Mischung)	0,95	48,48	243,35	51,03
	0,95	48,07	252,55	50,60
	0,95	44,15	236,99	46,47
	0,95	44,28	231,72	46,61
	0,95	53,22	268,76	56,02
	0,95	51,70	286,10	54,42
Mittelwert		48,32	253,25	50,86
sd abs		3,72	20,72	3,92
sd %		8	8	8
B402A (1:1,5 Mischung)	0,95	92,38	218,68	97,24
	0,95	84,55	312,95	89,00
	0,95	84,64	291,01	89,09
	0,95	76,58	319,22	80,61
	0,95	84,17	307,44	88,60
	0,95	81,45	280,99	85,74
Mittelwert		83,96	288,38	88,38
sd abs		5,15	36,98	5,42
sd %		6	13	6
B379A (1:2 Mischung)	0,95	138,94	206,42	146,25
	0,95	140,22	239,41	147,60
	0,95	160,93	423,53	169,40
	0,95	142,74	385,58	150,25
	0,95	130,96	320,28	137,85
	0,95	128,11	372,47	134,85
Mittelwert		140,32	324,62	147,70
sd abs		11,57	86,07	12,18
sd %		8	27	8

Ergebnisse der Amplitudensweeps mit dem Füller F038

	LVE-Limit	0,95 G* _{p6} [MPa]	0,95 τ _{p6} (kPa)	G* _{p6} [MPa]
B287A (70/100)	0,95	20,61	183,50	21,69
	0,95	20,37	187,83	21,44
	0,95	20,46	187,29	21,54
	0,95	17,84	164,66	18,78
	0,95	18,79	165,77	19,78
	0,95	17,66	203,39	18,59
Mittelwert		19,29	182,07	20,30
sd abs		1,36	14,74	1,43
sd %		7	8	7
B413A (1:1 Mischung)	0,95	46,22	235,31	48,65
	0,95	48,96	258,25	51,54
	0,95	46,72	248,57	49,18
	0,95	47,56	236,26	50,06
	0,95	49,93	266,61	52,56
	0,95	48,51	256,80	51,06
Mittelwert		47,98	250,30	50,51
sd abs		1,41	12,62	1,48
sd %		3	5	3
B479A (1:1,5 Mischung)	0,95	100,89	321,58	106,20
	0,95	94,66	292,76	99,64
	0,95	98,37	277,74	103,55
	0,95	97,76	283,19	102,91
	0,95	91,60	279,44	96,42
	0,95	93,40	323,17	98,32
Mittelwert		96,11	296,31	101,17
sd abs		3,48	20,85	3,66
sd %		4	7	4
B388A (1:2 Mischung)	0,95	145,11	317,40	152,75
	0,95	136,99	354,24	144,20
	0,95	142,26	239,60	149,75
	0,95	155,18	385,17	163,35
	0,95	159,84	339,43	168,25
	0,95	137,70	232,41	144,95
Mittelwert		146,18	311,38	153,87
sd abs		9,39	62,44	9,88
sd %		6	20	6

Ergebnisse der Amplitudensweeps mit dem Füller F039

	LVE-Limit	0,95 G* _{p6} [MPa]	0,95 τ _{p6} (kPa)	G* _{p6} [MPa]
B287A (70/100)	0,95	20,61	183,50	21,69
	0,95	20,37	187,83	21,44
	0,95	20,46	187,29	21,54
	0,95	17,84	164,66	18,78
	0,95	18,79	165,77	19,78
	0,95	17,66	203,39	18,59
Mittelwert		19,29	182,07	20,30
sd abs		1,36	14,74	1,43
sd %		7	8	7
B415A (1:1 Mischung)	0,95	41,99	213,33	44,20
	0,95	39,00	216,56	41,05
	0,95	41,89	250,64	44,09
	0,95	40,91	241,07	43,06
	0,95	38,05	248,57	40,05
	0,95	37,63	237,58	39,61
Mittelwert		39,91	234,63	42,01
sd abs		1,94	16,01	2,04
sd %		5	7	5
B416A (1:1,5 Mischung)	0,95	71,09	264,6	74,83
	0,95	77,96	289,86	82,06
	0,95	78,39	270,92	82,52
	0,95	71,5	261,62	75,26
	0,95	73,99	306,14	77,88
	0,95	89,51	337,71	94,22
Mittelwert		77,07	288,48	81,13
sd abs		6,83	29,45	7,19
sd %		9	10	9
B389A (1:2 Mischung)	0,95	156,13	298,24	164,35
	0,95	170,62	374,32	179,60
	0,95	167,06	405,56	175,85
	0,95	154,00	309,95	162,11
	0,95	159,70	413,65	168,11
	0,95	179,55	365,11	189,00
Mittelwert		164,51	361,14	173,17
sd abs		9,74	47,95	10,25
sd %		6	13	6

