

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Vergleich der Ermüdung von Asphaltprobekörpern anhand der zyklischen 4-Punkt-Biegeprüfung und der Spaltzug-Schwellprüfung

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

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Ronald BLAB

und

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Bernhard HOFKO

und

Proj. Ass. Dipl.-Ing.

Daniel STEINER

E230

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Straßenwesen
Technische Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Andrea Kranabetter

0925177

Unterwölbling 41
3124 Oberwölbling

Wien, am 14.04.2016

Kurzfassung

Asphalt wird hauptsächlich zur Oberflächenbefestigung von Straßen verwendet und dient zur Ableitung der Verkehrsbelastungen in den Untergrund. Im Laufe der Zeit treten mit zunehmender Anzahl an Überrollungen an der Unterseite der Asphaltschichten immer größere Verformungsamplituden auf, die zu einer Ermüdung und letztlich zum Versagen führen.

Die Ermüdung kann im Labor mit verschiedenen Versuchsarten nachgestellt werden. In dieser Arbeit werden die Vierpunkt-Biegebalken-Prüfung (4PBB) und der Spaltzug-Schwellversuch (IT-CY) verwendet, um festzustellen, wie groß die Lebensdauer des Asphaltes ist. Bei der 4PBB-Prüfung werden prismatische Probekörper sinusförmig belastet, wobei die Verformung in Kraftrichtung an der Unterseite des Balkens gemessen wird. Ein zylindrischer Probekörper, der ebenfalls sinusförmig belastet wird und bei dem die Verformung quer zur Kraftrichtung gemessen wird, dient als Versuchsaufbau bei der IT-CY-Prüfung.

In dieser Arbeit werden verschieden hergestellte Mischgüter anhand der verschiedenen Versuche miteinander verglichen. Es werden im Labor hergestellte Probekörper geprüft, um einen Vergleich der beiden Versuchsergebnisse aufstellen zu können. Weiters werden anhand der IT-CY-Prüfung die laborhergestellten Probekörper mit denen aus Bohrkernen der Straße hergestellten Versuchskörpern verglichen. Zum Schluss folgt noch ein Vergleich der Erstprüfung mit dem Mischgut aus Baustellenproben sowie mit den Ergebnissen der Bohrkern.

Abstract

Asphalt is mainly used as a pavement material for roads and has the main aim to derivate traffic load into the subbase. Through the years, an increasing number of load cycles leads to lager strain amplitudes at the bottom of the asphalt bound pavement layers, which lead to fatigue and finally to failure of the asphalt.

Different test types exist, which simulate fatigue in a laboratory. In this thesis the following two methods are applied, in order to define the resistance to fatigue of asphalt: 4-point bending test (4PBB) and indirect tension test (IT-CY). In the 4-point bending test prismatic test specimens are being sinusoidally loaded and deformation is measured in direction of the force underneath the beam. A cylindrical test specimen serves as an experiment set-up at the IT-CY-test. This test specimen is also loaded sinusoidally and the deformation is measured transversely to the direction of the force.

In this thesis a variety of laboratory and field compacted specimens are being compared with each other on the basis of different test methods. Test specimens which were produced in a laboratory are tested in order to establish a comparison between the two experimental results. Furthermore, the IT-CY-test is applied where test specimens from a laboratory are compared to test specimens from field cores. Finally, results from identification testing are compared to results from acceptance testing in the field.

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit wurde am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen, an der TU Wien verfasst.

Ich möchte mich beim gesamten Team des Labors des Forschungsbereichs für Straßenwesen für die Unterstützung beim Schreiben meiner Arbeit bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Daniel Steiner, der mir immer tatkräftig zur Seite stand, wie auch Dipl.-Ing. Georgi Chankov, der mir den Versuchsaufbau sowie den Ablauf der verschiedenen Prüfungen näher brachte und mich in die verschiedenen Maschinen einwies.

Weiters möchte ich mich bei Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko bedanken, da ich sofort ein Thema für eine Projekt- und Diplomarbeit erhielt und bei beiden Arbeiten immer auf vollste Unterstützung zählen konnte.

Auch Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab gilt besonderer Dank für die Bereitstellung des Themas und dass ich in seinem Institut so nett aufgenommen wurde.

Für die großartige Unterstützung von Thomas Riedmayer, David Valentin, Pia Mandahus, BSc und Univ.Ass. Dipl.-Ing. Markus Hospodka möchte ich mich ebenfalls bedanken. Sie waren immer für mich da, egal ob bei wissenschaftlichen Fragen oder Fragen privater Natur.

Auch meine Studienkollegen/innen verdienen ein großes Lob, da die gemeinsam verbrachten Stunden und Tage an der Uni unbezahlbar waren und nur so einige schwierige Prüfungen geschafft werden konnten.

BA Biljana Rößler sowie Dipl.-Päd. Petra Wolfsberger, MSc, gilt ein besonderer Dank. Die Unterstützung in Form von Korrekturlesen sowie die Verbesserung meiner Englischkenntnisse waren einfach großartig.

Abschließend möchte ich mich noch bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Ohne die finanzielle Unterstützung meiner Eltern und Großeltern wäre mein Studium nicht in dieser Zeit absolvierbar gewesen. Weiters möchte ich mich bei meinem Bruder Stefan, meiner restlichen Familie sowie meinen Freunden/innen für die aufbauenden Worte in den letzten Jahren bedanken, da sie mir die nötige Motivation gaben, um mein Ziel zu erreichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	9
2	Stand der Technik.....	11
2.1	Asphalttechnologie.....	11
2.1.1	Asphalt allgemein (Neroth & Vollenschaar, 2011).....	11
2.1.2	Asphalttypen (Müller & Vasiljevic, 2010).....	11
2.1.3	Asphaltbezeichnungen.....	13
2.1.4	Asphaltprüfungen.....	15
2.2	Bitumen.....	15
2.2.1	Definition.....	15
2.2.2	Gewinnung von Bitumen	15
2.2.3	Chemische Struktur von Bitumen.....	16
2.2.4	Rheologische Eigenschaften von Bitumen (Hartner, 2010)	17
2.2.5	Bitumenarten.....	18
2.3	Gestein.....	19
2.3.1	Gesteinsarten.....	19
2.3.2	Füller (Müller & Vasiljevic, 2010)	21
2.4	Ermüdung.....	22
2.4.1	Allgemein	22
2.4.2	Straßenbau.....	24
3	Ermittlung der Ermüdungsbeständigkeit im Labor.....	29
3.1	Ermüdungsprüfmethoden	29
3.1.1	4-Punkt-Biegeprüfung.....	29
3.1.2	Spaltzug-Schwellprüfung.....	30
3.2	Aufbau der Prüfmaschine	31
3.3	Einflussgrößen	34
3.4	Ermittlung der Steifigkeiten des Asphalts	36
3.5	Ermittlung Wöhlerkurve für beide Verfahren	42
4	Materialien und Prüfparameter	44
4.1	Materialien.....	44
4.1.1	Bitumen.....	44
4.1.2	Asphaltmischgut.....	44

4.2	Herstellung der Probekörper	46
4.2.1	Kenngößen und Herstellung der Probekörper	46
4.3	Laborcodes	50
4.4	Ermittlung der Raumdichte der Probekörper	52
4.4.1	Statistische Auswertung der Raumdichte	53
5	Vorversuche.....	57
6	Ergebnisse und Interpretation.....	59
6.1	Einzelergebnisse	59
6.1.1	Laborhergestellte Probekörper 4PBB	59
6.1.2	Laborhergestellte Probekörper IT-CY	60
6.1.3	Probekörper aus Bohrkernen IT-CY.....	63
6.2	Vergleich der Ermüdungsbeständigkeiten	64
6.2.1	Vergleich IT-CY Labor – Bohrkern.....	65
6.2.2	Vergleich 4PBB - IT-CY Labor	67
6.2.3	Vergleich Erstprüfung/Mischgut aus Baustellenprobe/Bohrkerne.....	70
7	Zusammenfassung und Ausblick	72
I.	Literaturverzeichnis	74
II.	Abbildungsverzeichnis	76
III.	Tabellenverzeichnis.....	77

Häufig verwendete Abkürzungen

4PBB	Vierpunkt-Biegebalken
IT-CY	Indirect Tension Test - Indirekter Zugversuch (Spaltzug-Schwellversuch)
PK	Probekörper
GVO	gebrauchsverhaltensorientiert

1 Einleitung

Asphalt ist ein Gemisch aus Bitumen bzw. bitumenhaltigem Bindemittel und Gestein und wird im Straßenbau zur Oberflächenbefestigung verwendet. In Österreich ist es das am häufigsten verwendete Material, denn 95 % der Straßen sind mit Asphalt befestigt (Gestrata).

Die Aufgaben von Asphalt sind

- die Aufnahme der Verkehrslasten und dessen Ableitung in den Untergrund,
- die Gewährleistung eines möglichst hohen Nutzerkomfort in Abhängigkeit von Witterung und Verkehrsbelastungen und
- die Geringhaltung seiner Lebenszykluskosten (Blab, 2007).

Die Achslasten der Fahrzeuge und das Verkehrsaufkommen stiegen in den letzten Jahren immer weiter an. Deshalb ist es wichtig, dass an das Asphaltmischgut hohe Anforderungen gestellt werden, damit die Erhaltungskosten der Straße minimal sind (Blab, 2007).

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde eine neue Europäische Norm (EN 13108) entwickelt, die 2007 auch für Österreich übernommen wurde. 2013 konnten dann erstmals nach der neuen RVS 08.97.06 gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen an den Asphalt gestellt werden. Gebrauchsverhaltensorientiert bedeutet, dass Aussagen über das Gebrauchsverhalten des Asphalts im eingebauten Zustand getroffen werden können. Diese Aussagen beinhalten die Kenngrößen der Steifigkeit, die Beständigkeit gegen Ermüdung, die Beständigkeit gegen Kälterisse sowie die Beständigkeit gegen seine bleibende Verformung des Asphalts (Blab, 2006).

Da die Ausschreibung von Straßenbauprojekten in Österreich bis dahin nicht nach diesen neuen Festlegungen der RVS 08.97.06 stattfand, beschloss die Asfinag 2014, auf der A1 eine Untersuchungsstrecke anzulegen, um künftige Bauvorhaben nach diesen Anforderungen ausschreiben zu können. 2015 wurde das Projekt auf der Höhe von Böheimkirchen in Fahrtrichtung Salzburg realisiert (Hofko, Steiner, & Kluger-Eigl, 2016). Da die Steifigkeit sowie die Ermüdung sehr aussagekräftige Kennwerte des Gebrauchsverhaltens von Asphalt darstellen, werden diese in der nachfolgenden Arbeit anhand verschiedener Prüfmethode sowie verschieden hergestellter Probekörper genauer untersucht.

Die Ermüdung wird folgendermaßen definiert: „Verringerung der Festigkeit eines Materials bei wiederholter Belastung im Vergleich mit der Festigkeit unter einer Einzellast“ (CEN, 2012c). Das bedeutet, dass auch eine statisch unkritische Belastung zu einer Funktionsuntüchtigkeit (Ermüdungsrisse) oder auch zum Totalausfall (Ermüdungsbruch) eines Bauteils führen kann, wenn sie oft genug auf das Bauteil einwirkt (Wikipedia, 2016). Dieser Effekt tritt in der Asphaltschicht auch durch die Verkehrs- und Temperaturbelastungen auf.

Die Bestimmung der Steifigkeit als auch der Ermüdung kann mit folgenden Prüfmethoden erfolgen:

4-Punkt-Biegeprüfung (4PBB-PR) und Spaltzug-Schwellversuchs (Indirekte Zugprüfung an zylindrischen Probekörpern, IT-CY). Bei beiden Prüfungen ist das Ziel, die theoretische Lebensdauer der Asphalttschicht durch Lang- bzw. Kurzzeitversuche bestimmen zu können. Anhand der Kurzzeitversuche kann die Steifigkeit des Materials errechnet werden, die Materialermüdung kann mit Langzeitversuchen ermittelt werden (Blab, 2006).

Die beiden Prüfungen unterscheiden sich anhand der Versuchsanordnung: Bei der 4PBB-PR werden prismatische Probekörper über einen Belastungsrahmen sinusförmig belastet. Die Verformungen werden auf den Probekörperunterseiten in Belastungsrichtung gemessen. Beim Spaltzug-Schwellversuch erfolgt die Belastung auf die zylindrischen Probekörper ebenso vertikal, jedoch wird die Verformung auf Höhe des Mittelpunktes in horizontale Richtung gemessen (CEN, 2012c).

In dieser Arbeit werden die beiden Versuche anhand verschieden hergestellter Probekörper verglichen. Einerseits werden Vierpunkt-Biegebalken-Versuche mit den Ergebnissen der indirekten Zugversuche von im Labor hergestellten Probekörpern verglichen. Andererseits erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse von Spaltzug-Schwellversuchen von im Labor hergestellten Probekörpern mit Probekörpern, die aus Bohrkernen herausgeschnitten wurden. Zum Schluss erfolgt noch ein Vergleich der Erstprüfung mit Mischgut aus den Baustellenproben sowie den nachträglich gezogenen Bohrkernen. Das Ziel dieser Arbeit ist, eine allgemeine Aussage über die Vergleichbarkeit der Prüfverfahren, deren Ergebnisse sowie der verschieden hergestellten Probekörper treffen zu können.

In Kapitel 2 „Stand der Technik“ wurden Literaturrecherchen zu den Themen straßenbautechnische Grundlagen und Ermüdung durchgeführt. Kapitel 3 „Ermittlung der Ermüdungsbeständigkeit im Labor“ beschreibt die gebrauchungsverhaltensorientierten Ermüdungsversuche für Asphaltprobekörper und die dabei untersuchten Parameter. Die Materialien und Versuchsmethoden, die benötigt wurden, um Probekörper herzustellen bzw. um die Steifigkeiten der Versuche auswerten zu können bzw. zu vergleichen, werden in Kapitel 4 „Materialien und Prüfmethoden“ beschrieben. Im Kapitel 5 „Vorversuche“ wird der Einfluss der Prüftemperatur auf die Steifigkeit dargestellt. Die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeprüfung an laborhergestellten Probekörpern und der Spaltzug-Schwellversuche an im laborhergestellten und aus Bohrkernen hergestellten Probekörpern sind in Kapitel 6 „Ergebnisse und Interpretationen“ dargestellt. Weiters wurde Vergleiche der verschiedenen Prüfungen aufgestellt sowie die Erstprüfung mit einem Mischgut aus Baustellenproben und den Bohrkernen verglichen.

2 Stand der Technik

2.1 Asphalttechnologie

2.1.1 Asphalt allgemein (Neroth & Vollenschaar, 2011)

Im Straßenbau wird Asphalt aus Bitumen oder bitumenhaltigen Bindemitteln sowie ca. 95 Masse-Prozent (ab jetzt immer M.-% abgekürzt) Gesteinskörnung hergestellt. Diese Asphaltmischgüter werden in großen stationären Mischwerken hergestellt.

Asphalt hat die Aufgabe, die Verkehrsbelastungen in Form von Druckkräften aufzunehmen und diese in die darunterliegenden Schichten abzuleiten. Die Kornstruktur im Asphaltmischgut überträgt diese Kräfte in den Untergrund. Die Gesteinskörnung dient an der Oberfläche als Schutz vor Verschleiß, und somit wird eine dauerhafte Griffigkeit erreicht. Das Bitumen ist wasserundurchlässig und dichtet dadurch die Asphaltschicht vor eindringendem Wasser ab. Zugspannungen und Temperatureinwirkungen können durch das viskoelastische Verhalten des Bitumens aufgenommen werden.

Die Lebensdauer des Asphaltes ist vor allem vom Verdichtungszustand sowie vom Hohlraumgehalt abhängig. Er sollte möglichst dicht sein, weil so kein Wasser, keine Luft bzw. kein Schmutz eindringen kann. Das Wasser kann bei Frost zu Sprengwirkungen führen, die Luft führt zu einer Verhärtung des Bindemittels und der Schmutz kann zu innerer Ausmagerung führen. Jedoch ist es genauso wichtig, dass der Asphalt nicht zu dicht ist, denn dabei handelt es sich um eine Überfettung, das heißt einen schädlichen Bindemittelüberschuss. Dabei schwimmen die Körner im Bindemittel und können so die Spannungen nicht mehr ableiten. Bei zu großem Überschuss kann der Asphalt zu schwitzen beginnen, das heißt, das überschüssige Bitumen weicht nach oben an die Oberfläche aus. In diesem Fall ist der Asphalt nicht mehr tragfähig und es kommt zu sehr großen Verformungen.

2.1.2 Asphalttypen (Müller & Vasiljevic, 2010)

Es gibt verschiedene Kriterien, um Asphalte einzuteilen: Funktion bzw. Position und Kornzusammensetzung. Die Einteilung im Straßenoberbau in Funktion bzw. Position erfolgt in Trag- und Deckschicht. Die Einteilung nach der Kornzusammensetzung ist jedoch etwas schwieriger, denn hier wird unterschieden in Asphalte mit stetiger Kornzusammensetzung (Asphaltbetone) und Asphalte mit Ausfallskörnung (Drainasphalt, Splittmastixasphalt und Lärmindernder Dünnschichtdeckenasphalt). Zusätzlich gibt es dann noch den Gussasphalt, wobei dieser aber nach einem anderen volumetrischen Konzept hergestellt wird.

Asphaltbetone AC (asphalt concrete), (Müller & al., 2010)

Asphaltbetone und Walzasphalte charakterisieren sich durch ihre Sieblinie, da sich die stetige Korngrößenverteilung mit dem Fullerprinzip erstellen lässt. Das heißt, dass von jeder Korngruppe Gesteine vorhanden sind und so eine sehr dichte Lagerung gewährleistet werden kann - wie bei Beton. Sie unterteilen sich in Trag-, Binder- und Deckschicht. Tragschichten dienen zur Aufnahme und Verteilung von Verkehrslasten. Es dürfen keine unzulässigen Verformungen auftreten, weiters sollen sie die Schubspannungen, die durch Verkehrsbelastungen entstehen, aufnehmen und abbauen. Tragdeckschichten werden vor allem in Bereichen mit niederen Lastklassen eingesetzt, da diese über längere Zeit als Deckschichten genutzt werden und somit einen dichteren Aufbau benötigen. Deckschichten sind der oberste Abschluss des Oberbaus, werden direkt vom Verkehr belastet und dienen zum Schutz der Tragschicht. Hier können verschiedenste Asphaltpyten zum Einsatz kommen wie Lärmindernde Dünnschichtdecke, Splittmastixasphalt, Gussasphalt und Drainasphalt.

Lärmindernde Dünnschichtdecke BBTM (Müller & al., 2010)

Dünnschichtdecken haben eine maximale Einbauhöhe von 2,5 cm und werden heiß auf Asphalt- bzw. Betonschichten eingebaut. Das Größtkorn ist mit 4 bzw. 8 eingeschränkt und es darf nur polymermodifizierter Bitumen verwendet werden. Diese Deckschichten haben dieselben Eigenschaften wie Asphaltbeton-Dünnschichtdecken. Jedoch muss bei der Zusammensetzung der Grobsplittanteil auf 60 M.-% und somit der Feinsplitt- bzw. Sandanteil vermindert werden, denn so entsteht ein Hohlraumgehalt von 7-13 Volumsprozent (ab jetzt immer V% abgekürzt), und dies führt zu einer Lärminderung des Rollgeräusches. Die Wasserableitung erfolgt an der Oberfläche.

Splittmastixasphalt SMA (stone mastic asphalt),(Müller & al., 2010)

Der SMA hat die Eigenschaft, sehr hohen Belastungen standzuhalten und sehr standfest zu sein. Die Kornverteilung ist so ähnlich wie beim BBTM (hoher Grobsplittanteil, geringer Feinsplitt- bzw. Sandanteil, hoher Füllergehalt), wobei hier aber auch Straßenbaubitumen verwendet werden darf. Die Griffigkeit der Oberfläche ist aufgrund des hohen Bindemittelanteils in den ersten Monaten nicht so hoch wie bei anderen Asphaltdecken, darum wird die Oberfläche abgestumpft bzw. nach dem ersten Walzvorgang Abstreusplitt eingewalzt.

Drainasphalt PA (porous asphalt),(Müller & al., 2010)

Diese Deckschicht ist durch einen sehr hohen Hohlraumgehalt von mehr als 17 V% gekennzeichnet. Der Grobsplittanteil wird im Gegensatz zum SMA weiter erhöht und somit entsteht ein maximaler Hohlraumgehalt bei ausreichender Stabilität. Es wird so der Korn-zu-Korn-Kontakt verringert und an der Oberfläche entsteht eine reduzierte Kontaktfläche zum Reifen. Die größten Vorteile des Drainasphaltes sind die Wasserableitung durch den Belag

und die lärm mindernden Eigenschaften. Jedoch bergen diese auch Nachteile, da Oxidationsmittel auch innenliegendes Bitumen umströmen und so eine schnellere Alterung erfolgt. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Winterdienst häufiger benötigt wird, da die Salzaufbringung nicht mehr wirksam ist.