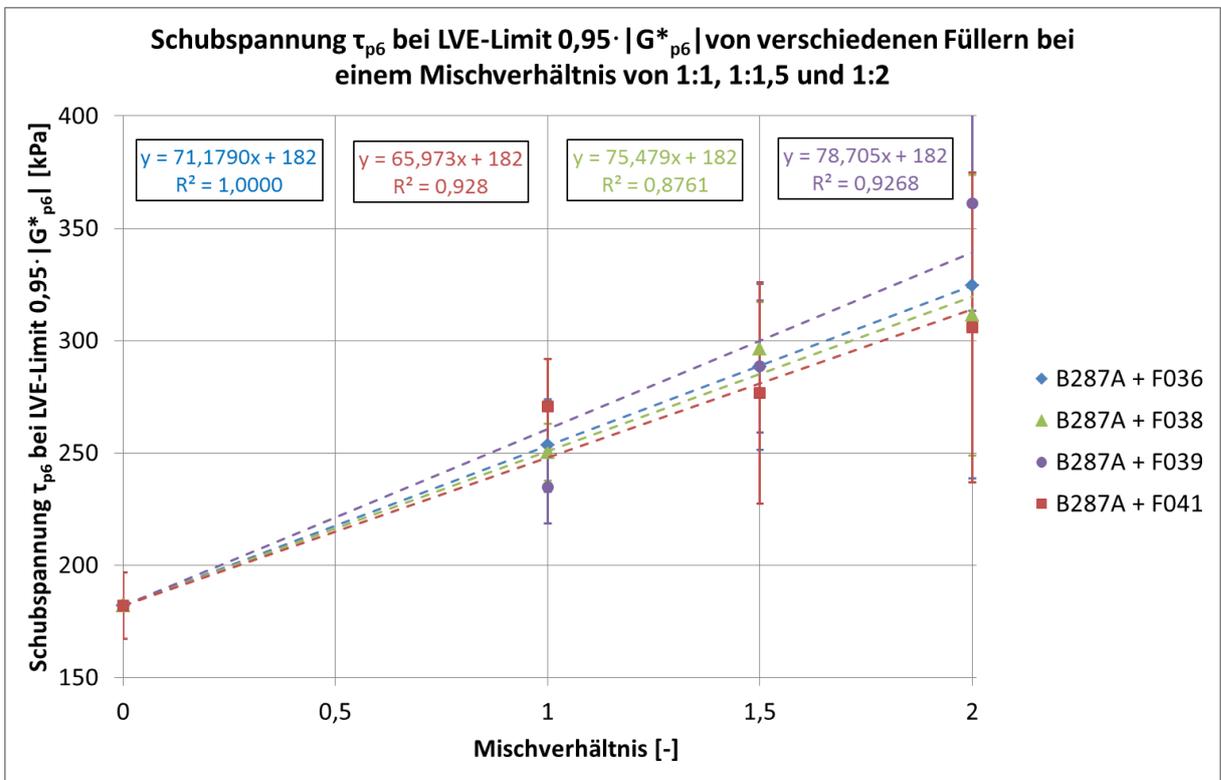
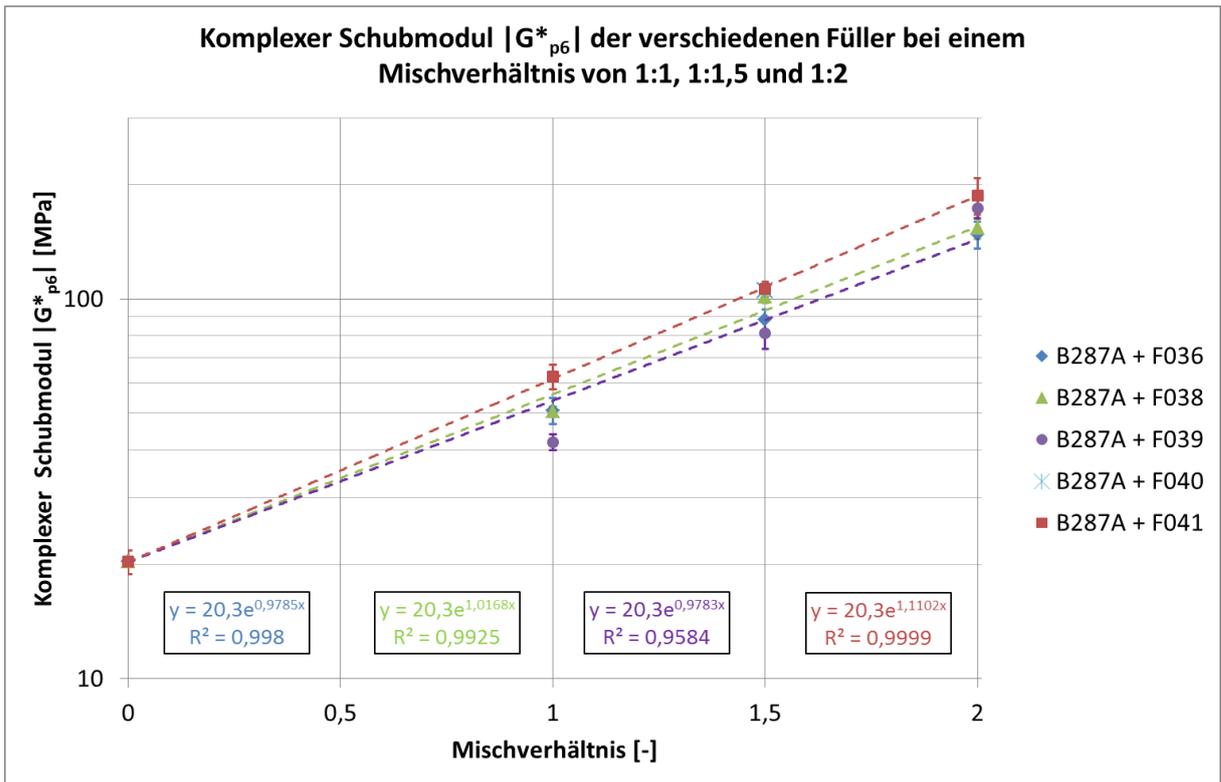
Ergebnisse der Amplitudensweeps mit dem Füller F040