Gussasphalt MA (mastic asphalt),(Müller & al., 2010)

Das volumetrische Gefüge von Gussasphalt zeichnet sich im Gegensatz zu den anderen Asphaltarten dadurch aus, dass die Asphaltschicht frei von Hohlräumen ist. Das bedeutet, dass die Hohlräume des Gesteingerüsts des Gussasphaltes vollkommen mit Bindemittel ausgefüllt sein müssen.

Weiters muss der Fülleranteil zwischen 25 und 30 % liegen, wobei meist Kalksteinmehl verwendet wird, damit der Asphalt verarbeitbar bleibt (Piringer & Schiller, 2009).

Dadurch entstehen die Eigenschaften gieß- und streichbar sowie selbstverdichtend. Das wird nur erreicht, wenn eine Korngrößenverteilung vorliegt, die hohlraumarm ist, und wenn der Bindemittelgehalt ausreichend hoch ist.

Der Gussasphalt, der hauptsächlich maschinell mittels Gussasphalt-Fertigern eingebaut wird (Piringer & Schiller, 2009), kann auf bituminösen Trag- und Deckschichten sowie auf Beton eingesetzt werden, jedoch ist bei Beton eine Dampfschicht vorzusehen.

2.1.3 Asphaltbezeichnungen

Die Aufgabe von Asphalt ist die Aufnahme der Verkehrslasten und dessen Ableitung in den Untergrund. Asphalt soll in Abhängigkeit von Witterung sowie Verkehrsbelastungen einen möglichst hohen Nutzerkomfort bieten und die Lebenszykluskosten sollen gering gehalten werden. Wie schon eingangs erwähnt sind in den letzten Jahrzehnten die Achslasten der Fahrzeuge sowie das Verkehrsaufkommen immer weiter gestiegen. Daher ist eine hohe Qualität des Asphaltmischguts entscheidend, um die die Erhaltungskosten der Straße gering zu halten (Blab, 2007).

In den europäischen Ländern waren jedoch diese Anforderungen nur länderspezifisch genormt und unterschieden sich anhand der Kennwerte und der Prüfmethoden. Deshalb entwickelte man die Europäische Norm EN 13108, und diese wurde 2007 vom österreichischen Normungsinstitut größtenteils übernommen. Die Anforderungen an Asphaltbeton nach der neuen Norm ÖNORM 3580 können in die allgemeinen Anforderungen (empirischer Ansatz) und die gebrauchsvorhaltensorientierten Anforderungen (fundamentaler Ansatz) eingeteilt werden. Der Auftraggeber kann somit nach dem empirischen oder dem fundamentalen Ansatz den Asphalt für sein Bauvorhaben ausschreiben (Blab, 2007).

Beide Ansätze beinhalten einen Teil an allgemeinen Anforderungen, der bei beiden gleich ist. Bei den empirischen Anforderungen werden zusätzlich noch Verfahren zur Bestimmung des

Bindemittelgehalts, der Marshall-Werte bei Flugbetriebsflächen und der volumetrische Kenngrößen gefordert. Diese Prüfungen werden beim fundamentalen Ansatz durch Versuche zur Steifigkeit, Beständigkeit gegen Ermüdung und Beständigkeit gegen bleibende Verformung ersetzt. Bei Prüfungen nach dem fundamentalen Ansatz kann eine genauere Aussage über das Gebrauchsverhalten des Asphaltes im eingebauten Zustand gegeben werden (Blab, 2006).

In der RVS 08.97.05 (FSV, 2012) werden die Anforderungen an Asphaltmischgut anhand des empirischen Verfahrens eingeteilt und gekennzeichnet.

Beispiel: AC 22 binder PmB 45/80-65, H1, G5

AC	Asphaltbeton
22	Größtkorn
binder	Binderschicht
PmB 45/80-65	Bitumensorte
H1	Typ
G5	Gesteinsklasse

Der Typ wird so erklärt: Es handelt sich um einen Mischgutttyp abhängig von Sieblinie, Hohlraumgehalt und weiteren Anforderungen. Die Gesteinsklasse lässt sich folgendermaßen beschreiben: Die geforderte Gesteinsklasse muss den Anforderungen lt. Produktnorm des Asphaltmischguts entsprechen (FSV, 2012).

In der RVS 08.97.06 (FSV, 2013) werden die Asphaltmischgüter nach den neuen gebrauchsverhaltensorientierten Anforderungen eingeteilt. Die Bezeichnungen dieser Asphaltmischgüter werden anhand eines Beispiels nachfolgend erläutert:

Beispiel: AC 22 binder PmB 45/80-65, V1, G4

AC	Asphaltbeton
22	das verwendete Größtkorn des Gesteins
binder	Binderschicht
PmB 45/80-65	Bindemittelsorte, darf bei der Ausschreibung nicht angegeben werden; dominierendes Bindemittel, ist erst bei der Deklaration zu kennzeichnen;
V1	Verformungsbeständigkeit
G4	Gesteinsklasse (FSV, 2013)

Die Bezeichnung erfolgt bis auf den vorletzten Teil wie in der RVS 08.97.05. Um den Unterschied zu erkennen, wird dieser Teil nachfolgend genauer erläutert:

Der GVO-Ansatz beschreibt die Asphaltgüter mit den Buchstaben „R, V und E“. R steht für die erhöhte Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen, V für die erhöhte Verformungsbeständigkeit und E für die erhöhte Ermüdungsbeständigkeit. Deckschichten werden nach R, Tragschichten nach E und Binderschichten nach V ausgeschrieben. Die Hauptbeanspruchung der Binderschicht ist die Verkehrsbelastung, auch Temperatureinwirkungen werden berücksichtigt. Die Riss- und Ermüdungsbeständigkeit wird nur mehr gering herangezogen. Je niedriger die angegebene Zahl ist, desto größer ist die Verformungsbeständigkeit, das heißt, V1 ist die höchste. Weiters gibt diese Ziffer auch eine Beständigkeit gegen Ermüdungsrisse und, in eingeschränktem Maße, gegen Tieftemperaturrisse an. Auch hier gilt das Schulnotensystem. Das heißt, je niedriger die Zahl, desto besser ist die Beständigkeit (Kappl, 2011).

2.1.4 Asphaltprüfungen

2.2 Bitumen

2.2.1 Definition

„Bitumen ist ein nahezu nichtflüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich ist. Bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos oder nahezu fest.“

So lautet die Definition des Bitumens in der EN 12597 (CEN, 2012a).

2.2.2 Gewinnung von Bitumen

Bitumen entsteht durch ein Raffinerieverfahren aus Erdöl und besteht aus verschiedenen organischen Substanzen. Je nach Herkunftsort ist die chemische Zusammensetzung verschieden, aber die Gebrauchseigenschaften sind nahezu gleich. Bei dem Verfahren werden zuerst aus dem Erdöl Treibstoffe wie Diesel, Benzin und Kerosin sowie leichte und schwere Öle durch fraktionierte Destillation gewonnen. Danach folgt eine Vakuumdestillation, wobei Gas- und Schmieröle entstehen. Als Restprodukt, welches nicht mehr weiter verwertet werden kann, fällt Bitumen an. Dieses Bitumen besteht hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen und Kohlenwasserstoffderivaten sowie aus Schwefel, Stickstoff und Sauerstoff (Neroth & Vollenschaar, 2011).

2.2.3 Chemische Struktur von Bitumen

Diese reinen Kohlenwasserstoffe verhindern, dass die genaue Zusammensetzung von Bitumen bekannt ist, da es aus vielen homologen Kohlenwasserstoff-Gruppen besteht und so die Trennung in Einzelkomponenten nicht möglich ist. Es kann nur eine Trennung in Komponentengruppen erfolgen, wobei in folgende Gruppen unterschieden wird (Hartner, 2010):

- n- Alkane
- i-Alkane
- Naphthene
- Naphthenaromaten
- Aromaten
- Hochmolekulare Aromaten

Die chemische Zusammensetzung ist im Vergleich zu den mechanischen Eigenschaften nicht so wichtig, da die große Anzahl chemischer Stoffe der gleichen Stoffgruppe die nahezu gleichen Gebrauchseigenschaften aufweisen und so die Struktur des Bitumens maßgebend ist (Hartner, 2010).

Die mikro-physikalische Struktur von Bitumen wird wie in Abbildung 2 mit dem SARA Modell beschrieben. SARA steht für saturates, aromatics, resins, asphaltenes.

Dabei unterscheidet man in:

- Maltene (sind viskos und haben eine geringe Polarität),
- Harze und Aromate,
- Paraffine und
- Asphaltene, die spröde-elastisch sind und eine hohe Polarität besitzen (Eberhardsteiner, 2014).

Handle entwickelte ein Modell (siehe Abbildung 1), um die Struktur besser darstellen zu können:

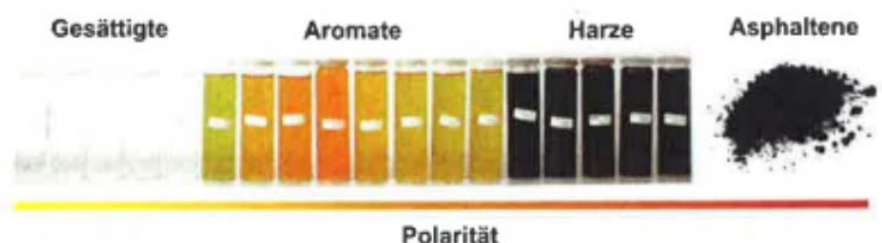


Abbildung 1: Darstellung der Bitumenauftrennung nach Polarität der Bestandteile (Handle, 2013)

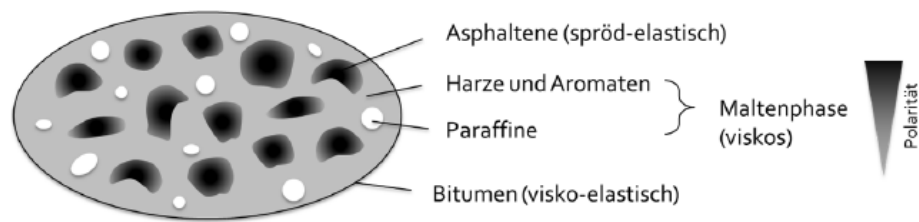


Abbildung 2: Modell der mikro-physikalischen Struktur von Bitumen (Eberhardsteiner, 2014)

Es kann in diesem Modell in die disperse und in die kontinuierliche Phase unterschieden werden. Die disperse Phase enthält die Asphaltene und Harze, wobei diese eine hohe Polarität aufweisen. Die Maltene, welche aus Alkanen, Naphthenen und Naphthenaromaten bestehen, gehören zur kontinuierlichen Phase und haben eine geringe Polarität (Eberhardsteiner, 2014).

Diese beiden Phasen können mit n-Heptan voneinander getrennt werden (Hartner, 2010).

In Abbildung 2 erkennt man, dass die n-Heptan unlösliche Phase (Asphaltene) in der n-Heptan löslichen Phase (Maltene) vorhanden ist. Maltene sind hochviskose Flüssigkeiten und Asphaltene ein schwarzes Pulver (nach Fraktionierung und bei Raumtemperatur). Durch dieses Zusammenwirken der Asphaltene und Maltene entstehen die Eigenschaften thermo-viskos und viskoelastisch (Eberhardsteiner, 2014).

2.2.4 Rheologische Eigenschaften von Bitumen (Hartner, 2010)

Die wichtigsten Eigenschaften von Bitumen lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Konsistenz
- Fließverhalten
- Haftverhalten
- Alterung

Diese Eigenschaften werden anhand vieler Merkmale und Prüfmethode beschrieben.

Das Fließverhalten von Bitumen basiert auf zwei wichtigen physikalischen Gesetzen: der Viskosität und der Elastizität. Diese Eigenschaften sind von der Temperatur abhängig. Bitumen hat ein rein viskoses Verhalten bei hohen Temperaturen, das heißt, die Verformungen bleiben erhalten (nicht reversibel). Weiters sind die Schubspannungen und das Schergefälle streng proportional, und dieser Proportionalitätsfaktor ist gleich der Viskosität. Bitumen wird bei tiefen Temperaturen rein elastisch, das heißt, die Verformungen sind reversibel. Der Proportionalitätsfaktor entspricht hier dem Elastizitätsmodul und ist so vom Hooke'schen Gesetz abhängig. In den Temperaturbereichen, in denen Bitumen verwendet wird, liegen die Eigenschaften genau zwischen den idealisierten Zuständen. Deshalb sind komplexe Modelle erforderlich, um diese beiden Bereiche zu vereinen. Eines

dieser Modelle ist von Maxwell entwickelt worden, wobei hier das Verhalten des Bitumens anhand von Federn und Dämpfern erklärt werden kann.

2.2.5 Bitumenarten

Die Einteilung des Bitumens erfolgt nach EN 12597 (CEN, 2012a). Es wird unterteilt in Straßenbaubitumen, modifiziertes Bitumen, Spezialbitumen, Industriebitumen, Fluxmittel, verschnittenes Bitumen, gefluxtes Bitumen und Emulsion. Da diese Arbeit von Asphalt handelt, der im Straßenbau eingesetzt wird, wird auch nur näher auf das Straßenbaubitumen sowie das modifizierte Bitumen eingegangen (CEN, 2012a).

Die Definition von Straßenbaubitumen laut EN 12597 lautet (CEN, 2012a):

„Bitumen zur Ummantelung von Körnungen und/oder Recyclingasphalt, das hauptsächlich zur Herstellung von Asphalt für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen und im Wasserbau verwendet wird.“

Straßenbaubitumen unterscheidet sich weiters in folgende Kategorien:

- weiches Straßenbaubitumen
- hartes Straßenbaubitumen
- air-rectified Bitumen (CEN, 2012a)

Ob weiches oder hartes Straßenbaubitumen vorliegt, erkennt man durch Bestimmung der Sorte des Bitumens. Der erste Teil der Bezeichnung erfolgt durch den Penetrationsversuch, der zweite Teil wird anhand des Erweichungspunkts-Ring und Kugel eingeteilt (Hartner, 2010).

Bei der Nadelpenetration bei 25°C wird eine genormte Nadel für 5 Sekunden mit 100 g belastet und die Eindringtiefe bei 25°C in das Bitumen gemessen. Der Höchstwert liegt bei 900 x 0,1 mm, alle weicheren Bitumen werden als Weichbitumen bezeichnet. Diese werden dann mittels ihrer Viskosität bei 60°C definiert. Die Bitumensorten 10/20 und 15/25 werden in Österreich als hartes Straßenbaubitumen bezeichnet und dienen dazu, hochfesten Asphalt herzustellen (Hartner, 2010).

Der Erweichungspunkt wird mithilfe von Ring und Kugel bestimmt, weil Bitumen keinen definierten Schmelzpunkt hat und deshalb nicht so einfach vergleichbar wäre. Eine definierte Bitumenschicht wird gleichmäßig erwärmt und mit einer Stahlkugel belastet. Die Temperatur, bei der eine bestimmte Verformung auftritt, wird als Erweichungspunkt bezeichnet. Der Erweichungspunkt wird höher, je härter das Bitumen ist (Hartner, 2010).

Air-rectified Bitumen ist Bitumen, das das Ziel hat, die Spezifikationen von Straßenbaubitumen zu erreichen. Es gibt Unterschiede in der Herstellung, da dieses Bitumen durch milde Oxidation hergestellt wird (CEN, 2012a).

Modifiziertes Bitumen unterscheidet sich vom Straßenbaubitumen durch die Zusammensetzung. Beim modifizierten Bitumen werden ein oder mehrere chemische Zusätze bei der Herstellung verwendet, um die rheologischen Eigenschaften des Bitumens zu verändern. Diese chemischen Zusätze können

- Naturkautschuk,
- synthetische Polymere,
- Wachse,
- Schwefel und
- bestimmte Organometallverbindungen sein (CEN, 2012a).

Wenn nur eine oder mehrere organische Polymere dem Bitumen hinzugefügt werden, nennt man diesen polymermodifiziertes Bitumen (PmB). Der Vorteil des PmB liegt darin, dass die Strukturviskosität bei hohen Temperaturen geändert wird und so die Temperaturspannweite, bei der Bitumen verwendet werden kann, größer wird (Hartner, 2010).

Das Einsatzgebiet des polymermodifizierten Bitumens liegt im hochrangigen Straßennetz. Anhand eines Beispiels, das in

Tabelle 1 zu finden ist, werden die Eigenschaften und Anwendungsbereiche von PmB genauer beschrieben (Hartner, 2010).

Tabelle 1: Eigenschaften und Anwendungsbereiche von PmB 45/80-65 (Hartner, 2010)

<i>Besondere Eigenschaften</i>	<i>Anwendungsbereich</i>
<i>hohe Verformungsstabilität</i>	<i>Dünnschichtdecken</i>
<i>sehr große Plastizitätspanne</i>	<i>Drainasphalt</i>
<i>ausgezeichnetes Haftverhalten</i>	<i>Splittmastix</i>
<i>besonders elastische Eigenschaften</i>	<i>polymermodifizierter Walzasphalt</i>
<i>sehr gutes Tieftemperaturverhalten</i>	<i>hochstandfeste Tragschichte</i>

2.3 Gestein

2.3.1 Gesteinsarten

Gesteinskörnungen lassen sich am besten anhand ihrer Entstehung unterteilen:

Natürliche Gesteinskörnungen bestehen aus Mineralien, die ausschließlich mechanisch aufbereitet werden (Chemie.de, 2016a) und anhand ihrer Korngröße unterteilt werden können:

- Festgestein
 - o Fels
- Lockergestein
 - o Steine
 - o Kies
 - o Sand
 - o Schluff
 - o Ton

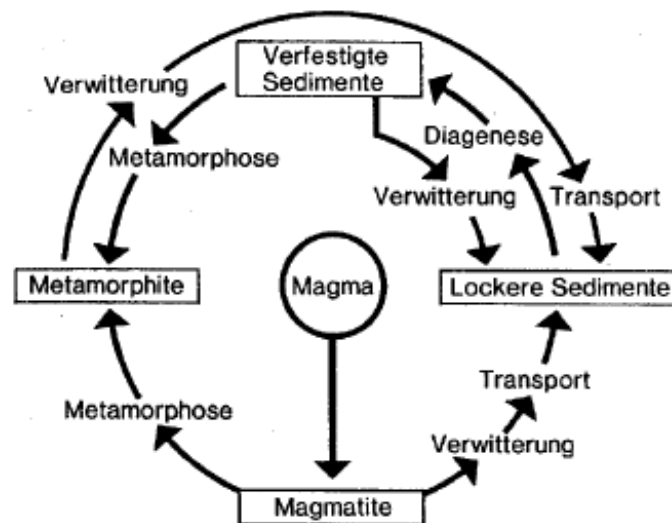


Abbildung 3: Kreislauf der Minerale (Schumann, 1975)

Diese Gesteine, die aus der Erdrinde entnommen werden, entstanden als natürlicher und einheitlicher Bestandteil über tausende Jahre (Krzemien, 2010). Aufgrund des Entstehungsorts lassen sie sich, wie in Abbildung 3 ersichtlich, unterteilen in:

Erstarrungsgesteine

Diese werden auch Magmatite genannt. Dabei unterscheiden sich die Erstarrungsgesteine anhand des Orts der Erstarrung. Die Vulkanite entstehen durch Auskühlung und Ablagerung von flüssigem Magma, das als Lava an die Erdoberfläche kommt. Die Plutonite (Mineralien der Tiefengesteine) erstarren in der Erdkruste, welche sich mehrere tausend Meter unter der Erdoberfläche befindet. Hier findet die Abkühlung langsamer statt, deshalb haben sie große Kristalle. Die hohe Überlagerung bewirkt ein sehr dichtes und homogenes Gefüge (Krzemien, 2010).

Sekundärgestein

Sekundärgestein, auch Sedimente genannt, entsteht durch Verwitterung an der Erdoberfläche, woraus sich eine Formänderung ergibt. Sonneneinstrahlung, Frost, Regen, Organismen und Säuren haben sich im Laufe der Jahre auf die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften ausgewirkt (Krzemien, 2010).

Umwandlungsgesteine

Sie erhielten ihren Namen aufgrund der Metamorphose. Hierbei wandeln großer Druck und hohe Temperaturen die Gesteine trotz des festen Aggregatzustandes um. Diese Umwandlung ist anhand von Strukturveränderungen, Umkristallisation oder Zu- bzw. Abfuhr von Stoffen ersichtlich. Die Schieferung ist ein wichtiges Merkmal, die durch einseitigen Druck entsteht (Krzemien, 2010).

Künstliche Gesteinskörnungen sind entweder industriell hergestellte Gesteine oder recycelte Gesteinskörnungen. Industrielle Gesteinskörnungen haben mineralischen Ursprung und werden durch thermische oder sonstige Prozesse industriell hergestellt. Recyclingmaterialien werden durch Aufbereitung von anorganischem Material, das zuvor als Baustoff eingesetzt war, gewonnen (Chemie.de, 2016a).

2.3.2 Füller (Müller & Vasiljevic, 2010)

Füller haben einen Korndurchmesser, der kleiner als 0,063 mm beträgt. Sie werden unterteilt in Eigenfüller und Fremdfüller.

Eigenfüller

Eigenfüller sind der Anteil der Sandfraktion, der kleiner als 0,063 mm ist. Das heißt Korngruppen mit größeren Korndurchmessern liefern diesen mit. Eigenfüller dürfen nicht quellfähig sein.

Steinmehl / Fremdfüller

Um die gewünschten mechanischen Eigenschaften von Asphalt zu erreichen, muss diesem ein bestimmter Anteil von Kleinstteilen hinzugefügt werden. Bei der Zugabe von Füllern muss beachtet werden, dass das Verhältnis von Füller zu Bitumen das Materialverhalten stark beeinflusst und es deshalb zwischen 1,5:1 und 1,8:1 liegen sollte. Unter 1:1 wird die Steifigkeit des Asphalts vermindert und es kann zu Verformungen kommen, über 2:1 wird die Steifigkeit erhöht, aber auch die Sprödeheit des Werkstoffes.

2.4 Ermüdung

2.4.1 Allgemein

Den Begriff der Ermüdung kann man am einfachsten anhand eines Beispiels erklären: Wird eine Büroklammer ein paar Mal hintereinander verbogen, bricht sie. Deshalb versteht man darunter auch die Alterung eines Werkstoffes bzw. Bauteils, und sie entsteht vor allem durch wechselnde mechanische Belastung (Eberhardsteiner & Buchta, 2015).

Im Stahlbau wird die Ermüdung laut EN 1993-1-9 (CEN, 2009) folgendermaßen definiert:

„Prozess der Rissbildung und des Rissfortschritts in einem Bauteil, hervorgerufen durch wiederholte Spannungsschwankungen.“

Das bedeutet, dass Bauteile höhere Lasten ertragen, wenn diese statisch aufgebracht werden. Dafür benötigt man einen statischen Festigkeitsnachweis. Wird ein Bauteil jedoch dynamisch belastet, das heißt, dass schwingende oder zeitlich veränderliche Lasten eingebracht werden, kann dies schon bei sehr kleinen Lasten zur Ermüdung bzw. zum Versagen des Werkstoffes führen. Der Nachweis erfolgt anhand der Dauerfestigkeit bzw. der Betriebsfestigkeit (Richard & Sander, 2009).

Als Beispiel betrachten wir Stahl: Bei Zug-Druck-Wechselbelastungen liegt die Festigkeit bei etwa 40-45 % der ursprünglichen Festigkeit (Richard & Sander, 2009).

Da dynamische Lastmodelle der Realität entsprechen, finden diese in der heutigen Zeit immer größere Anwendung. Maßgebende Größen sind daher bei der Berechnung der Ermüdung die Differenz der Spannung und der Belastungszyklus (Kappl, 2008).

Belastung / Spannungen

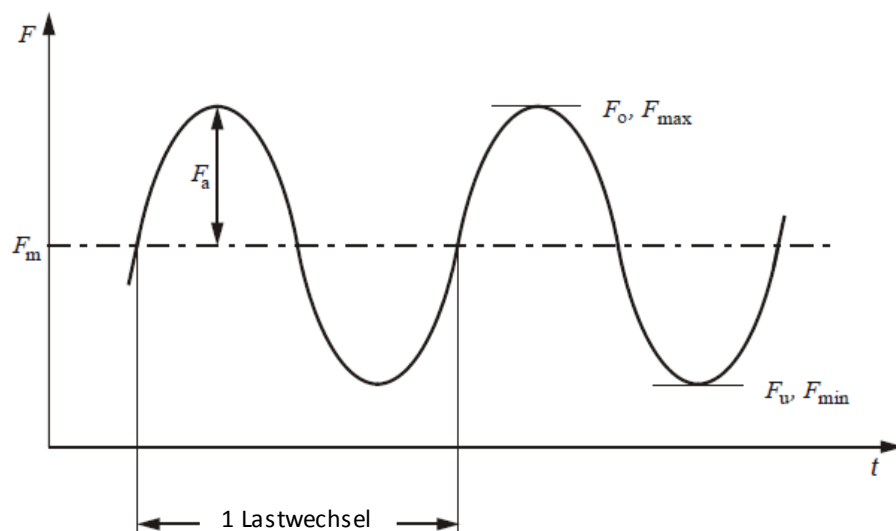


Abbildung 4: Periodische Beanspruchung (Richard & Sander, 2009)

Bei einem Ermüdungsnachweis erfährt der Bauteil eine periodische Beanspruchung, welche in Abbildung 4 ersichtlich ist. Dabei wird eine sinusförmige Belastung auf das Bauteil aufgebracht, wobei Probestücke gleicher Art und Form verwendet werden müssen. Es wird bei jedem Versuch die Unterspannung gleich gehalten, die Oberspannung jedoch variiert, wobei der Bereich zwischen Ober- und Unterspannung als Spannungsschwingbreite bezeichnet wird. Die ertragbaren Lastspiele (in Abbildung 4: Lastwechsel) werden gezählt, bis der Probekörper bricht (Richard & Sander, 2009).

Wöhlerkurve

In Abbildung 5 erkennt man die Zeitfestigkeit $\sigma_{R(N)}$, welche unter periodischer Beanspruchung erreicht wird. Sie ist jene Oberspannung, die nach N Lastspielen zum Bruch führt. Die Dauerfestigkeit σ_D ist jene Oberspannung, die bei periodischer Belastung unendlich oft ertragen wird. Trägt man für jeden Zeitpunkt die Lastspiele über die Oberspannung auf, so erhält man die Funktion $\sigma_R = \sigma_{R(N)}$, die als Wöhlerkurve bezeichnet wird (Fink, WS 2011/2012).

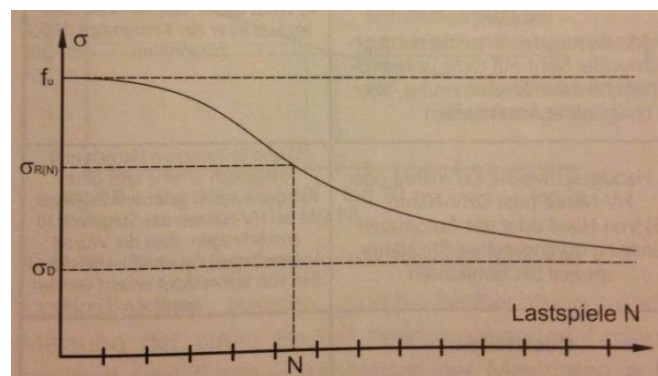


Abbildung 5: Wöhlerkurve (Luza, Palka, Schnaubelt, & Ramberger, 2007)

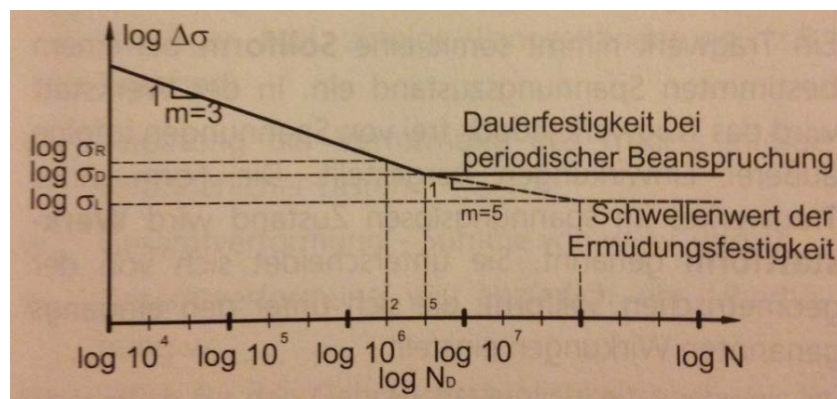


Abbildung 6: Ermüdungsfestigkeitskurve nach EN 1993-1-9 (CEN, 2009; Luza et al., 2007)

Bei nichtperiodischen Beanspruchungen im Stahlbau ist die Wöhlerkurve (oder auch Ermüdungsfestigkeitskurve genannt) in der nachfolgenden Abbildung 6 erkennbar (Fink, WS 2011/2012). Zur Festlegung der Wöhlerkurven werden mehrere Versuche pro Belastungsstufe festgelegt. Das heißt, es werden mehrere Versuche mit derselben Oberspannung durchgeführt. Danach verbindet man gleiche Fraktilwerte miteinander (Luza et al., 2007).

Die Ermüdungsfestigkeitskurve, die in Abbildung 6 ersichtlich ist, wird laut EN 1993-1-9 (CEN, 2009) im doppelt-logarithmischen Maßstab als 5%-Fraktile aufgetragen. 5%-Fraktile bedeutet, dass 5% der Werte kleiner sind als der angenommene Wert und 95% der Werte größer sind. Es ergibt sich daraus eine lineare Funktion. Die Dauerfestigkeit σ_D ist der maßgebende Kennwert, denn wird der Probekörper oberhalb dieser Spannung beansprucht, führt es zu einer Schädigung des Materials und somit zu einem Absinken der Dauerfestigkeit. Die nun sich einstellende untere Grenze wird als Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit σ_L bezeichnet. Um diese sich einstellende Vorschädigung zu berücksichtigen, ändert sich im Punkt der Dauerfestigkeit die Steigung der Ermüdungsfestigkeitskurve von 1:3 auf 1:5 (Fink, WS 2011/2012).

Nachweis im Stahlbau

Um auf den Wert der Widerstandsseite der Ermüdungsfestigkeitskurve zu kommen, wird der Nachweis im Stahlbau an ein bestimmtes Konstruktionsdetail geführt. Das heißt, der Nachweis erfolgt in einem bestimmten Punkt des Querschnittes anhand einer elastischen Berechnung (Fink, WS 2011/2012). Es wird die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite, das heißt die Spannungsschwingbreite, bei der eine Schädigung entsteht, dem Widerstandswert der Ermüdungsfestigkeit unter Berücksichtigung der auf beiden Seiten vorhandenen Teilsicherheitsfaktoren entgegengesetzt. Wobei wie bei jedem Nachweis die Widerstandsseite größer sein muss als die Beanspruchungsseite (Luza et al., 2007).

2.4.2 Straßenbau

Zuvor wurde die Ermüdung bzw. der Ermüdungsnachweis vor allem im Stahlbau beschrieben, da dies am einfachsten erklärbar ist. Aber auch im Straßenbau ist der Ermüdungsnachweis sehr wichtig, da hier fast ausschließlich dynamische Beanspruchung durch den Verkehr aufgebracht wird (Kappl, 2008).

1996 wurden die ersten Ermüdungsversuche, die im Labor durchgeführt wurden, abgeschlossen. Man erkannte, dass die klassischen Ermüdungsanalysen an ihre Grenzen gestoßen waren, um eine klare Aussage über das Ermüdungsverhalten der Asphaltsschichten treffen zu können. Um die komplexen Systeme des Ermüdungsversuches verstehen und

darstellen zu können, wurden 1998 zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. Elf verschiedene Gruppen von Technikern untersuchten in sieben europäischen Ländern anhand verschiedener Ermüdungsversuche das Verhalten des Asphalts. Die Geometrien der Probekörper konnten von Gruppe zu Gruppe abweichen, aber es wurden bei allen Versuchen die gleichen festgelegten Amplituden, Temperaturen und Frequenzen verwendet (Di Benedetto, de La Roche, Baaj, Pronk, & Lundström, 2004). Unter Amplituden werden die Beanspruchungen in Form von Oberspannungen verstanden, die unter Punkt 2.4.1 beschrieben wurden.

Die Resultate dieser Untersuchungen können in drei Punkte eingeteilt werden:

- linear viskoelastische Eigenschaften,
- Lebensdauer und
- Charakteristika von Ermüdungsschäden, die ab dem Moment eintreten, wo das Material bricht bzw. sich spaltet (Di Benedetto et al., 2004).

Linear viskoelastische Eigenschaften

Der erste untersuchte Parameter ist der linear viskoelastische Steifigkeitsmodul (in der (CEN, 2012c) auch anfänglich komplexer Steifigkeitsmodul genannt), welcher zu Beginn des Versuches, also nach den ersten 100 Lastspielen, auftrat. Unter Punkt 2.2.4 findet man die Definition von viskoelastischem Material (Di Benedetto et al., 2004).

Nach den elf verschiedenen, in den Laboren durchgeführten Tests konnten keine wesentlichen Unterschiede des Steifigkeitsmoduls bei den Biegeprüfungen beobachtet werden. Die Streuung des Steifigkeitsmoduls war relativ gering, und damit zeigte sich eine hohe Gleichheit der Versuchsergebnisse. Jedes Ergebnis der Tests sollte eine einheitliche Wirkung des Steifigkeitsmoduls ergeben, sofern die Versuche richtig durchgeführt und interpretiert wurden (Di Benedetto et al., 2004).

Lebensdauer

Wie auch bei der allgemeinen Ermüdung unter Punkt 2.4.1 erwähnt, sind Wöhlerkurven das Ergebnis der Versuche. Es wird dabei die Lebensdauer in Form von Lastspielen über die Verformung aufgetragen (Di Benedetto et al., 2004). Bei den Ermüdungsprüfungen von Asphalt ändert sich jedoch das Ausfallskriterium im Vergleich zu Stahl. Denn das konventionelle Ausfallskriterium besagt, dass die Anzahl der Lastwechsel ermittelt werden muss, bei der sich der anfänglich komplexe Steifigkeitsmodul halbiert hat. Dieses Kriterium wird auch als Ermüdung des Probekörpers bezeichnet (CEN, 2012c).

Charakteristika von Ermüdungsschäden

Jeder Ermüdungsversuch basiert auf drei verschiedenen Phasen, die in Abbildung 7 ersichtlich sind:

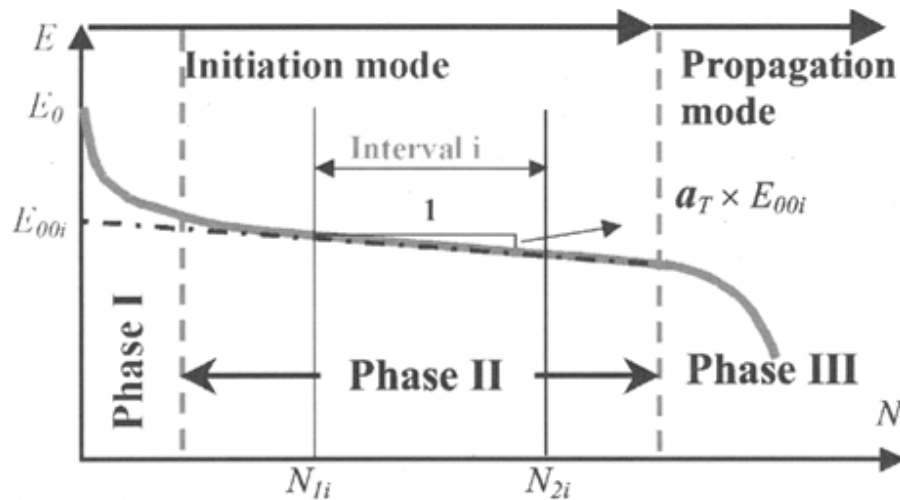


Abbildung 7: Steifigkeitsentwicklung während eines Ermüdungsversuchs (Di Benedetto et al., 2004)

Phase I (Adaptionsphase):

Charakteristisch für diese Phase ist der rapide Abfall des Steifigkeitsanteils. Dieser Abfall ergibt sich nicht nur durch das Ermüdungsversagen, sondern die Erwärmung und die Thixotropie des Materials spielen ebenfalls eine wichtige Rolle (Di Benedetto et al., 2004). Nachfolgend wird die Thixotropie erklärt:

„Thixotropie bezeichnet die Eigenschaft eines Nicht-Newtonschen Fluids, bei einer konstanten Scherung über eine Zeitachse X die Viskosität abzubauen. Nach Aussetzung der Scherbeanspruchung wird die Ausgangsviskosität wieder aufgebaut.“ (Chemie.de, 2016b)

Das bedeutet, es wird in der ersten Phase der Ermüdung die Viskosität des Materials durch Scherbeanspruchung abgebaut. Wird diese Beanspruchung gestoppt, stellt sich die Anfangsviskosität wieder ein, also der Steifigkeitsmodul geht in den Anfangszustand zurück. Diesen reversiblen Effekt nennt man auch „healing“ (Di Benedetto et al., 2004).

Phase II (quasi- stationäre Phase):

In der zweiten Phase steht nicht mehr der Steifigkeitsverlust, sondern die Ermüdung im Vordergrund. Der Einfluss der thermischen Erwärmung und der Thixotropie ist in der zweiten Phase gering, jedoch sollte er immer noch berücksichtigt werden. Die quasi-stationäre Phase wird so dargestellt, dass sie für die Entwicklung des Ermüdungsversagens charakteristisch ist. Die Ermüdung muss abschließend noch um die vorher erwähnten Einflüsse berichtigt

werden, wobei diese von der Art der Belastung abhängig sind und entweder positiv oder negativ ausfallen (Di Benedetto et al., 2004).

Phase III (Bruchphase):

Aus den Phasen I und II folgen Rissbildungen im Material. Diese kleinen Risse, die sich in einer diffusen Art und Weise entwickeln, führen zu einer Verminderung der Steifigkeit, während in der Phase III lokale Rissausbreitungen auftreten. Es vereinigen sich die feinen Risse zu Makrorissen, die sich kontinuierlich ausbreiten, und am Ende dieser Phase steht das Versagen des Probekörpers (Di Benedetto et al., 2004).

Die in Abbildung 7 erkennbaren Bereiche werden als „Initiierung“ und „Ausbreitung“ bezeichnet. Der erste Bereich kann in zwei Phasen unterteilt werden, eine dynamische, in der die Einflüsse der Thixotropie und der thermischen Erwärmung wichtig sind, und in eine quasi-stationäre Phase (Di Benedetto et al., 2004).

Es wurden verschiedene Modelle, parallel zu den Versuchen im Labor, entwickelt. Beim Vergleich dieser Modelle mit den Experimenten erscheint die Annäherung, die auf der Ermüdungstheorie basiert (oberhalb beschrieben) als sehr vielversprechend. Für diese Modelle gilt das Gesetz der Schadensentwicklung, was bedeutet, dass die gesamte Belastung von Anfang an berücksichtigt wird (Di Benedetto et al., 2004).

Vergleich der verschiedenen Ermüdungsprüfungen

Die elf Gruppen untersuchten im Labor anhand folgender Prüfungen die Ermüdungsbeständigkeit:

- 2-, 3-, 4-Punkt-Biegebalken-Prüfungen
- Direkte und indirekte Zugversuche (Di Benedetto et al., 2004)

Die Biegebalkenprüfungen sind verformungsgesteuerte und die Zugversuche kraftgesteuerte Prüfungen. Verformungsgesteuert bedeutet, dass eine Verformung des Probekörpers definiert wird, ohne dass eine andere Größe einen Einfluss auf diese hat. Ein Versuch ist kraftgesteuert, wenn eine Beanspruchung definiert wird und diese von der entstehenden Verschiebung unabhängig ist (Di Benedetto et al., 2004).

Basierend auf diesen Ermüdungsergebnissen der Untersuchung kann man folgende Schlüsse ziehen:

- Es gibt keinen Zusammenhang zwischen der Ermüdungslebensdauer aus einem spannungsgesteuerten und einem verformungsgesteuerten Ermüdungstest.
- Die Ermüdungslebenszyklen werden signifikant von den Testmethoden beeinflusst.

- Die Ergebnisse der Biegebalken-Versuche sind abhängig von der Versuchsart und der Probekörpergröße (Di Benedetto et al., 2004).

Es können folgende Aussagen über die Unterschiede der verschiedenen Versuchsarten getroffen werden:

- Beim IT-CY-Versuch erhält man die kürzeste Lebensdauer, verursacht durch die Kombination aus bleibender Verformung und Ermüdungsschäden. Bei gegebenen Belastungen entwickelt sich bei Biegebalken-Versuchen immer eine längere Lebensdauer als bei direkten oder indirekten Zugversuchen.
- Kraftgesteuerte Versuche wie IT-CY-Versuche ergeben eine sehr viel kleinere Lebensdauer als verformungsgesteuerte Prüfungen (4PBB). Die sich unterschiedlich ergebende Lebensdauer der kraft- und weggesteuerten Versuche ist abhängig von der Versuchsart sowie der verwendeten Amplitude.
- Die vorherigen Analysen zeigen, dass die klassische Herangehensweise klare Einschränkungen hat. Aus diesem Grund ist es wichtig, die bisherige standardisierte Interpretationsmethode zu verbessern bzw. zu ändern (Di Benedetto et al., 2004).

Die ausgeführte Arbeit innerhalb der Gruppe zeigt, dass alternative Ansätze existieren, um die Ermüdung besser charakterisieren zu können. Es wurden dabei aber leider noch nicht alle Probleme gelöst. Insbesondere sind Nachforschungen wichtig, um das oben erklärte „healing“ berücksichtigen zu können. Des Weiteren müssen auch noch Nachforschungen über die Dreidimensionalität gemacht werden, denn bis dato wurden nur die Ebenheit der Probekörper berücksichtigt (Di Benedetto et al., 2004).

Die Aufgaben der verschiedenen Ermüdungsprüfungen sind jedoch alle gleich und in der EN 12697-24 (CEN, 2012c) festgelegt:

- Einstufung nach seiner Ermüdungsbeständigkeit
- Beschreibung des relativen Leistungsvermögens als Fahrbahnbefestigung
- Abschätzung des Tragverhaltens
- Beurteilung der Prüfdaten

In den nachfolgenden Kapiteln geht es um die Vierpunkt-Biegebalken-Prüfung und den indirekten Zugversuch. Der genaue Versuchsaufbau, der Ablauf, der Aufbau der Prüfmaschine sowie die Berechnung und Auswertungen der einzelnen Prüfungen werden nun abschließend genauer erläutert.