	LVE-Limit	0,95 $ G^*_{p6} $ [MPa]	0,95 τ_{p6} (kPa)	$ G^*_{p6} $ [MPa]
B287A (70/100)	0,95	20,61	183,50	21,69
	0,95	20,37	187,83	21,44
	0,95	20,46	187,29	21,54
	0,95	17,84	164,66	18,78
	0,95	18,79	165,77	19,78
	0,95	17,66	203,39	18,59
Mittelwert		19,29	182,07	20,30
sd abs		1,36	14,74	1,43
sd %		7	8	7

B426A (1:1,5 Mischung)	0,95	98,04	246,52	103,20
	0,95	96,81	274,87	101,91
	0,95	106,88	243,86	112,51
	0,95	99,23	336,46	104,45
	0,95	105,26	233,38	110,80
	0,95	94,04	345,47	98,99
Mittelwert		100,04	280,09	105,31
sd abs		5,00	49,20	5,27
sd %		5	18	5

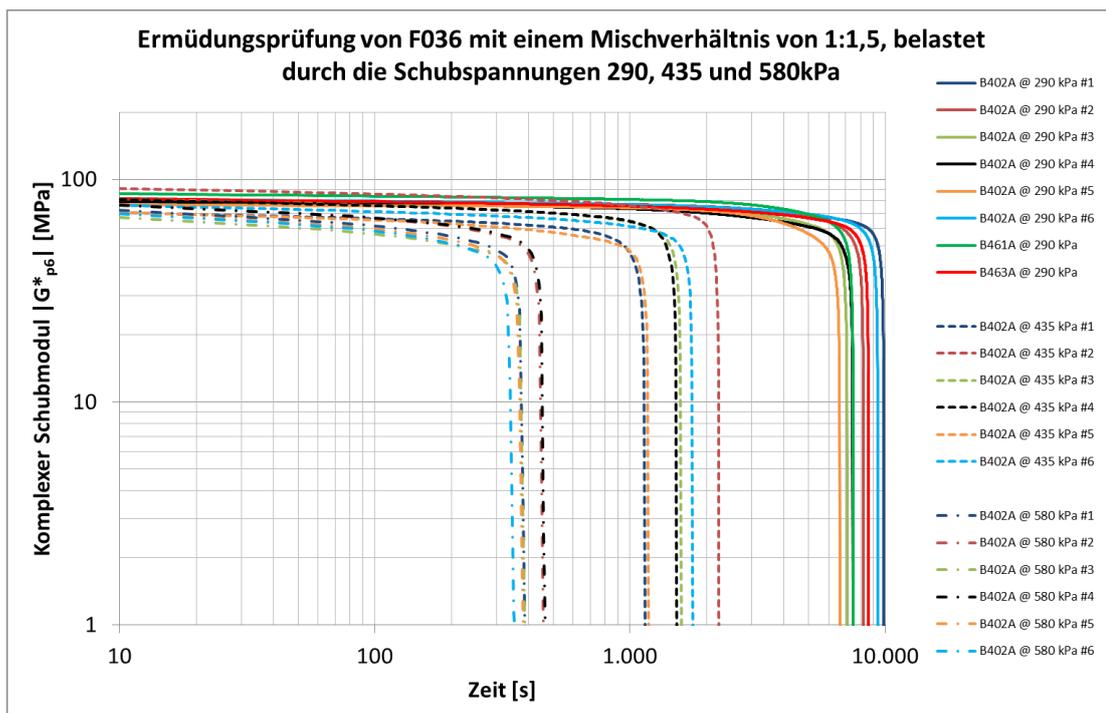
Ergebnisse der Amplitudensweeps mit dem Füller F041

	LVE-Limit	0,95 G* _{p6} [MPa]	0,95 τ _{p6} (kPa)	G* _{p6} [MPa]
B287A (70/100)	0,95	20,61	183,50	21,69
	0,95	20,37	187,83	21,44
	0,95	20,46	187,29	21,54
	0,95	17,84	164,66	18,78
	0,95	18,79	165,77	19,78
	0,95	17,66	203,39	18,59
Mittelwert		19,29	182,07	20,30
sd abs		1,36	14,74	1,43
sd %		7	8	7
B405A (1:1 Mischung)	0,95	54,39	242,05	57,25
	0,95	58,97	284,56	62,07
	0,95	61,50	267,35	64,74
	0,95	53,88	346,78	56,72
	0,95	62,29	288,55	65,57
	0,95	65,06	196,56	68,48
Mittelwert		59,35	270,98	62,47
sd abs		4,48	50,25	4,72
sd %		8	19	8
B406A (1:1,5 Mischung)	0,95	93,78	304,47	98,72
	0,95	98,37	219,26	103,55
	0,95	105,45	322,86	111,00
	0,95	99,99	215,25	105,25
	0,95	102,22	274,75	107,60
	0,95	105,5	322,93	111,05
Mittelwert		100,89	276,59	106,19
sd abs		4,51	49,23	4,74
sd %		4	18	4
B391A (1:2 Mischung)	0,95	150,20	335,23	158,11
	0,95	162,88	288,74	171,45
	0,95	172,05	376,55	181,11
	0,95	198,65	242,10	209,11
	0,95	185,30	214,05	195,05
	0,95	197,74	377,68	208,15
Mittelwert		177,80	305,73	187,16
sd abs		19,52	69,00	20,55
sd %		11	23	11