3 Ermittlung der Ermüdungsbeständigkeit im Labor

3.1 Ermüdungsprüfmethode

3.1.1 4-Punkt-Biegeprüfung

Versuchsaufbau

Bei der Vierpunkt-Biegeprüfung wird ein prismatischer, schmaler Probekörper mit einer Biegebelastung beansprucht, bis Ermüdung eintritt. Die vier symmetrisch angeordneten Klemmen dienen zur Lagerung des Probekörpers. Die sinusförmige, periodische Belastung, die in der Mitte normal auf die Längsachse aufgebracht wird, sorgt für eine periodische Vierpunkt-Biegebelastung mit freier Rotation und Translation. Die Endauflager (die beiden äußeren Klemmen) müssen in vertikaler Richtung gesichert werden. Ein konstantes Moment und somit eine konstante Dehnung wird durch die Belastungsanordnung zwischen den inneren Klemmen aufgebracht. Ein prinzipieller Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 ersichtlich (CEN, 2012c).

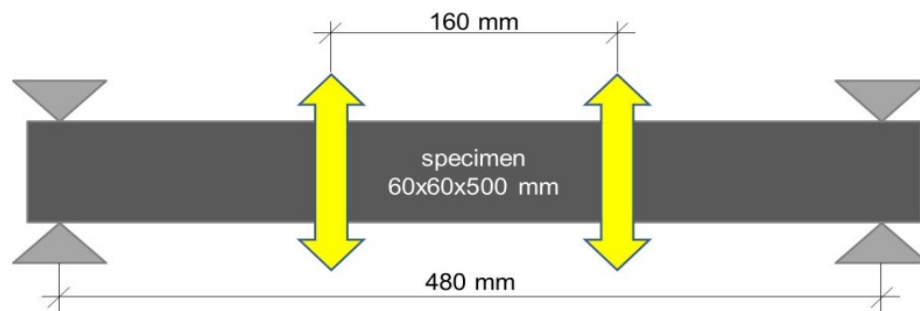


Abbildung 8: Prinzipieller Versuchsaufbau des 4PBB-Versuchs (Hofko, Blab, & Mader, 2012)

Last, Durchbiegung und Phasenverzögerung sind während des Versuchs zu messen und aufzuzeichnen, und damit kann die Ermüdung bestimmt werden (CEN, 2012c).

Versuchsablauf

Die aus dem Asphaltmischgut hergestellten Platten werden zu prismatischen Probekörpern (60 x 60 x 500 mm) geschnitten. Danach wird die Bestimmung des Hohlraumgehaltes durchgeführt. Anschließend werden die Klemmen auf dem Probekörper angebracht. Dabei muss die bestmögliche Rotations- und Translationsfreiheit sichergestellt werden, welche mittels Kleber erfolgt. Die Probekörper müssen dann bei einer Temperatur von 20°C mindestens eine Stunde temperiert werden. Der Probekörper wird in den Belastungsrahmen so eingebaut, dass die Klemmen als Auflager dienen. Der Belastungsstempel muss die Kraft über einen Belastungsrahmen, der die beiden inneren Klemmen verbindet, aufbringen. Durch Rückkopplung der Kraft oder Verschiebung, die gemessen wird, wird die gewählte

Belastungsart sichergestellt. Das Messen und Aufzeichnen von Kraft, die Verschiebung sowie die Phasenverzögerung zwischen Kraft und Verschiebung ermöglicht eine Auswertung des Versuches. Die genaue Auswertung ist unter Punkt 4 dargestellt (CEN, 2012c).

3.1.2 Spaltzug-Schwellprüfung

Versuchsaufbau

Dieser Versuch dient dazu, die Ermüdung durch wiederholte indirekte Zugbeanspruchung unter konstanter Belastung zu bestimmen. Zylindrische Probekörper, die im Labor oder aus Bohrkernen aus der Straße entstehen, werden mit sinusförmigen Druckbeanspruchungen belastet. Aufgrund der Beanspruchung in der vertikalen Durchmesserebene entstehen in der Mitte des Probekörpers horizontale Zugspannungen. Diese führen zur Spaltung entlang der vertikalen Ebene und damit zum Ausfall des Probekörpers. Die Verformungen, die sich bei der Belastung einstellen, werden in horizontale Richtung gemessen, und mit einer angenommenen Poisson'schen Zahl werden die Zugdehnungen in der Mitte des Probekörpers berechnet. Um die Ermüdungsfestigkeit zu bestimmen, muss die Anzahl der Lastwechsel ermittelt werden, bei der sich der anfänglich komplexe Steifigkeitsmodul halbiert bzw. bei der der Probekörper bricht (CEN, 2012c).

Versuchsablauf

Zuerst erfolgt die Probekörperherstellung, wobei bei dieser Arbeit zylindrische Probekörper sowohl im Labor als auch bei Bohrkernen aus der Straße verwendet werden. Diese müssen einen Durchmesser von 150 mm und eine Höhe von 60 mm aufweisen. Genauere Details zur Herstellung werden im Punkt 4 beschrieben. Danach wird der Hohlraumgehalt der einzelnen Probekörper bestimmt, da dieser die Versuche wesentlich beeinflusst. Genaueres ist unter Vorversuche im Punkt 5 beschrieben (CEN, 2012c).

Es folgt die Temperierung der Probekörper. Laut AL Sp-Asphalt 09 liegt die Prüftemperatur bei 20°C (FGSV, 2009).

Der Probekörper wird danach in dem Prüfmaschinenrahmen eingebaut und es folgt die Belastung. In Abschnitt 4.3 wird die Prüfmaschine sowie der genaue Vorgang der Belastung und der daraus folgenden Verformungen genauer beschrieben.

Die Auswertung des Versuches erfolgt mittels gemessener Belastungen und Verformungen und wird unter Punkt 6 erklärt (CEN, 2012c).

3.2 Aufbau der Prüfmaschine

4PBB

Die servohydraulische Prüfmaschine, die von der Firma Wille Geotechnik stammt, ist mit einem Regler WDC 580 ausgestattet. Die dazugehörige Software heißt GEO Sys 8.7.8.2.

Die Prüfmaschine (siehe Abbildung 9) umfasst folgende Bestandteile:

- Biegerahmen
- Belastungsrahmen
- Kraft- und Wegaufnehmer
- Prüfzylinder einschließlich Servoventil
- Hydraulikaggregat
- Temperierkammer
- Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen (CEN, 2012c; Steiner, 2014)



Abbildung 9: Versuchsaufbau Vierpunkt-Biegeprüfung

Die Prüftemperatur liegt wie in der EN 12697-24 (CEN, 2012c) festgelegt bei +20°C. Die Lastaufbringung auf den Balken erfolgt über einen Belastungsrahmen. Dieser ist über die zwei inneren Klemmen mit dem Probekörper verbunden. Die Frequenz der sinusförmigen Last muss zwischen 0 und 60 Hz liegen, wobei die Versuche, die in dieser Arbeit erläutert werden, mit 30 Hz geprüft wurden (CEN, 2012c).

Die Bestandteile der Prüfmaschine müssen korrosionsbeständig sein. Weiters muss zur Überwachung der Belastungsart ein Prüfsystem vorgesehen werden. Die Messung der Kraft erfolgt in der Mitte der beiden inneren Klemmen mittels einer Kraftmessdose. Diese muss einen Bereich von ± 2000 N abdecken können mit einer Messgenauigkeitsklasse von 0,2. Die

Verformung wird mittels Wegaufnehmern an der Unterseite des Probekörpers in der Mitte der inneren Klemmen gemessen (CEN, 2012c).

Die vier Klemmen, die mit Kleber am Probekörper befestigt werden, dienen zur Einspannung im Biegerahmen. Dabei dürfen in horizontaler Richtung an den Auflagern freie Rotations- und Translationskräfte auftreten. Das heißt, dass die Probekörper frei rotieren und sich horizontal bewegen können. Durch Messung der Durchbiegung an der inneren Klemme und in der Mitte des Probekörpers kann festgestellt werden, ob, wie angenommen, eine reine Biegung zwischen den inneren Klemmen aufgebracht wird (CEN, 2012c).

Die Prüfkammer, in der der Versuch stattfindet, muss thermostatisch geregelt und belüftet sein. Die gewünschte Prüftemperatur ($\pm 1^\circ \text{C}$) muss während der gesamten Prüfungszeit auf 10 mm Abstand zum Probekörper aufrecht erhalten bleiben (CEN, 2012c).

Die Datenerfassung erfolgt mittels Wegaufnehmern, wobei diese Signale mit Hilfe von rauscharmen Verstärkern übermittelt werden. Diese Ausgabedaten in Form von Kraft und Verformung werden mittels analoger und digitaler Messinstrumente angezeigt und aufgezeichnet. Die Frequenzanteile der Prüffrequenz müssen erfasst werden, denn damit kann die Berechnung von Spannung, Dehnung, dynamischem Steifigkeitsmodul und Phasenverzögerung erfolgen (CEN, 2012c).

IT-CY



Abbildung 10: Versuchsaufbau eines indirekten Zugversuchs

Es wird dieselbe Prüfmaschine wie bei der 4PBB-Prüfung verwendet, wobei dieses Mal eine andere Versuchsart gestartet wird.

Die Bestandteile, die in Abbildung 10 ersichtlich sind, sind ebenfalls dieselben wie im anderen Versuch, es werden lediglich der Biegerahmen sowie der Belastungsrahmen durch einen Prüfmaschinenrahmen ersetzt (FGSV, 2009).

Der zylindrische Probekörper wird mit einem vom Computer gesteuerten, servohydraulischen Laststempel sinusförmigen Druckschwellenbelastungen ausgesetzt, wobei die Belastung mittels eines Lastverteilungstreifens vom Laststempel in den Probekörper geleitet wird. Es bildet sich somit ein zweiachsiger Spannungszustand aus, wobei eine Druckspannung in vertikale Richtung wirkt. In horizontaler Richtung lässt sich der Spannungsverlauf folgendermaßen beschreiben: Es bildet sich im mittleren Bereich eine Zugspannung aus, die maßgebend für die Materialermüdung ist und durch die der Probekörper gebrochen wird. In den Randbereichen kommt es zu Druckspannungen, die wesentlich geringer sind als die Zugspannungen, denn das Verhältnis zwischen Zug und Druck liegt bei 1:3. In Abbildung 11 erkennt man den horizontalen Spannungsverlauf (FGSV, 2009):

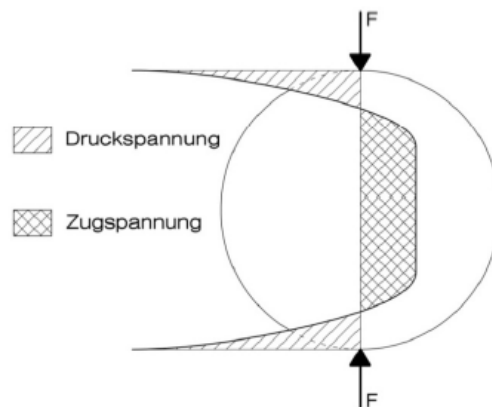


Abbildung 11: Horizontaler Spannungsverlauf des Probekörpers (FGSV, 2009; Steiner, 2014)

Die Horizontalverformungen werden mit zwei, in der Mitte der Probekörpermantelfläche positionierten Wegaufnehmern (LVDTs) gemessen. Der Messbereich dieser Wegaufnehmer muss insgesamt 4,0 mm betragen, wobei jeder einzelne eine Auflösung von 0,1 μm haben soll (FGSV, 2009).

Dies ist ein kraftgesteuerter Versuch, und die harmonische sinusförmige Belastung soll so aufgebracht werden, dass keine Lastpausen entstehen. Um nicht bestimmungsgemäße Einstellungen der Prüfmaschine sowie Resonanzerscheinungen zu verhindern, darf nur ein sinusförmiger Verlauf auftreten. Dies ist der Fall, wenn die Funktion stetig und differenzierbar ist. Bei Ermüdungsversuchen wird mit einer Frequenz von 10 Hz geprüft. Mittels Vorversuchen kann die Ober- bzw. Unterspannung der sinusförmigen Belastung ermittelt werden. Die Unterspannung (0,035 MPa) wird während des gesamten Versuchs konstant gehalten und dient zur Lagesicherung des Probekörpers. Die Oberspannungen müssen so gewählt werden, dass die gesamten horizontalen Dehnungen zwischen 0,05 und

0,3 ‰ (= 50 und 300 $\mu\text{m}/\text{m}$) liegen. Es werden Vorversuche, die in der AL Sp-Asphalt (FGSV, 2009) definiert sind, gemacht, um drei unterschiedliche Spannungsamplituden ermitteln zu können, bei denen die Probekörper dann geprüft werden. Eine genauere Beschreibung der Vorversuche ist unter Punkt 5 zu finden (FGSV, 2009).

Es folgt die Ermittlung der Steifigkeit, welche im nachfolgenden Punkt (siehe 4.4) genauer behandelt wird. Der dynamische Modul $|E^*|$ sowie der Phasenverschiebungswinkel ϕ [°] dienen zur Beschreibung der Steifigkeit sowie des Materialverhaltens (FGSV, 2009). Bei einem rein elastischen Material würde man $\phi=0^\circ$ bzw. bei rein viskosem Material $\phi=90^\circ$ erhalten (Steiner, 2014).

Bei den Ermüdungsversuchen soll bei zyklischen Prüfungen die anfängliche Dehnungsamplitude zwischen 50 und 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ liegen. Es wird jedoch die Obergrenze der Dehnungen mit 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ laut der AL Sp-Asphalt (FGSV, 2009) verwendet, da diese Arbeitsanleitung sehr viel detaillierter ist als die EN 12697-24 und auch alle weiteren Angaben aus dieser verwendet werden.

Weiters ist wichtig, dass mindestens drei im Labor hergestellte Probekörper pro Spannungsstufe zu prüfen sind. Wenn Bohrkerne aus der Straße entnommen werden und daraus die Probekörper herausgeschnitten werden, müssen mindestens fünf Probekörper pro Spannungsstufe geprüft werden (CEN, 2012c).

Um die Anisotropie des Asphalts zu berücksichtigen, muss der Probekörper immer gleich positioniert werden. Die Verdichtungsrichtung, die durch den Walzsegmentverdichter bzw. die Walzen entstehen, wurde auf den Platten bzw. Bohrkernen gekennzeichnet, denn die Steifigkeit ist abhängig von den Achsrichtungen. Die Längsachse wurde immer so platziert, dass sie in Belastungsrichtung eingebaut wurde und somit vergleichbare Ergebnisse lieferte (Steiner, 2014).

3.3 Einflussgrößen

Temperatur

Die Temperatur ist einer der größten Einflussfaktoren. Die Prüftemperatur bei Ermüdungsversuchen beträgt 10°C . Unter Punkt 5 Vorversuche erfolgt eine genaue Erläuterung der Versuchstemperatur.

Hohlraumgehalt

Der Hohlraumgehalt bzw. die Raumdichte haben ebenfalls einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Versuche. Umso mehr Hohlräume im Asphalt enthalten sind, desto weniger Last kann der Materialquerschnitt aufnehmen. Deshalb werden in der Praxis Einbaubedingungen, deren maximaler Hohlraumgehalt als Grenzwert dient, festgelegt. Denn

wenn dieser Hohlraumgehalt zu groß ist, wird die Steifigkeit zu gering und Schäden treten schneller auf bzw. die Anforderung des Straßenerhalters können nicht erfüllt werden (Steiner, 2014)

In der Diplomarbeit von Daniel Steiner (Steiner, 2014) wird der Zusammenhang des Hohlraumgehalts mit der Steifigkeit noch genauer erklärt:

Es wurden 24 Probekörper mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt einer Steifigkeitsprüfung nach dem Indirekten Zugversuch unterzogen. Dabei konnten Aussagen getroffen werden, wie sich der ermittelte Phasenwinkel mit den verschiedenen Hohlräumen entwickelt. Es wurde festgestellt, dass der Phasenwinkel umso größer wird, je mehr Lufteinschlüsse in einem Probekörper vorhanden sind. Wenn der Probekörper dichter ist, also Hohlräume reduziert werden, findet ein Übergang der Materialeigenschaft von viskos zu elastisch statt. Das bedeutet, dass bei den Untersuchungen schnellere Materialantworten (Dehnungen) entstehen, wenn der Probekörper dicht ist (Steiner, 2014).

„Ein Grund dafür kann sein, dass es dabei zu Nachverdichtungserscheinungen kommt, welche sich bei einer IT-CY Prüfung nicht sofort in einer horizontalen Dehnung ablesen lassen, wie es bei dichteren Probekörpern der Fall wäre.“ (Steiner, 2014)

Unterschiede der Prüfungsarten

Der wichtigste Unterschied der Vierpunkt-Biegeprüfung und des Indirekten Zugversuchs liegt in der Steuerung, denn die eine ist kraftgesteuert und der andere verformungsgesteuert.

Der 4PBB-Versuch ist verformungsgesteuert. Das bedeutet, dass eine anfängliche Dehnung als Prüfparameter festgelegt und der Probekörper so belastet wird, dass sich diese Verformung einstellt. Der Versuch wird also über die Verformung (Dehnung) gesteuert.

Die IT-CY-Prüfung ist kraftgesteuert. Das bedeutet, dass eine konstante Unterspannung und eine anzugebende Oberspannung auf den Probekörper einwirken. Kraftgesteuert bedeutet, dass der angegebene Versuchsparameter die Spannung ist und die Verformung sowie die Lastspiele gemessen werden.

Ein weiterer wichtiger Unterschied liegt in der Spannungsverteilung des Probekörpers. Bei beiden Versuchen erfolgt die Belastung sinusförmig, jedoch stellt sich aufgrund der unterschiedlichen Geometrie sowie der unterschiedlichen Einbringung der Last ein anderer Spannungsverlauf ein. Beim 4PBB-Versuch ist die Spannungsverteilung homogen, beim IT-CY-Versuch entsteht eine inhomogene Verteilung, die im Punkt 3.2 genauer beschrieben wird.

Ein weiterer Unterschied sind die Lebensdauern der Versuche. Die 4PBB-Prüfungen sollen Ergebnisse zwischen 10^4 und $2 \cdot 10^6$ liefern, die IT-CY Versuche Ergebnisse zwischen 10^3 und 10^6 (CEN, 2012c).

3.4 Ermittlung der Steifigkeiten des Asphalts

4PBB

Die hergestellten und geschnittenen Probekörper sowie die beweglichen Teile müssen gewogen werden, um den Massenfaktor berechnen zu können. Die Punkte, die am Balken liegen und auf die die Masse einwirkt, müssen ebenfalls bestimmt werden (CEN, 2012d).

Um eine Dehnungsamplitude von 50 Mikrostrain (= 50 $\mu\text{m}/\text{m}$) erreichen zu können, wird der Probekörper sinusförmig belastet. Während der Prüfung wird die Kraft, die Verformung, der Phasenwinkel, die Prüftemperatur sowie die Frequenz gemessen und aufgezeichnet. Danach wird aus diesen Parametern der anfängliche Steifigkeitsmodul, der sich beim 100. Zyklus einstellt, bestimmt (CEN, 2012d).