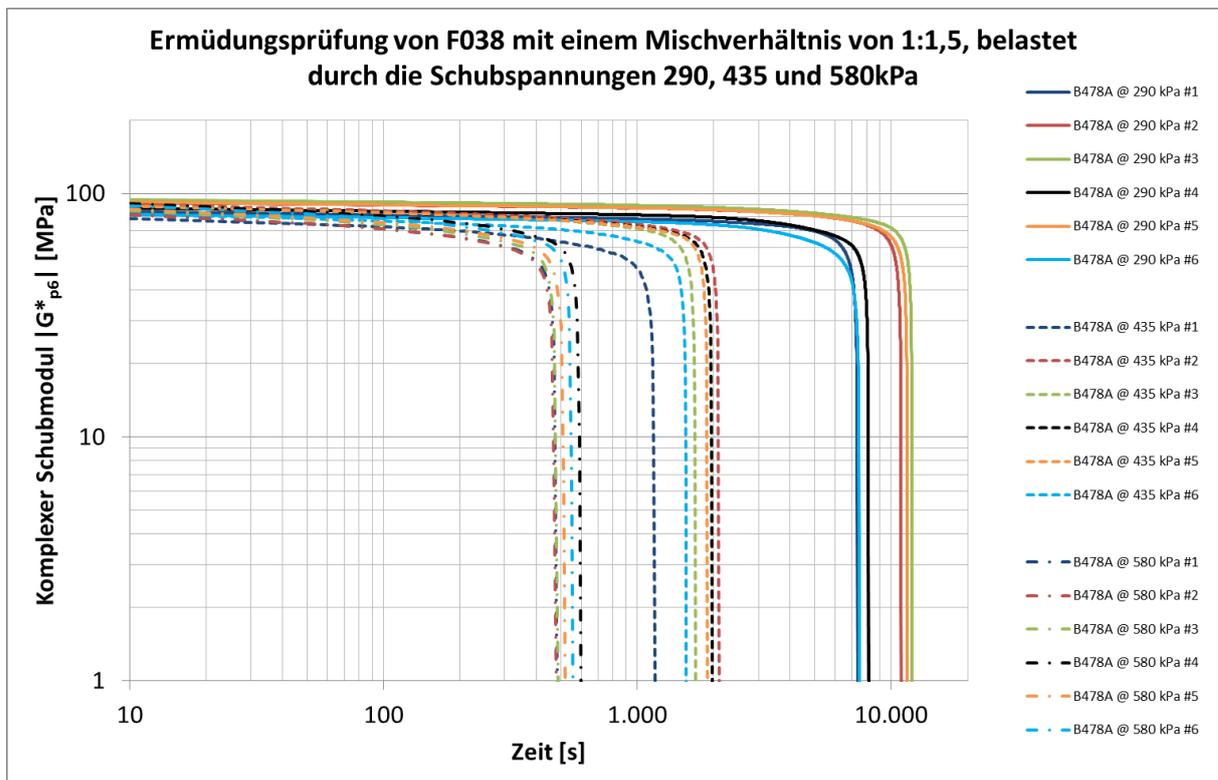
Ermüdungsversuche mit F036

	T_{p6} [kPa]	$ G^*_{p6} _{t=0}$	MV	$ G^*_{p6} _{t=0}$	t [s]	MV t [s]	MV Last-wechsel [-]	SD t [s]	SD Last-wechsel [-]	95 %
B402A @ 290 kPa #1	290	80,5	80,1	9880	7110	8120	243.600	1286	38.566	5600
B402A @ 290 kPa #2		81,5		8230						
B402A @ 290 kPa #3		80,7		7110						
B402A @ 290 kPa #4		79,5		7480						
B402A @ 290 kPa #5		76,9		6650						
B402A @ 290 kPa #6		81,9		9370						
B461A @ 290 kPa (M2)	290	86,3	-	7510	-	225.300	-	-	-	-
B463A @ 290 kPa (M3)	290	81,7	-	8620	-	258.600	-	-	-	-
B402A @ 435 kPa #1	435	71,1	78,7	1150	1530	1578	47.350	403	12.084	2368
B402A @ 435 kPa #2		91,0		2240						
B402A @ 435 kPa #3		81,4		1590						
B402A @ 435 kPa #4		81,1		1530						
B402A @ 435 kPa #5		71,0		1190						
B402A @ 435 kPa #6		76,6		1770						
B402A @ 580 kPa #1	580	72,5	72,3	390	470	410	12.300	44	1.328	497
B402A @ 580 kPa #2		76,8		460						
B402A @ 580 kPa #3		67,3		390						
B402A @ 580 kPa #4		76,7		470						
B402A @ 580 kPa #5		70,5		390						
B402A @ 580 kPa #6		69,8		360						