Zuerst wird die Raumdichte berechnet (CEN, 2012c):

$$\rho = \frac{M_{\text{Balken}} * 10^9}{H * L * B} \quad (1)$$

ρ	Raumdichte [kg/m^3]
M_{Balken}	Gesamtmasse des prismatischen Balkens [kg]
H	Probekörperhöhe [mm]
L	Abstand zwischen den beiden äußeren Klemmen [mm]
B	Probekörperbreite [mm]

Danach wird eine Gewichtsfunktion bestimmt, die von Abmessungen abhängig ist (CEN, 2012c):

$$R(x) = \frac{12 * L^3}{A * (3 * L * x - 3 * x^2 - A^2)} \quad (2)$$

$R(x)$	Gewichtsfunktion [-]
L	Abstand zwischen den beiden äußeren Klemmen [kg]
A	Koordinate der linken inneren Klemme [mm]
x	Abstand zur linken äußeren Klemme [mm]

Mithilfe der Gewichtsfunktion kann dann die äquivalente Masse berechnet werden. Das ist die Masse der beweglichen Teile, die vom Ort, an dem die Durchbiegung gemessen wurde, abhängt (CEN, 2012c).

$$M_{\ddot{a}q} = \frac{R(x_s)}{\pi^4} * M_{\text{Balken}} + \frac{R(x_s)}{R(A)} * M_{\text{Klemme}} + M_{\text{Messfühler}} \quad (3)$$

$M_{\ddot{a}q}$	äquivalente Masse [kg]
$R(x)$	Gewichtsfunktion [-]
M_{Balken}	Gesamtmasse des prismatischen Balkens [kg]

A	Koordinate der linken inneren Klemme [mm]
M_{Klemme}	Masse der Klemmen [kg]
$M_{Messfühler}$	Masse des Messfühlers [kg]
$Z(x_s)$	Durchbiegung [mm]

Äquivalenter Dämpfungskoeffizient bestimmt die Dämpfung im System und ist vom Ort, an dem die Durchbiegung gemessen wird, abhängig (CEN, 2012c).

$$T_{\ddot{a}q} = \frac{R(x_s)}{R(A)} * T \quad (4)$$

$T_{\ddot{a}q}$	äquivalenter Dämpfungskoeffizient [kg/s]
$R(x)$	Gewichtsfunktion [-]
A	Koordinate der linken inneren Klemme [mm]
$Z(x_s)$	Durchbiegung [mm]
T	Dämpfungskoeffizient (für Berechnung der Systemverluste) [kg/s]

Die Kreisfrequenz errechnet sich folgendermaßen (CEN, 2012c):

$$\omega_0 = 2 * \pi * f_0 \quad (5)$$

ω_0	Kreisfrequenz [rad/s]
f_0	Frequenz [Hz]

Um den Massenträgheitseffekten Rechnung zu tragen, wird die Trägheitsfunktion berechnet (CEN, 2012c):

$$I(x_s) = M_{\ddot{a}q} * \frac{Z(x_s)}{F_0} * \omega_0^2 * 10^{-3} \quad (6)$$

$I(x_s)$	Trägheitsfunktion [-]
$M_{\ddot{a}q}$	äquivalente Masse [kg]
$Z(x_s)$	Durchbiegung [mm]
F_0	Amplitude der Gesamtkraft, die auf die beiden inneren Klemmen wirken [N]
ω_0	Kreisfrequenz [rad/s]

Die nachfolgende Dämpfungsfunktion dient zur Berücksichtigung der Dämpfungseffekte im System (CEN, 2012c):

$$J(x_s) = T_{\ddot{a}q} * \frac{Z(x_s)}{F_0} * \omega_0 * 10^{-3} \quad (7)$$

$J(x_s)$	Dämpfungsfunktion [-]
$T_{\ddot{a}q}$	äquivalenter Dämpfungskoeffizient [kg/s]
$Z(x_s)$	Durchbiegung [mm]
F_0	Amplitude der Gesamtkraft, die auf die beiden inneren Klemmen wirken [N]
ω_0	Kreisfrequenz [rad/s]

Die System-Phasenverzögerung ist die Phasenverzögerung für einen Zyklus, der die Systemverluste berücksichtigt (CEN, 2012c):

$$\tan(\theta * \frac{\pi}{180}) = \frac{T_{\ddot{a}q} * \omega_0}{M_{\ddot{a}q} * \omega_0^2} \quad (8)$$

θ	System-Phasenverzögerung [°]
$T_{\ddot{a}q}$	äquivalenter Dämpfungskoeffizient [kg/s]
$M_{\ddot{a}q}$	äquivalente Masse [kg]
ω_0	Kreisfrequenz [rad/s]

Phasenverzögerung zwischen Spannung und Dehnung (CEN, 2012c):

$$\tan(\phi * \frac{\pi}{180}) = \frac{\sin(\phi^*(x_s) * \frac{\pi}{180}) - J(x_s)}{\cos(\phi^*(x_s) * \frac{\pi}{180}) + I(x_s)} \quad (9)$$

ϕ	Phasenverzögerung [°]
$\phi^*(x_s)$	gemessene Phasenverzögerung zwischen Last und Durchbiegung [°]
$J(x_s)$	Dämpfungsfunktion [-]
$I(x_s)$	Trägheitsfunktion [-]

Das dynamische Steifigkeitsmodul, das für einen Zyklus berechnet wird (CEN, 2012c):

$$S_{mix} = \frac{12 * F_0 * L^3}{Z(x_s) * R(x_s) * B * H^3} * \sqrt{1 + 2 * [\cos(\phi^*(x_s)) * I(x_s) - \sin(\phi^*(x_s)) * J(x_s)] + [I(x_s)^2 + J(x_s)^2]} \quad (10)$$

S_{min}	dynamisches Steifigkeitsmodul [MPa]
F_0	Amplitude der Gesamtkraft, die auf die beiden inneren Klemmen wirken [N]
L	Abstand zwischen den beiden äußeren Klemmen [kg]
$Z(x_s)$	Durchbiegung [mm]
$R(x)$	Gewichtsfunktion [-]
B	Probekörperbreite [mm]
H	Probekörperhöhe [mm]
$\phi^*(x_s)$	gemessene Phasenverzögerung zwischen Last und Durchbiegung [°]
$J(x_s)$	Dämpfungsfunktion [-]
$I(x_s)$	Trägheitsfunktion [-]

Der komplexe Steifigkeitsmodul berechnet sich dann folgendermaßen (CEN, 2012c):

$$S = S_{min,n} * e^{i\theta} \quad (11)$$

S	komplexer Steifigkeitsmodul [MPa]
S_{min}	dynamisches Steifigkeitsmodul [MPa]
θ	System- Phasenverzögerung [°]

Die Konstante der Relation zur Dehnung gibt die Berechnung der größten Biegedehnungs-Amplitude am Ort der Durchbiegung an (CEN, 2012c):

$$K(x_s) = \frac{H * A}{4 * L^3} * R(x_s) \quad (12)$$

$K(x_s)$	Konstante der Relation zur Dehnung [mm^{-1}]
H	Probekörperhöhe [mm]
A	Koordinate der linken inneren Klemme [mm]
L	Abstand zwischen den beiden äußeren Klemmen [mm]
$R(x)$	Gewichtsfunktion [-]

Dehnungsamplitude (CEN, 2012c):

$$\varepsilon(x_s) = K(x_s) * Z(x_s) * 10^6 \quad (13)$$

$\varepsilon(x_s)$	Dehnungsamplitude [mm^{-1}]
$K(x_s)$	Konstante der Relation zur Dehnung [mm^{-1}]
$Z(x_s)$	Durchbiegung [mm]

Die größte Spannungsamplitude, die im Verlauf eines Zyklus zwischen den beiden inneren Klemmen auftritt, nennt man Spannungsamplitude (CEN, 2012c).

$$\sigma = S_{min} * \varepsilon \quad (14)$$

σ	Spannungsamplitude [MPa]
S_{min}	dynamisches Steifigkeitsmodul [MPa]
$\varepsilon(x_s)$	Dehnungsamplitude [mm^{-1}]

Diese Formeln gelten bei den Standardprüfbedingungen von 20°C und 30 Hz gemäß EN 12697-24 (CEN, 2012c).

IT-CY

Die Prüfkraft sowie die horizontale Verformung müssen während des Versuchs gemessen und aufgezeichnet werden. Hier sollten zehn aufeinanderfolgende Lastwechsel je Aufzeichnungsintervall komplett erfasst werden, wobei der Abstand der Intervalle so groß sein muss, um den gesamten Verlauf eindeutig beschreiben zu können. Pro Lastwechsel sind mindestens zehn Messwerte aufzuzeichnen (FGSV, 2009).

Bei zu großen Verformungen könnte es zu einer Schädigung der Prüfeinrichtung kommen und es gibt daher Abbruchkriterien. In diesem Fall wurde das Kriterium folgendermaßen festgelegt: Die horizontale Verformung darf maximale 4,0 mm betragen (FGSV, 2009).

Die Aufzeichnung der Kraft und der Verformung werden für nachfolgende Auswertungen benötigt (FGSV, 2009).

Die Berechnung der in Abbildung 11 gezeigten Zugspannungen erfolgt mit der Kraft und den Probekörperabmessungen (FGSV, 2009):

$$\sigma = \frac{2 * F}{\pi * d * h} \quad (15)$$

σ	Horizontalspannung [N/mm ²]
F	Kraft [N]
d	Probekörperdurchmesser [mm]
h	Probekörperhöhe [mm]

Das Steifigkeitsmodul wird mit den Messwerten der Kraft und der Verformung folgendermaßen berechnet (FGSV, 2009):

Es wird zur Annäherung an die Sinusfunktion die Methode der kleinen Fehlerquadrate verwendet.

Dazu wird zuerst ein Regressionsparameter für die Kraft F bestimmt (FGSV, 2009):

$$F(t) = A + B * \sin(2 * \pi * f * t + C) \quad (16)$$

$$\Delta F = 2 * B \quad (17)$$

$F(t)$	Kraft-Messwert [N]
ΔF	Differenz zwischen maximaler und minimaler Kraft [N]
t	Zeitindex [s]
f	Belastungsfrequenz [Hz]
A	Absolutes Glied (Verschiebung zur x- Achse) [N]
B	Amplitude [N]
C	Phasenverschiebung [rad]

Danach folgt der Regressionsparameter für die Verformung u (FGSV, 2009):

$$u(t) = a + b * \sin(2 * \pi * f * t + c) \quad (18)$$

$$\Delta u = 2 * b \quad (19)$$

$u(t)$	Weg-Messwert (gesamte Horizontalverformung des PK) [mm]
Δu	Differenz zwischen maximaler und minimaler Horizontalverformung des PK pro Lastwechsel [mm]
t	Zeitindex [s]
f	Belastungsfrequenz [Hz]
a	Absolutes Glied (Verschiebung zur x- Achse) [N]
b	Amplitude [N]
c	Phasenverschiebung [rad]

Aus diesen Werten kann der Steifigkeitsmodul E berechnet werden (FGSV, 2009):

$$|E| = \frac{\Delta F * (0,274 * \mu)}{h * \Delta u} \quad (20)$$

$ E $	Steifigkeitsmodul [MPa]
ΔF	Differenz zwischen maximaler und minimaler Kraft [N]
μ	Querdehnzahl [-]
h	Probekörperhöhe [mm]
Δu	Differenz zwischen maximaler und minimaler Horizontalverformung des PK pro Lastwechsel [mm]

wobei die Querdehnzahl von der Temperatur abhängig ist (FGSV, 2009):

$$\mu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{[3,1849 - 0,04233 * (\frac{9}{5} * T + 32)]}} \quad (21)$$

μ	Querdehnzahl [-]
T	Temperatur [°C]

Weiters kann der Phasenwinkel mit bereits errechneten Werten bestimmt werden (FGSV, 2009):

$$\varphi = (c - C) * \frac{180}{\pi} \quad (22)$$

φ	Phasenwinkel [rad]
C	Phasenverschiebung der axial gemessenen Kraft [-]
c	Phasenverschiebung der axial gemessenen Probekörperverformung [-]

Bei der Berechnung der Ermüdung wird das Steifigkeitsmodul nach Gleichung (20) für jeden Lastwechsel berechnet. Damit dient es als Grundlage zur Auswertung der Einzelversuche.

Die in der Probekörpermitte elastische horizontale Dehnung kann berechnet werden (FGSV, 2009):

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma * (1 + 3 * \mu)}{|E|} \quad (23)$$

ε	elastische horizontale Dehnung [‰]
σ	Horizontalspannung im Probekörpermittelpunkt mit $F = \Delta F$ [MPa]
μ	Querdehnzahl [-]
$ E $	Steifigkeitsmodul [MPa]

Diese Formeln gelten bei den Standardprüfbedingungen von 20°C und 10 Hz gemäß AL Asphalt 2009 (FGSV, 2009) .

3.5 Ermittlung Wöhlerkurve für beide Verfahren

4PBB

Es werden die Kraft und die Dehnung während des Versuchs gemessen und aufgezeichnet. Danach werden die in Punkt 4.5 angegebenen Formeln berechnet, um den dynamischen Steifigkeitsmodul sowie die Phasenverzögerung zu erhalten (CEN, 2012c).

Die Probekörper werden mit einer definierten Spannung belastet und es werden die Dehnungen sowie die Lastwechsel aufgezeichnet. Die Ermüdung stellt sich ein, wenn der Steifigkeitsmodul die Hälfte des Anfangswertes aufweist. Zu diesem Zeitpunkt wird dann der Lastwechsel bis zur Ermüdung $N_f/50$ sowie die Dehnungsamplitude ϵ angegeben.

Die Wöhlerkurve wird als Funktion der Dehnung, bei der die Probekörper geprüft wurden, die über die Lastangriffe aufgetragen wird, definiert. In Abbildung 12 ist eine Wöhlerkurve eines Vierpunkt-Biegeversuchs erkennbar (CEN, 2012c).

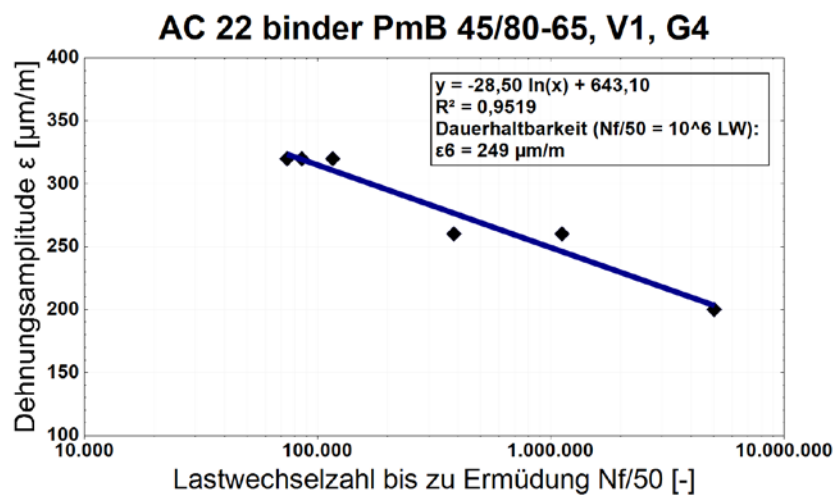


Abbildung 12: Wöhlerkurve eines AC 22 (20°C / 30 Hz)

IT-CY

Um die Ermüdungsfunktion ermitteln zu können, muss nach der Berechnung nach Punkt 4.4 die Lastwechselzahl bis zum Versagen bestimmt werden. Die maßgebende Lastwechselzahl, auch Ermüdungslastwechselzahl genannt, ist jene Größe, bei der erstmals Makrorisse im Probekörper auftreten. Danach folgt eine rasche Rissbildung, die bis zum Bruch des Probekörpers führt (FGSV, 2009).

Um eine Ermüdungsfunktion bzw. Wöhlerkurve bestimmen zu können, müssen mindestens neun im Labor hergestellte Probekörper oder 15 Probekörper aus Bohrkernen geprüft werden. Die Versuche werden einzeln ausgewertet und danach in ein Diagramm eingetragen. Es werden die anfänglichen Dehnungen über die Lastwechselzahlen aufgetragen, wie in Abbildung 14 ersichtlich ist. In Abbildung 13 sind die einzelnen

Versuchsauswertungen zu erkennen, für die dann anschließend die grafische Auswertung (Abbildung 14) erfolgt (FGSV, 2009).

Probe [-]	Unterspannung σ_u [MPa]	Oberspannung σ_o [MPa]	$\epsilon_{el,anf}$ [‰]	N_{Makro} [-]
68	0,035	0,65	0,211	2 120
72	0,035	0,65	0,252	812
58	0,035	0,65	0,196	1 169
42	0,035	0,38	0,143	17 555
48	0,035	0,38	0,123	21 450
43	0,035	0,38	0,137	19 179
50	0,035	0,24	0,098	87 408
39	0,035	0,24	0,074	94 411
66	0,035	0,24	0,088	47 970

Abbildung 13: Beispiel einer Versuchsauswertung (FGSV, 2009)

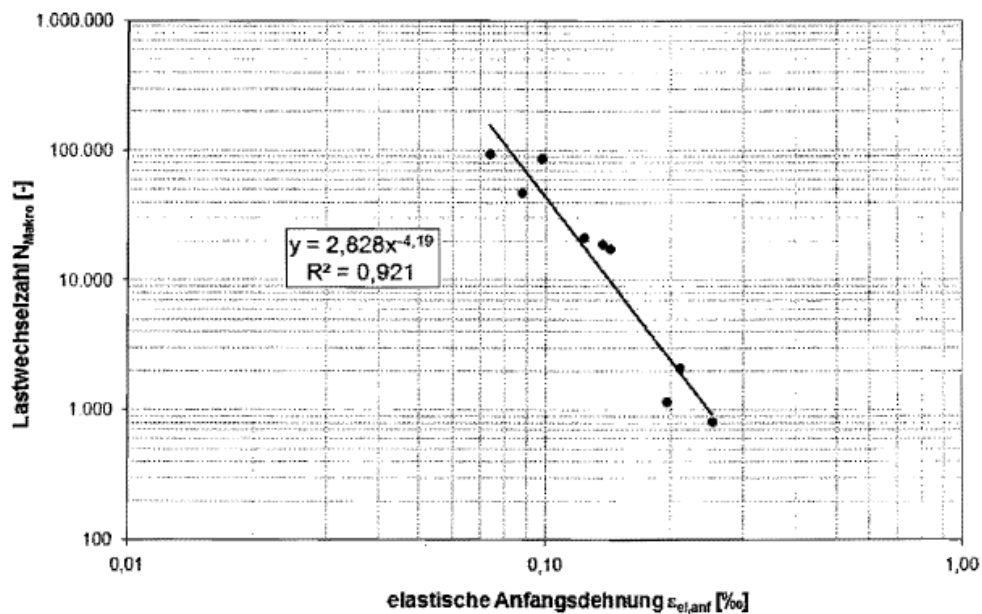


Abbildung 14: Beispiel einer Ermüdungsfunktion (20°C / 10 Hz), (FGSV, 2009)

Zum Schluss muss noch das Bestimmtheitsmaß R^2 , welches die Streuung der Ergebnisse beschreibt, angegeben werden (FGSV, 2009).

4 Materialien und Prüfparameter

4.1 Materialien

4.1.1 Bitumen

Beim verwendeten Bitumen handelt es sich um PmB 45/80-65 gemäß ÖNORM B3613 (ÖNORM, 2011).

4.1.2 Asphaltmischgut

Im nachfolgenden Punkt 4.2 wird die Herstellung der Probekörper sowie der genaue Einbau der Asphaltschichten detailliert beschrieben.

Es werden die beiden Asphaltmischgüter AC 32 binder PmB 45/80-65, V1, G4 und AC 22 binder PmB 45/80-65, V1, G4 verwendet. Diese wurden nach dem GVO-Ansatz ausgeschrieben, welcher in der RVS 08.97.06 definiert ist (FSV, 2013).

Der AC 32 binder PmB 45/80-65, V1, G4 bzw. AC 22 binder PmB 45/80-65, V1, G4 steht für hohe Verformungs-, mittlere Riss- und mittlere Ermüdungsbeständigkeit (Kappl, 2011).

Laborhergestellte Probekörper 4PBB

Für die Platten, aus denen prismatische Probekörper herausgeschnitten werden, wird einerseits das Asphaltmischgut AC 32 binder PmB 45/80-65, V1, G4 und andererseits das Asphaltmischgut AC 22 binder PmB 45/80-65, V1, G4 verwendet. Es werden von jedem der beiden Mischgüter jeweils drei Platten hergestellt.

Beim AC 32 wird die Ist-Rohdichte mit $2,643 \text{ g/cm}^3$ angegeben. Die Trockenmasse der einzelnen Probekörper liegt zwischen 4500 g und 4800 g. Daraus ergibt sich der Hohlraumgehalt, der nach Verfahren B berechnet wird (siehe Punkt 4.4), zwischen 3,0 und 4,1 V% und Raumdichte liegt im Bereich von $2,51 \text{ g/cm}^3$ und $2,58 \text{ g/cm}^3$.

Die Rohdichte des AC 22 beträgt $2,623 \text{ g/cm}^3$. Mittels der gewogenen Trockenmasse von 4500 g bis 4800 g pro Probekörper können die Raumdichte und der Hohlraumgehalt bestimmt werden. Der Hohlraumgehalt wird mit 3,6 V% bis 4,6 V% ermittelt, und es ergibt sich eine Raumdichte zwischen $2,50 \text{ g/cm}^3$ und $2,53 \text{ g/cm}^3$.

Laborhergestellte Probekörper IT-CY

Bei den Platten für die zylindrischen Probekörper für die IT-CY-Versuche werden pro Asphaltmischgut sechs Platten hergestellt. Um den Bereich, in dem sich die

Hohlraumgehalter der Probekörper aus den Bohrkernen befinden, nachstellen zu können, werden zwei verschiedene Einwaagen pro Mischgut gemacht und jeweils drei Platten damit hergestellt. Aus jeder der drei Platten können jeweils drei Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm herausgebohrt werden.

Beim ersten Mischgut AC 32, wobei die Ist-Rohdichte gleich dem ersten Mischgut des 4PBB beträgt, liegt die Masse der 6 cm hohen Probekörper zwischen 2500 g und 2700 g. Daraus ergibt sich ein Hohlraumgehalt zwischen 4,8 V% und 6,1 V%, und die Probekörper weisen eine Raumdichte zwischen 2,49 g/cm³ und 2,52 g/cm³ auf.

Das zweite Mischgut des AC 32 mit einer Masse von 2600 g bis 2700 g weisen einen Hohlraumgehalt von 3,4 V% bis 4,7 V% auf, und die Raumdichte liegt im Bereich von 2,51 g/cm³ bis 2,56 g/cm³.

Die ersten drei Platten des AC 22 weisen, wie das oben beschriebene Mischgut des 4PBB, eine Rohdichte von 2,623 g/cm³ auf. Die Masse der 6 cm hohen Platten liegt zwischen 2600 g und 2700 g pro Probekörper. Daraus kann dann der Hohlraumgehalt zwischen 3,2 V% und 4,1 V% bestimmt werden. Die Raumdichte liegt dann im Bereich von 2,51 g/cm³ und 2,54 g/cm³.

Der zweite Teil der Platten des AC 22 weist Massen zwischen 2590 g und 2640 g auf. Die Raumdichten sowie der Hohlraumgehalt lassen sich daraus berechnen und ergeben sich je Probekörper zu:

- Raumdichte: 2,50 g/cm³ bis 2,54 g/cm³
- Hohlraumgehalt: 3,0 V% bis 4,3 V%

Probekörper aus Bohrkernen IT-CY

Die beiden Asphaltmischgüter AC 22 und AC 32 wurden in der Probestrecke der Westautobahn A1 eingebaut. Es gibt drei Bereiche, in denen die verschiedenen Asphaltmischgüter in unterschiedlicher Stärke eingebaut wurden. Im ersten Bereich erfolgte der Einbau des AC 22 in drei Lagen, der zweite Bereich weist AC 22 auf, der in zwei Lagen eingebaut wurde. Zum Schluss folgte der Einbau von AC 32 als untere Schicht und AC 22 als obere, wobei dieser wieder zweilagig eingebaut wurde (Hofko et al., 2016). Genauer wird im Punkt 4.2.1 beschrieben.

4.2 Herstellung der Probekörper

4.2.1 Kenngrößen und Herstellung der Probekörper

Laborhergestellte Probekörper 4PBB

Es wurden Platten aus den verschiedenen Mischgütern AC 22 und AC 32, welche unter 4.1.5 beschrieben wurden, hergestellt. Das Mischgut wurde im Trockenschrank erhitzt und danach im Walzsegmentverdichter der Firma Freundl/Wenningsen laut EN 12697-33 (CEN, 2013) verdichtet. In Abbildung 15 ist eine Platte mit den Abmessungen 500 x 260 x 80 mm zu erkennen, bevor sie ausgeformt wird.



Abbildung 15: Herstellung einer Platte

Es folgt die Ausformung nach Abkühlung der Platte. Danach werden aus der Platte drei balkenförmige Probekörper herausgeschnitten. Die Höhe muss mindestens um 20 mm größer sein, denn die Probekörper werden aus der Mitte der Platte entnommen, welche in der Abbildung 16 erkennbar ist. Der seitliche Abstand des Balkens zur Außenkante muss ebenfalls 20 mm betragen. Es entstehen dann 500 mm lange Balken mit einer Querschnittsfläche von 60 x 60 mm (CEN, 2012c).

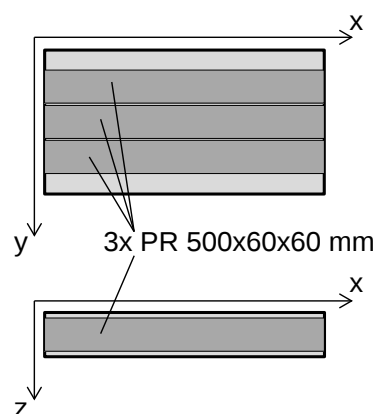


Abbildung 16: Probekörper für die 4-Punkt-Biegeprüfung (Hofko et al., 2012)

Laborhergestellte Probekörper IT-CY

Es werden Platten, wie oben unter 4.2. laborhergestellte Probekörper 4PBB beschrieben, hergestellt. Nach dem Ausformen werden aus jeder Platte drei Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm herausgebohrt, was in Abbildung 17 erkennbar ist. Die Höhe entspricht der Verdichtungshöhe von 60 mm.

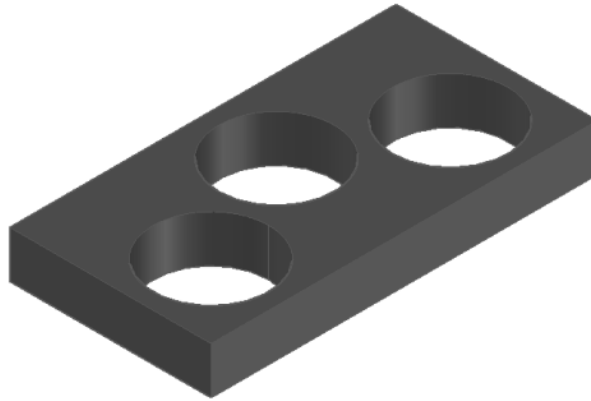


Abbildung 17: Probekörperherstellung für die IT-CY-Versuche

Probekörper aus Bohrkernen IT-CY

Auf der Westautobahn-A1 wurde 2015 auf der Höhe von Böheimkirchen in Fahrtrichtung Salzburg auf dem ersten Fahrstreifen eine Untersuchungsstrecke errichtet. Diese dient dazu, zukünftige Baulose nicht wie bisher nach empirischen, sondern nach gebrauchsverhaltensorientierten Anforderungen auszuschreiben. Denn seit 2013 können GVO Anforderungen in Österreich an Asphalt gestellt werden. Das bedeutet, dass der Asphalt auf Widerstand gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen, Steifigkeit und auf Ermüdungsverhalten und Widerstand gegen bleibende Verformungen untersucht wird. Die Asfinag möchte in den kommenden Jahren den GVO Ansatz als Grundlage festlegen (Hofko et al., 2016).

Im Abschnitt zwischen km 46,980 und km 53,167 wurde der Beton des ersten Fahrstreifens ausgebaut und eine neue Asphaltbinderschicht eingebaut (Hofko et al., 2016).

km 53,167	3	km 52,900	2	km 52,560	1	km 52,280
267 m		340 m		280 m		
2. Fahrstreifen						
3. Fahrstreifen						

Abbildung 18: Einteilung Abschnitte Untersuchungsstrecke (Hofko et al., 2016)

In Abbildung 18 ist die Festlegung der Bereiche mit unterschiedlichem Aufbau der Untersuchungsstrecke dargestellt. Von km 52,280 bis km 52,560 wurde der 1. Abschnitt festgelegt, welcher einen Aufbau von drei Schichten AC 22 aufweist. Die unterste und die mittlere Schicht wurden mit 9 cm Schichtstärke und die obere mit 8 cm eingebaut. Im 2. Abschnitt, der zwischen km 52,560 und km 52,900 liegt, wurde eine Versuchsstrecke angelegt, die nicht der bestehenden Richtlinie entspricht. Hier wurde der AC 22 nur in zwei Schichten zu je 13 cm eingebaut. Der 3. Abschnitt, welcher sich im Bereich von km 52,900 und km 53,167 befindet, wurde anhand zweier Schichten aufgebaut. Die untere 13 cm dicke Schicht besteht aus AC 32 und die obere aus AC 22, welche auch eine Schichtstärke von 13 cm aufweist. In der Abbildung 19 ist der Aufbau der Abschnitte erkennbar (Hofko et al., 2016).

km 53,167	3	km 52,900	2	km 52,560	1	km 52,280
13 cm AC 22		13 cm AC 22		8 cm AC 22		
				9 cm AC 22		
13 cm AC 32		13 cm AC 22		9 cm AC 22		

Abbildung 19: Aufbau der Abschnitte der Versuchsstrecke (Hofko et al., 2016)

Am 20.04.2015 wurden Bohrkerne aus diesen drei Abschnitten gezogen, um damit Ermüdungsprüfungen durchführen zu können. Wie in Abbildung 19 ersichtlich ist, wurden im Abschnitt 1 48 Bohrkerne, im 2. Abschnitt 16 Bohrkerne und im 3. Abschnitt 33 Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm gebohrt. In Abschnitt 4.3 können die Laborcodes der entnommenen Bohrkerne nachgelesen werden, und in Tabelle 2 (Seite 51) findet man alle Bohrkerne aufgelistet (Hofko et al., 2016).

Im Labor folgte die Schichtdickenbestimmung der einzelnen Schichten der Bohrkerne, welche in Abbildung 20 ersichtlich ist.

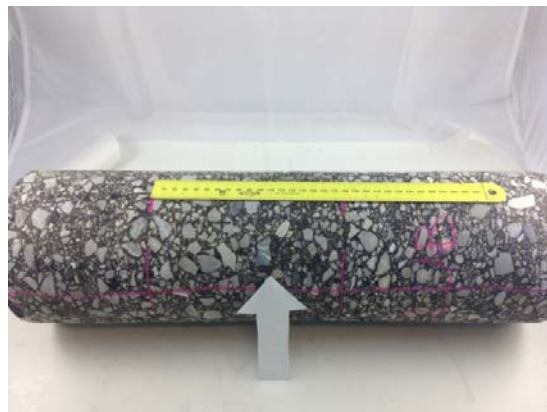


Abbildung 20: Schichtdickenbestimmung

Danach wurden die Bohrkern mit Bezeichnungen der Ermüdungsprobekörper beschriftet und an der Schichtgrenze mittels Schnittes voneinander getrennt. Es wurde zuerst eine Hohlraumgehaltsbestimmung dieser Schichten durchgeführt, welche im Abschnitt 4.4 beschrieben wird. Danach wurde aus den Bohrkernen mit zwei Schichten aus der unteren Schicht ein 6 cm hoher Probekörper herausgeschnitten. Die Probekörper der Bohrkern mit drei Schichten entstanden durch Herausschneiden aus der dritten Schicht. In Abbildung 21 wird die Lage der Entnahme des Probekörpers ersichtlich. Danach folgte wieder eine Bestimmung des Hohlraumgehalts der fertigen Probekörper (Hofko et al., 2016).

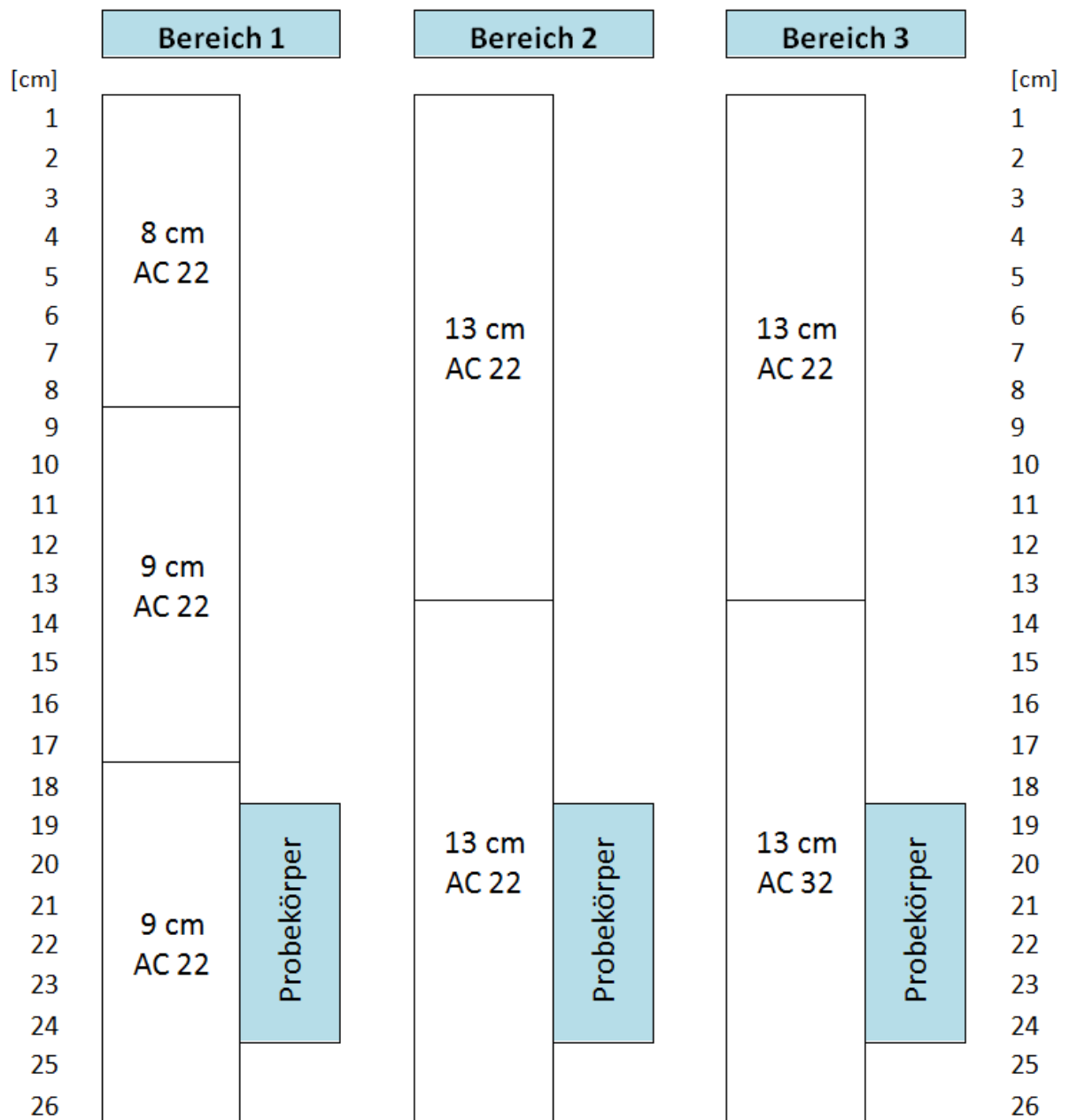


Abbildung 21: Schema der Probekörpervorbereitung

4.3 Laborcodes

Laborhergestellte Probekörper 4PBB und IT-CY

Die Probekörper, die später einer 4-Punkt-Biegeprüfung (siehe Abbildung 22) bzw. einer IT-CY-Prüfung unterzogen werden, werden aus im Labor hergestellten Platten herausgeschnitten bzw. gebohrt. Beide erhalten den Laborcode E, danach folgen eine fortlaufende Nummer und ein Buchstabe. E steht für Ermüdung und die Nummer wird fortlaufend für die Platte vergeben, die hergestellt wird, um Ermüdungsversuche durchzuführen. Nach dem Schneiden bzw. Bohren der einzelnen Probekörper erhält jeder einen Buchstaben, beginnend bei A.



Abbildung 22: Probekörper für 4PBB-Prüfungen

Probekörper aus Bohrkernen IT-CY



Abbildung 23: Bohrkern

Die Bohrkernentnahme wird genauer unter Punkt 4.2 beschrieben. Die entnommenen Bohrkern, die in Abbildung 23 ersichtlich sind, erhielten vor Ort einen Code, damit später die genaue Entnahmestelle rekonstruiert werden konnte. Ein Beispiel dieses Codes ist: 1AE13. Die erste Zahl beschreibt den Entnahmebereich (1/2/3) und wird unter Punkt 4.2 in Abbildung 18 dargestellt und beschrieben. Der Buchstabe, der sich an zweiter Stelle befindet, beschreibt die Position im Aufbaubereich. A steht für Anfang, M für Mitte und E für

Ende. Der nachfolgende Buchstabe E gibt an, dass dieser Bohrkern einen Durchmesser von 150 mm hat und auf Ermüdungsbeständigkeit untersucht wird. Zum Schluss folgt eine ein- bis zweistellige Zahl, wobei diese durch eine fortlaufende Nummer von 1-18 angegeben wird. Die letzten beiden Ziffern zeigen, wie viele Probekörper nach der vorlaufenden Definition entnommen worden sind (Hofko et al., 2016).

In Tabelle 2 sind alle entnommenen Bohrkern mit den Codes ersichtlich:

Tabelle 2: Codes der Bohrkernentnahme (Hofko et al., 2016)

Bereich					
AC 22			AC 32		
1A	1E	2A	3A	3M	3E
1AE1	1EE1	2AE1	3AE1	3ME1	3EE1
1AE2	1EE2	2AE2	3AE2	3ME2	3EE2
1AE3	1EE3	2AE3	3AE3	3ME3	3EE3
1AE4	1EE4	2AE4	3AE4	3ME4	3EE4
1AE5	1EE5	2AE5	3AE5	3ME5	3EE5
1AE6	1EE6	2AE6	3AE6	3ME6	3EE6
1AE7	1EE7	2AE7	3AE7	3ME7	3EE7
1AE8	1EE8	2AE8	3AE8	3ME8	3EE8
1AE9	1EE9	2AE9	3AE9	3ME9	3EE9
1AE10	1EE10	2AE10	3AE10	3ME10	3EE10
1AE11	1EE11	2AE11	3AE11	3ME11	3EE11
1AE12	1EE12	2AE12	3AE12	3ME12	3EE12
1AE13	1EE13	2AE13	3AE13	3ME13	3EE13
1AE14	1EE14	2AE14	3AE14	3ME14	3EE14
1AE15	1EE15	2AE15	3AE15	3ME15	3EE15
1AE16		2AE16		3ME16	
1AE17				3ME17	
1AE18				3ME18	

4.4 Ermittlung der Raumdichte der Probekörper

In der EN 12697-6 (CEN, 2012b) wird die Ermittlung der Raumdichte beschrieben. Die Raumdichte wird folgendermaßen definiert:

„Masse eines Probekörpers einschließlich Hohlräumen, bezogen auf dessen Volumen bei einer bekannten Prüftemperatur.“

Aus der Raumdichte erfolgt dann die Berechnung des Hohlraumgehaltes, welcher für die Bestimmung der Raumdichte sehr wesentlich ist. In Tabelle 3 sind vier verschiedene Verfahren zur Raumdichtebestimmung abgebildet, wobei der Hohlraumgehalt als Randbedingung angegeben wird (CEN, 2012b):

Tabelle 3: Probekörperkenngrößen (CEN, 2012b)

Verfahren	Bezeichnung	Hohlraumgehalt- informationen [V%]
A	Raumdichte – trocken	Klein
B	Raumdichte – gesättigte Oberfläche trocken (SSD)	<5 SMA <4
C	Raumdichte – umhüllte Probekörper	<15
D	Raumdichte durch Ausmessen	>15

Beim Verfahren A wird die Trockenmasse des Probekörpers gewogen. Danach wird der Probekörper in ein Wasserbad eingetaucht, wobei die Masse gleich nach Beruhigen des Eintauchens gewogen wird. Um die Raumdichte zu berechnen, wird die Trockenmasse durch die Differenz der Trockenmasse und der Masse in Wasser dividiert und mit der Dichte des Wassers multipliziert. Dieses Verfahren wird bei dichten, nichtabsorbierenden Asphalt-Probekörpern angewendet (CEN, 2012b).

Das Verfahren B ist für dichte Probekörper mit niedriger Wasseraufnahme und einem Hohlraumgehalt bis zu 5 % einsetzbar. Sind die Durchmesser der Hohlräume jedoch sehr groß, dann kann das Verfahren bis zu einem Hohlraumgehalt von 4 % angewendet werden. Um die Raumdichte nach Verfahren B zu berechnen, muss die Trockenmasse gewogen werden. Weiters ist der Probekörper bis zur Sättigung, die normalerweise 30 Minuten dauert, in einem temperierten Wasserbad zu lagern. Die Masse des gesättigten Probekörpers soll unter Wasser bestimmt werden. Danach wird dieser mit einem Ledertuch abgetupft, damit keine Tropfen mehr anhaften, und wieder die Masse bestimmt (CEN, 2012b).

Die Raumdichte berechnet sich folgendermaßen (CEN, 2012b):

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad (24)$$

ρ_{bssd}	Raumdichte SSD [Mg/m ³]
m_1	Masse des trockenen Probekörpers [g]
m_2	Masse des Probekörpers unter Wasser [g]
m_3	Masse des gesättigten und abgetupften Probekörpers an der Luft [g]
ρ_w	Dichte des Wassers bei Prüftemperatur [Mg/m ³]

Das Verfahren C wird selten verwendet, da es sehr aufwendig ist. Jedoch können Raumdichten mit Hohlraumgehaltern bis zu 15 % ermittelt werden. Es muss wie bei allen Verfahren die Trockenmasse bestimmt werden. Danach erfolgt eine Umhüllung des Probekörpers mit Paraffinwachs und die Masse des umhüllten Probekörpers muss ebenfalls gewogen werden. Zum Schluss wird wieder die Masse unter Wasser bestimmt. Mit diesen Parametern sowie der Dichte des Wassers und des Paraffinwachses wird die Raumdichte berechnet. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in der Über- bzw. Unterschätzung der Raumdichte. Bei der Umhüllung mit Paraffinwachs kann dieses in die Poren eindringen und zu einer Überschätzung führen. Wird der Probekörper mit Folie umhüllt, kann daraus eine Unterschätzung erfolgen, da Texturporen wahrgenommen werden können (CEN, 2012b).

Beim Verfahren D wird die Trockenmasse bestimmt, und weiters erfolgt die Bestimmung der Abmessungen des Probekörpers. Um die Raumdichte zu berechnen, wird die Masse durch das Volumen, welches sich aus den Abmessungen ergibt, dividiert. Dieses Verfahren kann nur bei Probekörpern mit geometrischer Form sowie regelmäßiger Oberfläche angewendet werden. Für Hohlraumgehalter größer 15 % ist das Verfahren D besonders geeignet (CEN, 2012b).

In dieser Arbeit wird bei allen Probekörpern das Verfahren B verwendet.

4.4.1 Statistische Auswertung der Raumdichte

Nachfolgend werden die Raumdichten der laborhergestellten Probekörper sowie der Probekörper aus Bohrkernen statistisch ausgewertet. Dies erfolgt mittels der nachfolgenden Formeln, die aus dem Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik (Hartung, Elpelt, & Klösener, 2009) entnommen wurden.