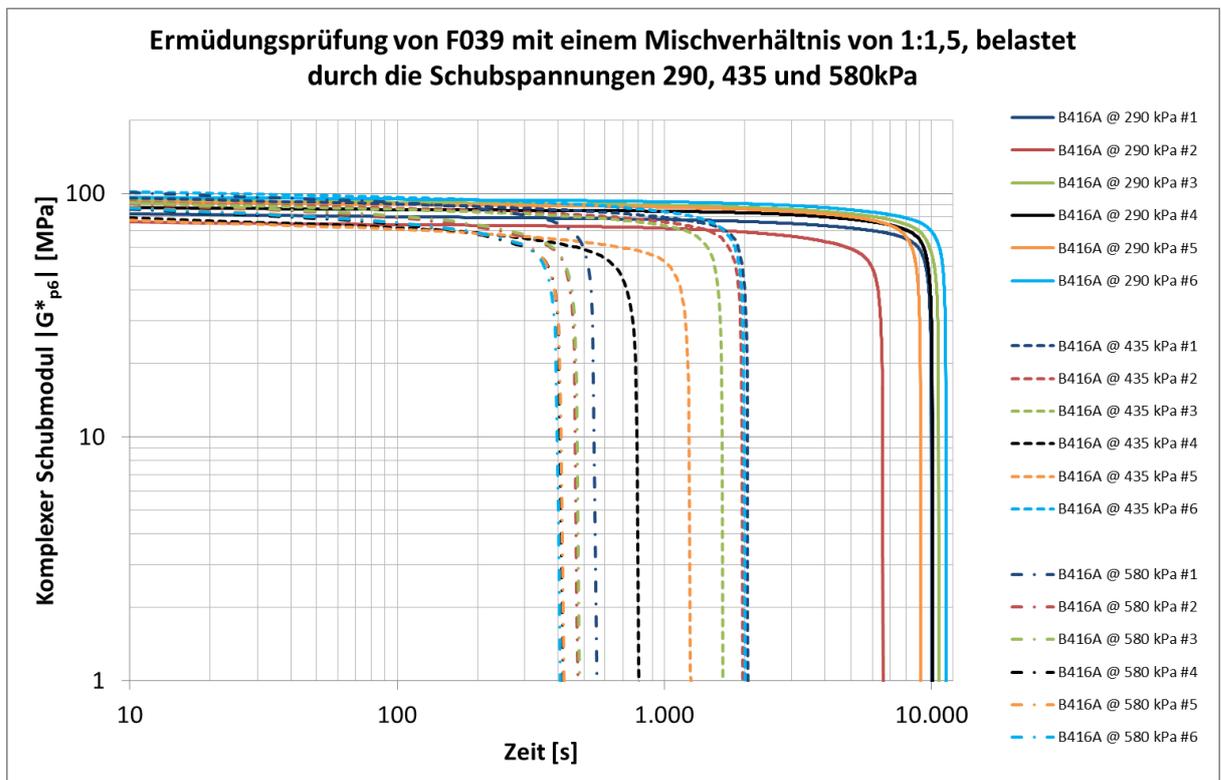
Ermüdungsversuche mit F038

	T_{p6} [kPa]	$ G^*_{p6} _{t=0}$	MV	$ G^*_{p6} _{t=0}$	t [s]	MV t [s]	MV Lastwechsel [-]	SD t [s]	SD Lastwechsel [-]	95 %
B478A @ 290 kPa #1	290	84,0	88,5	7380	9605	288.150	2162	64.867	13843	
B478A @ 290 kPa #2		91,8		10950						
B478A @ 290 kPa #3		94,3		12080						
B478A @ 290 kPa #4		86,9		8150						
B478A @ 290 kPa #5		92,1		11580						
B478A @ 290 kPa #6		82,0		7490						
B478A @ 435 kPa #1	435	78,7	86,2	1180	1733	52.000	332	9.971	2385	
B478A @ 435 kPa #2		90,2		2100						
B478A @ 435 kPa #3		88,9		1700						
B478A @ 435 kPa #4		88,6		1970						
B478A @ 435 kPa #5		88,7		1890						
B478A @ 435 kPa #6		82,3		1560						
B478A @ 580 kPa #1	580	82,0	85,8	490	523	15.700	48	1.428	617	
B478A @ 580 kPa #2		82,1		480						
B478A @ 580 kPa #3		84,9		490						
B478A @ 580 kPa #4		90,9		600						
B478A @ 580 kPa #5		86,1		520						
B478A @ 580 kPa #6		88,9		560						



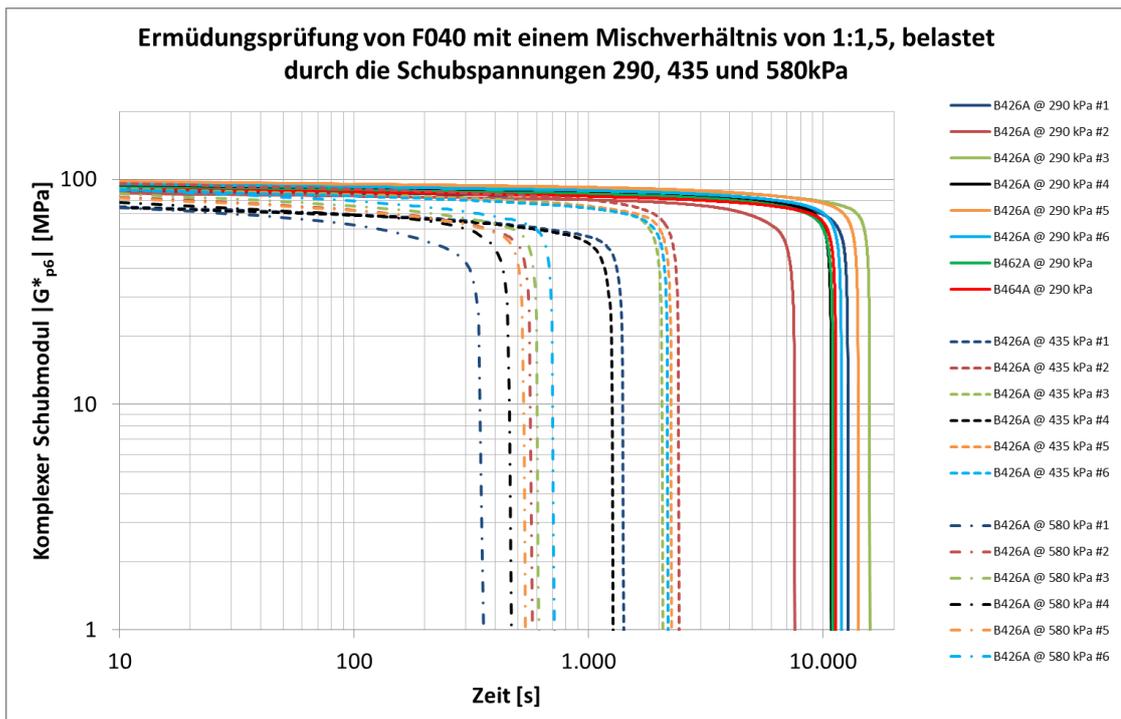
Ermüdungsversuche mit F039

	T_{p6} [kPa]	$ G^*_{p6} _{t=0}$	MV	$ G^*_{p6} _{t=0}$	t [s]	MV t [s]	MV Last- wechsel [-]	SD t [s]	SD Last- wechsel [-]	95 %
B416A @ 290 kPa #1	290	82,2	88,1	9990	9615	288.450	1659	49.770	12867	
B416A @ 290 kPa #2		76,3		6580						
B416A @ 290 kPa #3		93,7		10630						
B416A @ 290 kPa #4		87,7		10070						
B416A @ 290 kPa #5		92,0		9100						
B416A @ 290 kPa #6		96,6		11320						
B416A @ 435 kPa #1	435	95,5	89,4	2060	1625	48.750	335	10.061	2282	
B416A @ 435 kPa #2		91,9		1970						
B416A @ 435 kPa #3		91,2		1650						
B416A @ 435 kPa #4		79,1		810						
B416A @ 435 kPa #5		77,4		1260						
B416A @ 435 kPa #6		101,5		2000						
B416A @ 580 kPa #1	580	100,4	90,4	560	465	13.950	57	1.705	576	
B416A @ 580 kPa #2		90,5		480						
B416A @ 580 kPa #3		91,3		490						
B416A @ 580 kPa #4		85,9		420						
B416A @ 580 kPa #5		87,4		430						
B416A @ 580 kPa #6		86,7		410						



Ermüdungsversuche mit F040

	T_{p6} [kPa]	$ G^*_{p6} _{t=0}$	MV	$ G^*_{p6} _{t=0}$	t [s]	MV t [s]	MV Lastwechsel [-]	SD t [s]	SD Lastwechsel [-]	95 %
B426A @ 290 kPa #1	290	88,8	92,7	12780	12197	365.900	2841	85.236	17765	
B426A @ 290 kPa #2		86,5								7580
B426A @ 290 kPa #3		95,0								15820
B426A @ 290 kPa #4		93,5								10870
B426A @ 290 kPa #5		97,7								14140
B426A @ 290 kPa #6		94,9								11990
B462A @ 290 kPa (M2)	290	91,4	-	11020	-	330.600	-	-	-	
B464A @ 290 kPa (M3)	290	90,0	-	11330	-	339.900	-	-	-	