Das arithmetische Mittel, das auch als Mittelwert bezeichnet wird, berechnet sich folgendermaßen (Hartung et al., 2009):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (25)$$

Danach wird die Varianz ermittelt:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2 \right) \quad (26)$$

Und die Standardabweichung ergibt sich zu (Hartung et al., 2009):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} (\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2)} = \sqrt{s^2} \quad (27)$$

Nachfolgend werden die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Probekörper der 4PBB-Versuche sowie der IT-CY-Versuche miteinander verglichen. Es wird in laborhergestellte Probekörper und Probekörpern aus den Bohrkernen unterteilt.

AC 32

In Tabelle 4 sind die Raumdichten aller Probekörper, die bei der Untersuchung berücksichtigt wurden, ersichtlich. Zum Schluss kann man die Mittelwerte, die Varianz sowie die Standardabweichung erkennen. Diese wurden anhand ihrer Versuche sowie anhand ihrer Herstellung unterschieden.

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Raumdichten; AC 32

4PBB		IT-CY Labor		IT-CY BK	
Probe-körper	Raumdichte Verfahren B [Mg/m³]	Probe-körper	Raumdichte Verfahren B [Mg/m³]	Probe-körper	Raumdichte Verfahren B [Mg/m³]
E811A	2,565	E823A	2,49	E756A	2,612
E811B	2,542	E823B	2,504	E756B	2,611
E811C	2,547	E823C	2,496	E756D	2,601
E812A	2,539	E824A	2,481	E756E	2,597
E812B	2,515	E824B	2,502	E756F	2,613
E812C	2,539	E824C	2,503	E756G	2,597
E813A	2,581	E825A	2,493	E756H	2,593
E813B	2,542	E825B	2,517	E756I	2,588
E813C	2,544	E825C	2,503	E756J	2,598
		E848A	2,539	E756M	2,587
		E848B	2,519	E756N	2,588
		E848C	2,526	E756O	2,58
		E849A	2,54	E756P	2,571
		E849B	2,539	E753B	2,587
		E849C	2,543	E753C	2,59
		E850A	2,554	E753D	2,593
		E850B	2,549	E753E	2,597

		E850C	2,538	E753F	2,592
				E753G	2,603
				E753H	2,595
				E753I	2,594
				E753J	2,579
				E753K	2,584
				E753L	2,593
				E753M	2,586
				E753N	2,594
				E753O	2,544
Mittelwert	2,546	2,519	2,591		
Varianz	0,00034	0,00052	0,00018		
Standardabweichung	0,018	0,023	0,014		

Es lässt sich festhalten, dass der Mittelwert der Raumdichte der 4PBB-Probekörper etwas größer ist als die der IT-CY-Probekörper. Weiters kann man feststellen, dass die Mittelwerte der im Labor hergestellten IT-CY-Probekörper im Vergleich zu denen aus den Bohrkernen identisch sind. Sie unterscheiden sich lediglich in der Standardabweichung. Die Standardabweichung ist bei allen Ergebnissen sehr gering und liegt unter einem Prozent. Dadurch kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse nur eine geringe Streuung haben und sehr gut übereinstimmen.

AC 22

Beim AC 22 erfolgt die gleiche Unterteilung wie beim AC 32, was in Tabelle 5 ersichtlich ist. Es werden wieder die Raumdichten anhand der Versuchsart sowie anhand der Herstellung unterteilt.

Es lässt sich festhalten, dass der Mittelwert der Raumdichte der 4PBB-Probekörper und die der laborhergestellten IT-CY-Probekörper etwa gleich sind. Hier kann eine größere Abweichung der Mittelwerte der IT-CY-Versuche festgestellt werden, die sich bei etwa zwei Prozent einstellt. Die Standardabweichung ist bei allen Ergebnissen sehr gering und liegt unter einem Prozent. Dadurch kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse nur eine geringe Streuung haben und sehr gut übereinstimmen.

Tabelle 5: Statistische Auswertung der Raumdichten; AC 22

4PBB		IT-CY Labor		IT-CY BK	
Probe-körper	Raumdichte Verfahren B [Mg/m³]	Probe-körper	Raumdichte Verfahren B [Mg/m³]	Probe-körper	Raumdichte Verfahren B [Mg/m³]
E814A	2,502	E833A	2,536	E744A	2,558
E814B	2,501	E833B	2,531	E744B	2,554
E814C	2,502	E833C	2,522	E744C	2,56
E815A	2,521	E834A	2,518	E744D	2,546
E815B	2,516	E834B	2,532	E744E	2,557
E815C	2,517	E834C	2,525	E744F	2,545
E816A	2,524	E835A	2,514	E744G	2,527
E816B	2,526	E835B	2,514	E744H	2,522
E816C	2,524	E835C	2,517	E744I	2,54
		E851A	2,531	E744J	2,536
		E851B	2,54	E744K	2,536
		E851C	2,526	E744L	2,548
		E852A	2,522	E744M	2,547
		E852B	2,525	E744N	2,552
		E852C	2,52	E744O	2,549
		E853A	2,525	E744P	2,534
		E853B	2,524	E744Q	2,545
		E853C	2,509	E744R	2,544
				E750A	2,581
				E750B	2,573
				E750C	2,576
				E750D	2,572
				E750E	2,579
				E750F	2,589
				E750G	2,559
				E750H	2,581
				E750K	2,572
				E750L	2,571
				E750M	2,582
				E750O	2,573
				E750P	2,555
Mittelwert	2,515	2,524		2,557	
Varianz	0,00011	0,00006		0,00032	
Standardab- weichung	0,010	0,008		0,018	

5 Vorversuche

Bei den Probekörpern, die mit der 4PBB-Prüfung untersucht wurden, erfolgten keine Vorversuche, da Werte aus der Erstprüfung bekannt waren. Diese Werte wurden für diese Versuche übernommen, um die erhaltenen Ergebnisse mit den Ergebnissen der Erstprüfung vergleichen zu können.

Beim IT-CY-Versuch gibt es genaue Vorgaben in der AL Sp-Asphalt 09, um Vorversuche durchzuführen (FGSV, 2009):

Prüftemperatur

Zuerst wurden die zylindrischen Probekörper bei einer Prüftemperatur laut AL Sp-Asphalt 09 von 20°C geprüft. Jedoch konnten nur sehr geringe Spannungen aufgenommen werden, und bei den meisten Versuchen ergaben die Ermüdungsprüfungen keine Ergebnisse, da die Steifigkeit des Asphaltprobekörpers viel zu gering war. Das Problem stellten die plastischen Verformungen dar: Die Probekörper versagten anhand der großen Verformung, bevor die Ermüdung eintreten konnte (FGSV, 2009).

Deshalb wurde die Prüftemperatur auf 10°C geändert. Die Probekörper wurden deshalb vor der Prüfung in einem Kühlschrank auf die gewünschte Temperatur von 10°C abgekühlt.

Ermittlung der Oberspannungen

Es wurde ein Multistage-Versuch an einem Probekörper durchgeführt. Die Unterspannung wurde dabei immer konstant gehalten und zwar bei 0,035 MPa. Die Belastung mit der Oberspannung erfolgte immer mit jeweils 100 Lastwechseln, wobei diese stufenweise immer mehr gesteigert wurden. Gestartet wurde dieser Versuch mit einer Oberspannung von 0,2 MPa, wobei die Steigerung normalerweise in 0,2 MPa Schritten erfolgte. Um jedoch genaue Werte ermitteln zu können, wurde die Steigerung teilweise verändert bzw. bei einer anderen Belastung gestartet. Diese Steigerung erfolgte so lange, bis der Probekörper versagt oder ein Abbruchkriterium eintrat (FGSV, 2009).

Um nun drei geeignete Werte für die Oberspannung auszuwählen, wurden die elastischen horizontalen Dehnungen zwischen dem 93. Und 97. Lastwechsel gemittelt. Es wurden Oberspannungen ausgesucht, bei denen die Dehnungen zwischen den Grenzen, die oben genannt wurden, liegen (FGSV, 2009).

Die Tabelle 7 zeigt die Dehnungen, die sich bei bestimmten Spannungen mit einer Prüftemperatur von 20°C ergaben und wie die Auswahl der Oberspannungen erfolgte.

Im Vergleich dazu kann Tabelle 7 betrachtet werden, denn hier wurde ein Probekörper bei 10°C geprüft und die Oberspannungen ausgewertet (FGSV, 2009).

Tabelle 6: Vorversuch des Bohrkerns E754A (AC 22) 20°C

Spannung [MPa]	Dehnung [‰]	Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$]
200	0,0547	54,7
300	0,0889	88,9
400	0,127	127
500	0,1747	174,7
600	0,238	238
650	0,290	290

Tabelle 7: Vorversuch des Bohrkerns E756G (AC 32) 10°C

Spannung [MPa]	Dehnung [‰]	Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$]
200	0,036	36
400	0,0911	91,1
800	0,200	200
1000	0,294	294

6 Ergebnisse und Interpretation

6.1 Einzelergebnisse

6.1.1 Laborhergestellte Probekörper 4PBB

AC 32

Es wurden 9 Probekörper geprüft. Die Dehnungsamplituden in $\mu\text{m}/\text{m}$, bei denen geprüft wurden, lauten:

- 200
- 230
- 260
- 320

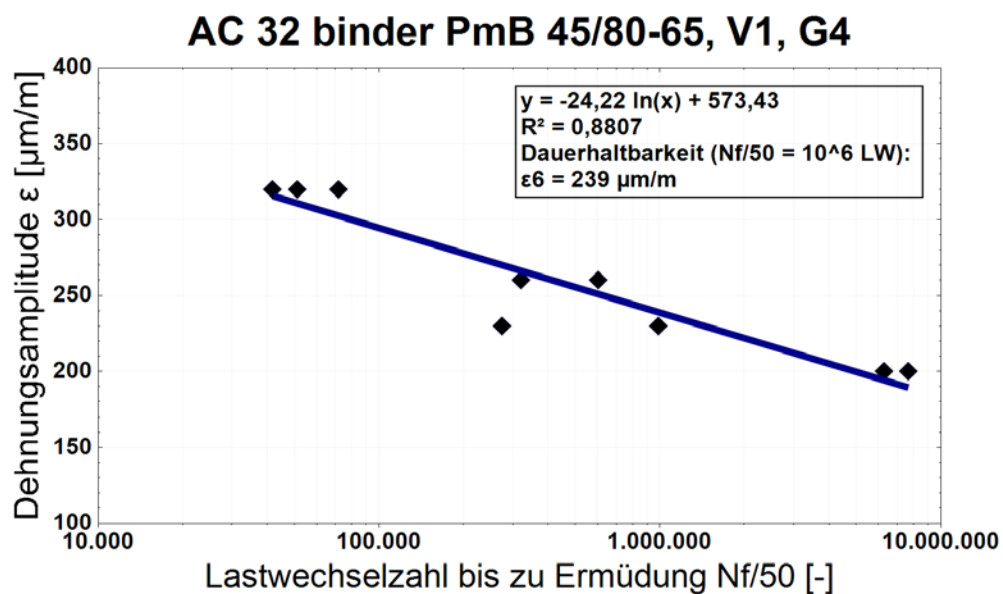


Abbildung 24: Ergebnis 4PBB-Prüfung AC 32 (20°C / 30 Hz)

Es wurde bei jedem einzelnen Versuch die Steifigkeit zu Beginn sowie die Lastspielzahl und die Steifigkeit ermittelt, bei der der Probekörper versagt. Es wurden die einzelnen Ergebnisse der 4PBB-Prüfung als Punkt in dem in Abbildung 24 erkennbaren Diagramm eingetragen. Die Dehnungsamplitude wurde über die Lastspielzahl aufgetragen, bei der der Probekörper versagt. Danach erfolgte eine Linearisierung dieser Punkte (Funktionsgleichung) sowie die Angabe des Bestimmtheitsmaßes. Das Bestimmtheitsmaß ist eine statistische Kennzahl, die die Abweichung beschreibt.

AC 22

Auch bei den neun Probekörpern des Mischgutes AC 22 wurden Dehnungsamplituden in $\mu\text{m}/\text{m}$ festgelegt:

- 200
- 230
- 260
- 320

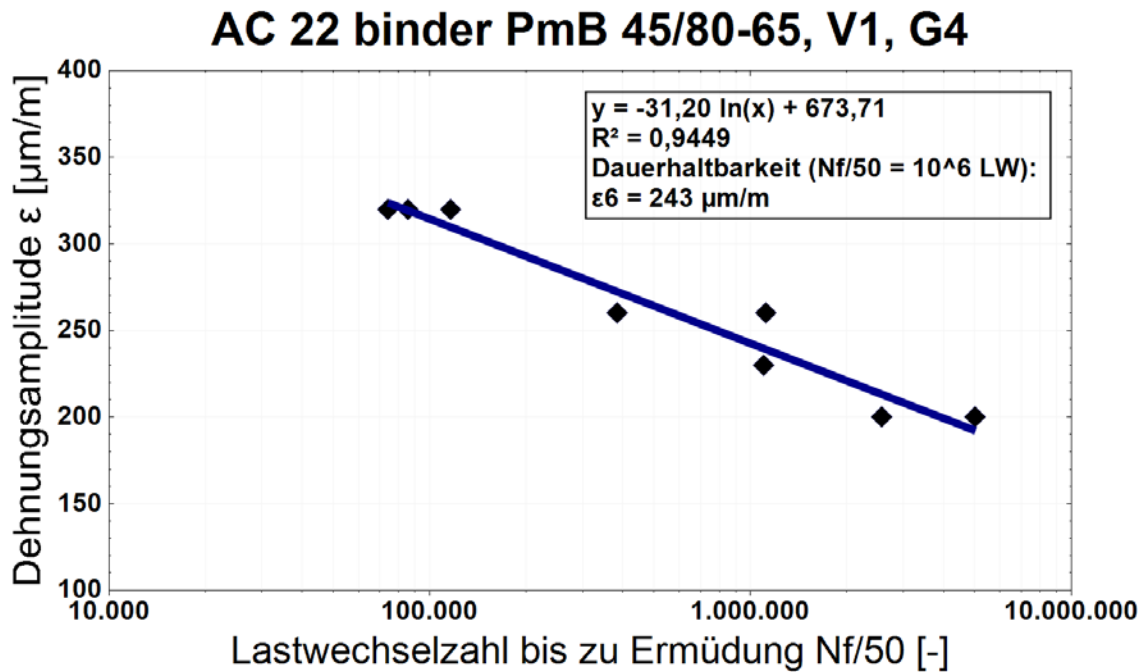


Abbildung 25: Ergebnis 4PBB-Prüfung AC 22 (20°C / 30 Hz)

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der Vierpunkt-Biegebalkenprüfung ersichtlich. Die Auswertung der einzelnen Ergebnisse erfolgt wie beim AC 32.

6.1.2 Laborhergestellte Probekörper IT-CY

AC32

Im Labor wurden insgesamt 18 Probekörper aus den sechs hergestellten Platten gebohrt. Die Herstellung sowie die Kennwerte der Probekörper können unter Punkt 4 nachgelesen werden. Oberspannungen wurden folgendermaßen festgelegt:

Tabelle 8: Oberspannungen der verschiedenen im Labor hergestellten Probekörper

Mischgut 1		Mischgut 2	
Probekörpernummer	Oberspannung [kPa]	Probekörpernummer	Oberspannung [kPa]
E823A	700	E848A	1000
E823B	1000	E848B	390
E823C	390	E848C	700
E824A	390	E849A	700
E824B	700	E849B	1000
E824C	1000	E849C	450
E825A	1000	E850A	450
E825B	700	E850B	700
E825C	700	E850C	1000

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Doppelbestimmung der IT-CY-Versuche des Mischgutes angegeben. Es werden für jeden untersuchten Probekörper die elastischen Anfangsdehnungen über die Lastwechselzahl, die zur Ermüdung führen, angegeben. Danach erfolgt wieder eine Linearisierung der Ergebnisse sowie eine Angabe des Bestimmtheitsmaßes.

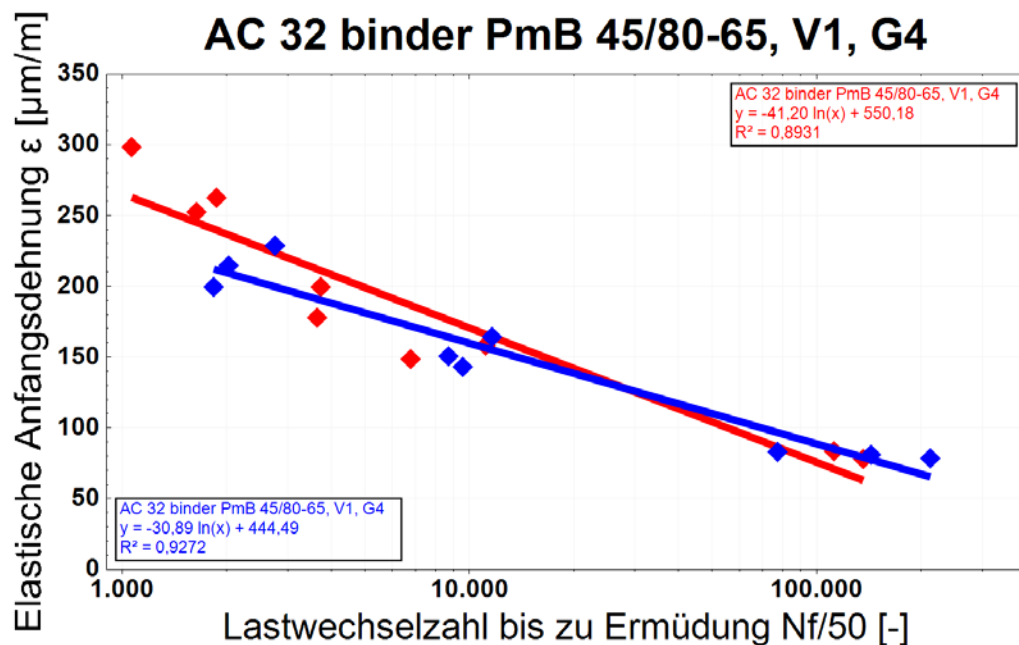


Abbildung 26: Ergebnisse des IT-CY-Versuchs der im laborhergestellten PK; AC 32 (10°C / 10 Hz)

AC22

Es wurden ebenfalls wieder insgesamt 18 Probekörper hergestellt, deren Kennwerte unter Punkt 4 zu finden sind. Die Oberspannungen wurden folgendermaßen definiert:

Tabelle 9: Oberspannungen der verschiedenen im Labor hergestellten Probekörper

Mischgut 1		Mischgut 2	
Probekörpernummer	Oberspannung [kPa]	Probekörpernummer	Oberspannung [kPa]
E833A	1000	E851A	600
E833B	400	E851B	1100
E833C	600	E851C	470
E834A	400	E852A	500
E834B	650	E852B	750
E834C	1000	E852C	1100
E835A	650	E853A	1100
E835B	1000	E853B	470
E835C	400	E853C	750

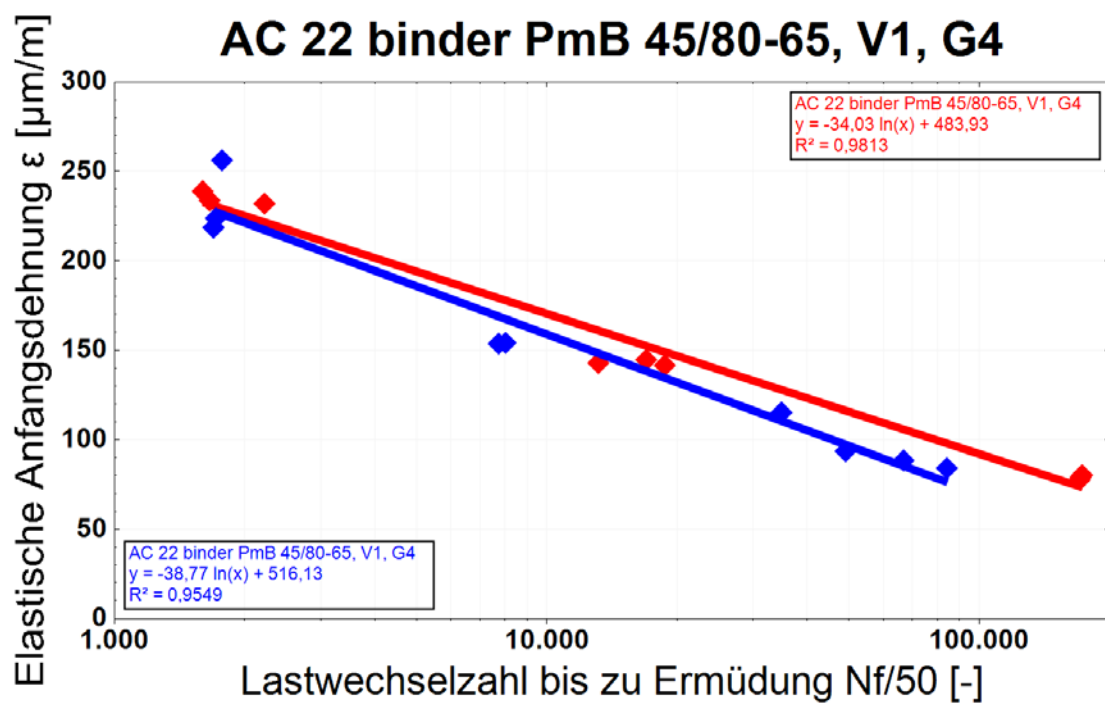


Abbildung 27: Ergebnisse des IT-CY-Versuchs der im laborhergestellten PK; AC 22 (10°C / 10 Hz)

Die Ergebnisse dieser beiden Versuchsreihen sind in Abbildung 27 ersichtlich. Wie bereits erklärt, werden die elastischen Anfangsdehnungen über die Lastwechsel bei der Ermüdung angegeben.