<hr/>										
B426A @ 435 kPa #1	435	75,6	86,0	1420	1942	58.250	476	14.280	2875	
B426A @ 435 kPa #2		95,7								2440
B426A @ 435 kPa #3		90,7								2070
B426A @ 435 kPa #4		74,9								1280
B426A @ 435 kPa #5		89,8								2260
B426A @ 435 kPa #6		89,6								2180
<hr/>										
B426A @ 580 kPa #1	580	75,0	82,5	360	548	16.450	124	3.730	792	
B426A @ 580 kPa #2		83,3								580
B426A @ 580 kPa #3		86,1								620
B426A @ 580 kPa #4		78,5								470
B426A @ 580 kPa #5		82,5								540
B426A @ 580 kPa #6		90,0								720



Ermüdungsversuche mit F041

	T_{p6} [kPa]	$ G^*_{p6} _{t=0}$	MV	$ G^*_{p6} _{t=0}$	t [s]	MV t [s]	MV Lastwechsel [-]	SD t [s]	SD Lastwechsel [-]	95 %
B406A @ 290 kPa #1	290	99,6	97,8	17690	17068	512.050	3014	90.407	22975	
B406A @ 290 kPa #2		100,0		18350						
B406A @ 290 kPa #3		98,5		17460						
B406A @ 290 kPa #4		103,6		19560						
B406A @ 290 kPa #5		97,1		18250						
B406A @ 290 kPa #6		88,3		11100						
B406A @ 435 kPa #1	435	93,1	96,1	3070	3387	101.600	670	20.089	4699	
B406A @ 435 kPa #2		92,8		2840						
B406A @ 435 kPa #3		98,1		3070						
B406A @ 435 kPa #4		102,3		4370						
B406A @ 435 kPa #5		90,8		2870						
B406A @ 435 kPa #6		99,5		4100						
B406A @ 580 kPa #1	580	88,7	91,1	740	832	24.950	211	6.334	1245	
B406A @ 580 kPa #2		87,7		660						
B406A @ 580 kPa #3		97,6		1160						
B406A @ 580 kPa #4		89,7		740						
B406A @ 580 kPa #5		96,5		1030						
B406A @ 580 kPa #6		86,5		660						