6.1.3 Probekörper aus Bohrkernen IT-CY

AC32

Die Bohrkern wurden aus dem dritten Abschnitt gezogen, und danach erfolgte die Probekörperherstellung wie in den obigen Punkten beschrieben. Hier wurden die Bohrkern vom Anfang und der Mitte des Abschnitts verwendet. Danach erfolgte die Durchführung der Vorversuche, und anhand dieser konnten dann folgende Oberspannungen für die verschiedenen Entnahmebereiche festgelegt werden:

Tabelle 10: Oberspannungen der verschiedenen Probekörper aus Bohrkernen

Oberspannungen Bereich 3A [kPa]	Oberspannungen Bereich 3M [kPa]
390	300
400	350
700	390
1000	400
1100	700
	1000
	1050
	1100

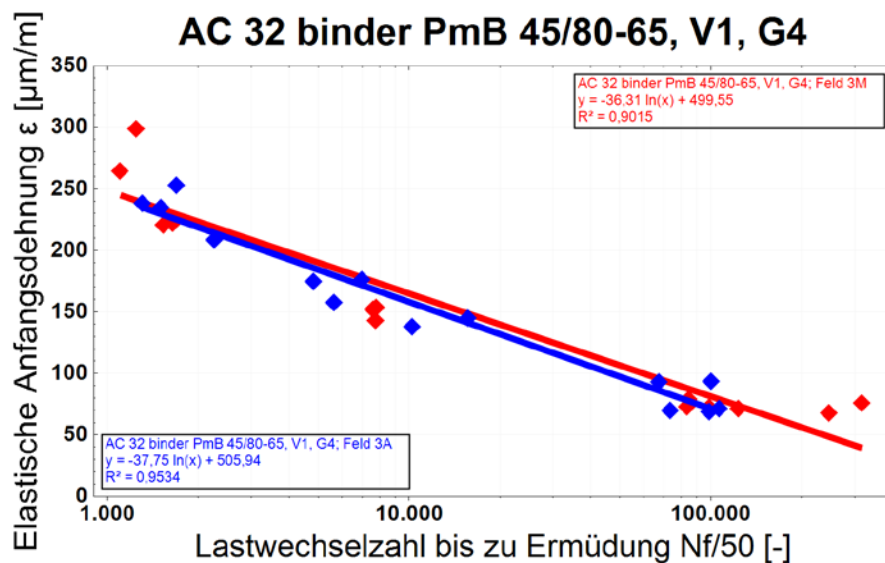


Abbildung 28: Ergebnisse des IT-CY-Versuchs der Probekörper der Probestrecke 3A bzw. 3M (10°C / 10 Hz)

In Abbildung 28 werden die Ergebnisse der Untersuchungen des AC 32 mittels IT-CY-Prüfung angegeben.

AC22

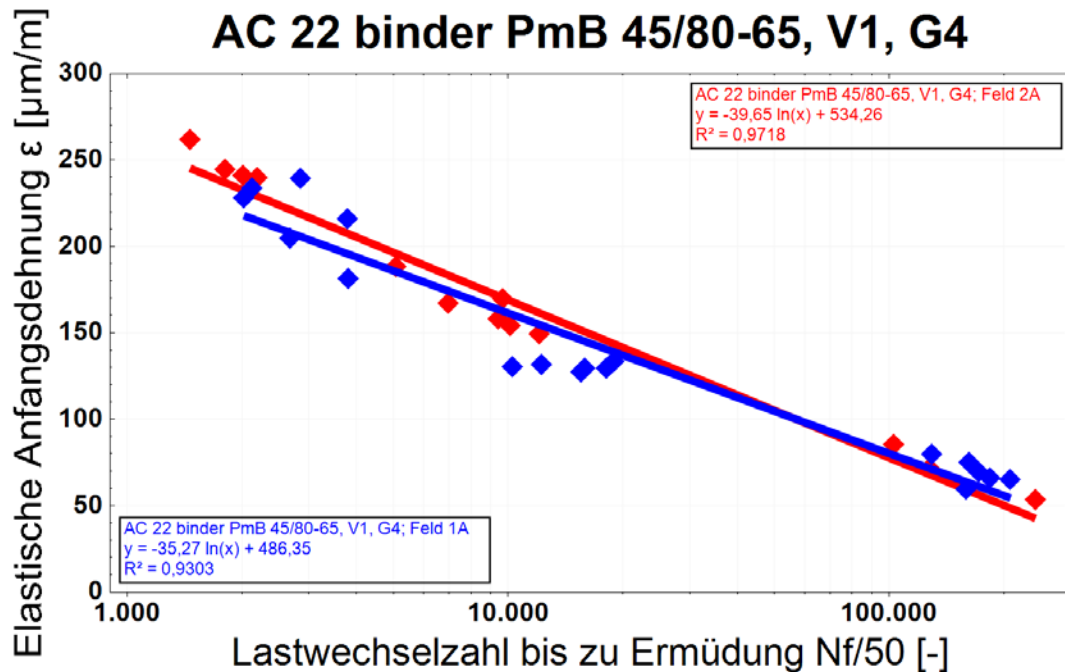


Abbildung 29: Ergebnisse des IT-CY-Versuchs der Probekörper der Probestrecke 1A bzw. 2A (10°C / 10 Hz)

Bei dem Asphaltmischgut AC 22 werden Probekörper aus dem ersten und zweiten Abschnitt entnommen, wobei hier der Vergleich zwischen zwei- und dreilagigem Einbau unterschieden wurde. Beim zweilagigen Einbau (2A) erfolgten die Prüfungen mit den Oberspannungen [kPa]: 300, 350, 360, 600, 900. Die Probekörper, die aus den dreilagigen Bohrkernen (1A) entnommen wurden, prüfte man mit folgenden Oberspannungen [kPa]: 350, 600, 900. In Abbildung 29 werden die Ergebnisse der Versuche des Mischguts AC 22 angezeigt. Hier erkennt man, dass es keinen wesentlichen Unterschied zwischen dem zwei- und dreilagigen Einbau gibt, denn die Linien verlaufen nahezu identisch.

6.2 Vergleich der Ermüdungsbeständigkeiten

Zur detaillierten Analyse der Vergleichbarkeit der Methoden werden nachfolgend folgende Parameter näher betrachtet:

- Steigung der Ermüdungskurve
- Dauerhaltbarkeit ε_4 (IT-CY) bzw. ε_6 (4PBB)

Steigung

Aus den Einzelergebnissen, die jeder einzelne Versuchskörper liefert, werden wie in 3.5 beschrieben sogenannte Wöhlerkurven entwickelt. Diese werden auch Trend- oder Regressionslinien genannt. Trendlinien verlaufen im Fall von Wöhlerkurven logarithmisch, da die untere Achse auch im logarithmischen Verhältnis aufgetragen wird. Die Formel lautet:

$$y = k * \ln(x) + d \quad (28)$$

k Steigung

d Abstand der Geraden auf der y - Achse zum Ursprung

Die Steigung dieser Linien wird als erstes Vergleichskriterium festgelegt.

Dauerhaltbarkeit

Die Dauerhaltbarkeit beschreibt die Ermüdungsbeständigkeit des Asphalts. Je höher dieser Wert ist, desto ermüdungsbeständiger ist die Asphaltdecke. Beim 4PBB-Versuch wird die Dehnung bei einer Million Lastspielen angegeben und als ϵ_6 -Wert bezeichnet (CEN, 2008). Beim IT-CY-Versuch wird aufgrund der hundertmal kleineren Ergebnisse eine Dauerhaltbarkeit bei 10.000 Lastspielen eingeführt, die als ϵ_4 bezeichnet wird. Diese beiden Werte lassen sich ebenfalls vergleichen und deshalb dient die Dauerhaltbarkeit als zweites Vergleichskriterium.

6.2.1 Vergleich IT-CY Labor – Bohrkerne

Als erstes werden die Indirekten Zugversuche miteinander verglichen. Es wurde ein Vergleich der Probekörper, die aus den Bohrkernen herausgeschnitten wurden, mit den Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden, angestellt. Jeweils neun zylindrische Versuchskörper für die zwei im Labor hergestellten IT-CY-Versuche waren die Grundlage. Bei den Bohrkernen wurden beim Mischgut AC 32 insgesamt 33 (15 + 18) Probekörper geprüft.

In Abbildung 30 und in Abbildung 31 werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt. Die blaue und die orange Linie stellen die Bohrkern-Versuche in Abbildung 30 dar, die grüne und die gelbe zeigen die Laboruntersuchungen. Die rote Linie zeigt die Trendlinie aller im Labor hergestellten Versuche und die rot-strichlierte Linie die Trendlinie aller untersuchten Probekörper aus Bohrkernen. Die Linien in Abbildung 31 können wie in Abbildung 30 beschrieben werden, wobei es sich hier um das Mischgut AC 22 handelt.

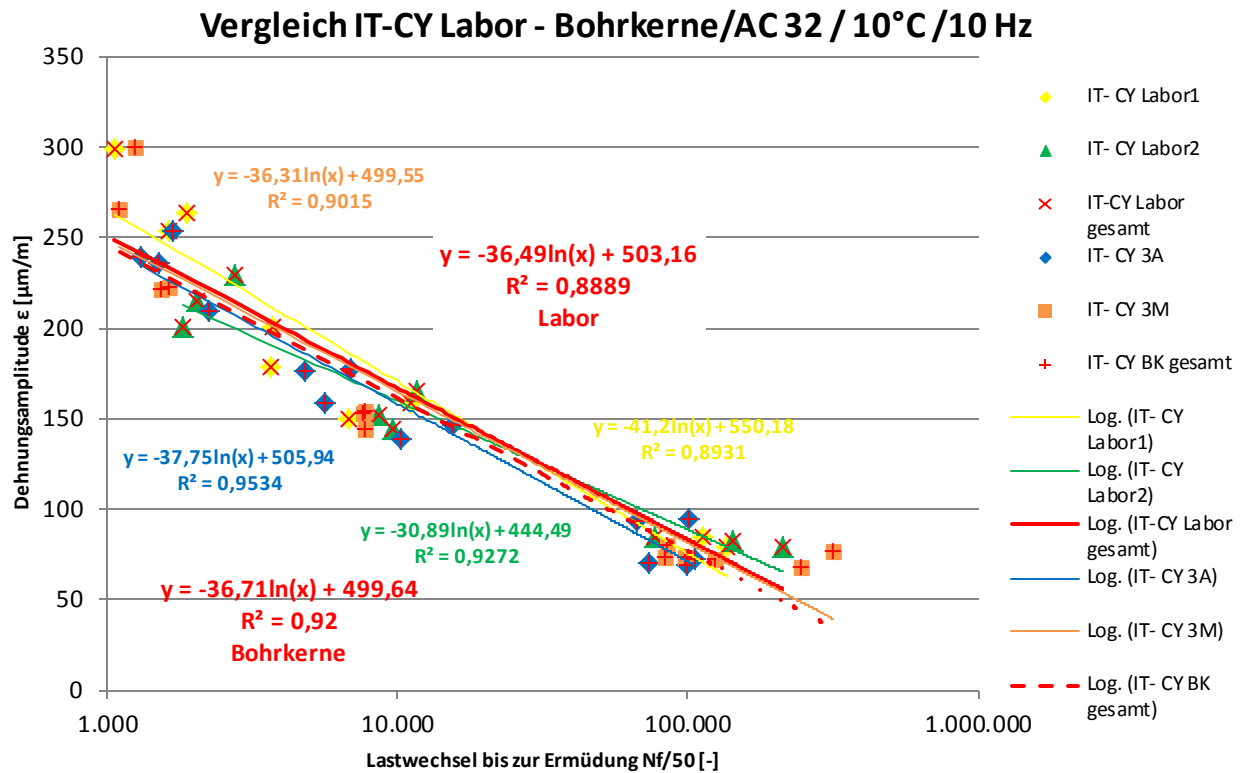


Abbildung 30: Vergleich IT-CY Labor mit den BK; AC 32 (10°C / 10 Hz)

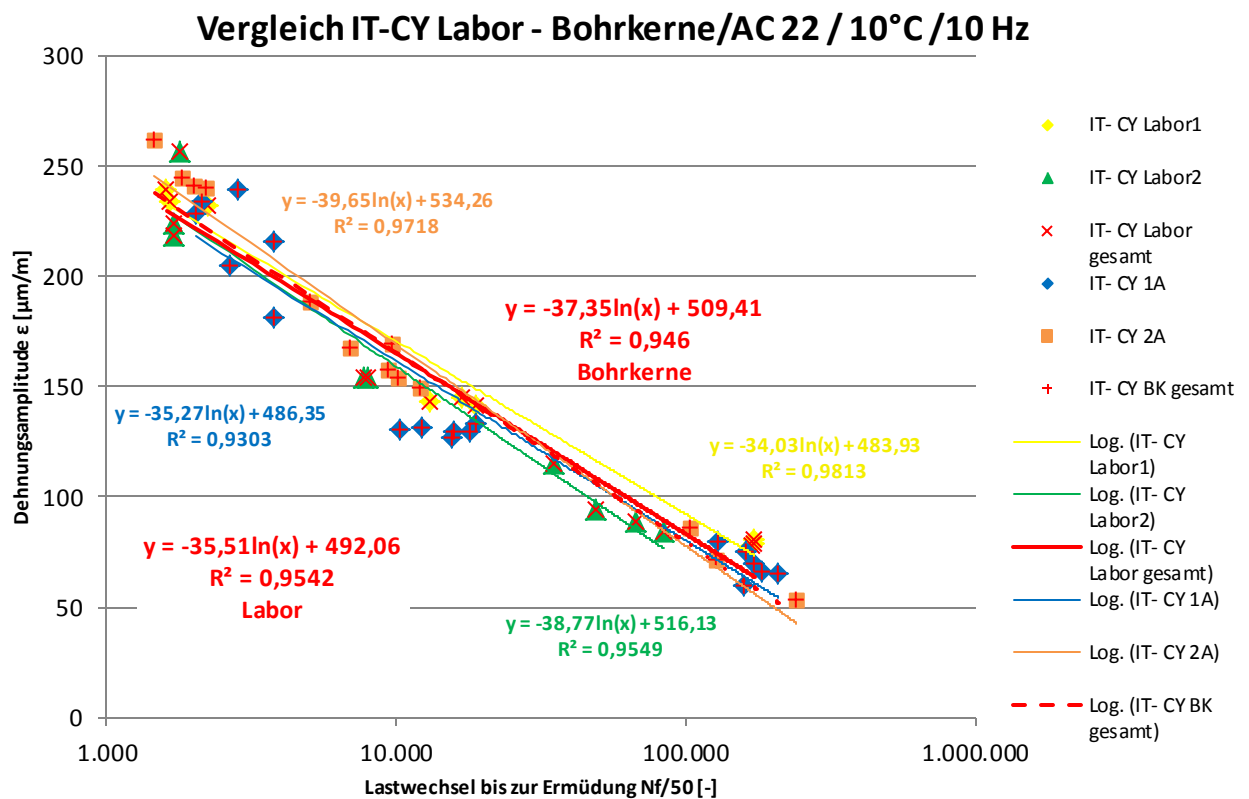


Abbildung 31: Vergleich IT-CY Labor mit den BK; AC 22 (10°C / 10 Hz)

Steigung

Es kann festgehalten werden, dass die Versuche nahezu identische Linien liefern. In Abbildung 30 lässt sich feststellen, dass die beiden Wöhlerkurven (rot und rot-strichliert) die gleiche Steigung aufweisen mit nur geringen Abweichungen, die anhand des Bestimmtheitsmaßes abgelesen werden können. Auch in Abbildung 31 sieht man, dass die beiden roten Linien fast identisch verlaufen und die Abweichungen noch geringer ausfallen.

Dauerhaltbarkeit

Man kann erkennen, dass die ϵ_4 -Werte, die man bei 10.000 Lastspielen ablesen kann, sich beim AC 32 (Abbildung 30) in einem Bereich von 158 $\mu\text{m/m}$ bis 170 $\mu\text{m/m}$ bewegen. Beim AC 22 in Abbildung 31 befinden sich die ϵ_4 -Werte im Bereich von 159 $\mu\text{m/m}$ und 170 $\mu\text{m/m}$. Der Mittelwert der beiden Versuchsergebnisse aus laborhergestellten Probekörpern liegt beim AC 32 wie auch beim AC 22 bei 165 $\mu\text{m/m}$. Beim AC 32 ergibt sich der Mittelwert der ϵ_4 -Werte der beiden Bohrkernuntersuchungen bei 162 $\mu\text{m/m}$, beim AC 22 bei 165 $\mu\text{m/m}$.

Daraus folgt, dass die Versuche nahezu identische Ergebnisse liefern und die Abweichungen der Mittelwerte der laborhergestellten Probekörper zu den Probekörpern aus Bohrkernen kleiner als 2 % sind.

Ergebnis

Für künftige Ermüdungsversuche, die mittels IT-CY geprüft werden, kann festgehalten werden, dass auch im Labor hergestellte Probekörper verwendet werden können, um Aussagen über das Ermüdungsverhalten von Asphaltsschichten treffen zu können.

6.2.2 Vergleich 4PBB - IT-CY Labor

Es werden Ergebnisse der laborhergestellten Vierpunkt-Biegebalken-Versuche mit den laborhergestellten indirekten Zugprüfungen verglichen, da nur zylindrische Bohrkern aus der Straße entnommen werden, weil der Aufwand zu groß wäre, um prismatische Probekörper herauszuschneiden.

Der 4PBB-Versuch ist ein verformungsgesteuerter Versuch. Das heißt, dass die Verformung definiert und der Probekörper so belastet wird, dass sich diese Verformung einstellt. Die Prüftemperatur wurde mit 20°C festgelegt. Der prismatische Probekörper wurde senkrecht, periodisch mit einer Frequenz von 30 Hz belastet und die Verformung auch in Kraftrichtung gemessen. Die Lastwechsel, bei der eine Ermüdung stattfinden sollte, liegen zwischen 10^4 und 2×10^6 Lastspielen.

Vergleich 4PBB - IT-CY Labor/ AC 32

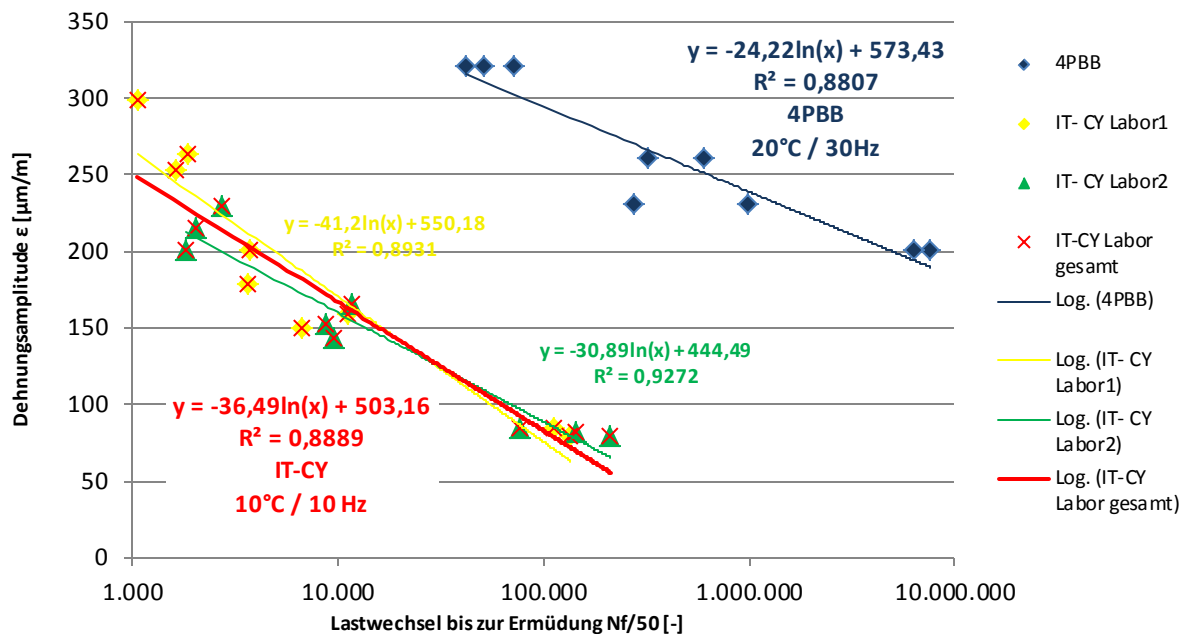


Abbildung 32: Vergleich 4PBB – IT-CY; AC 32

Vergleich 4PBB - IT-CY Labor/ AC 22

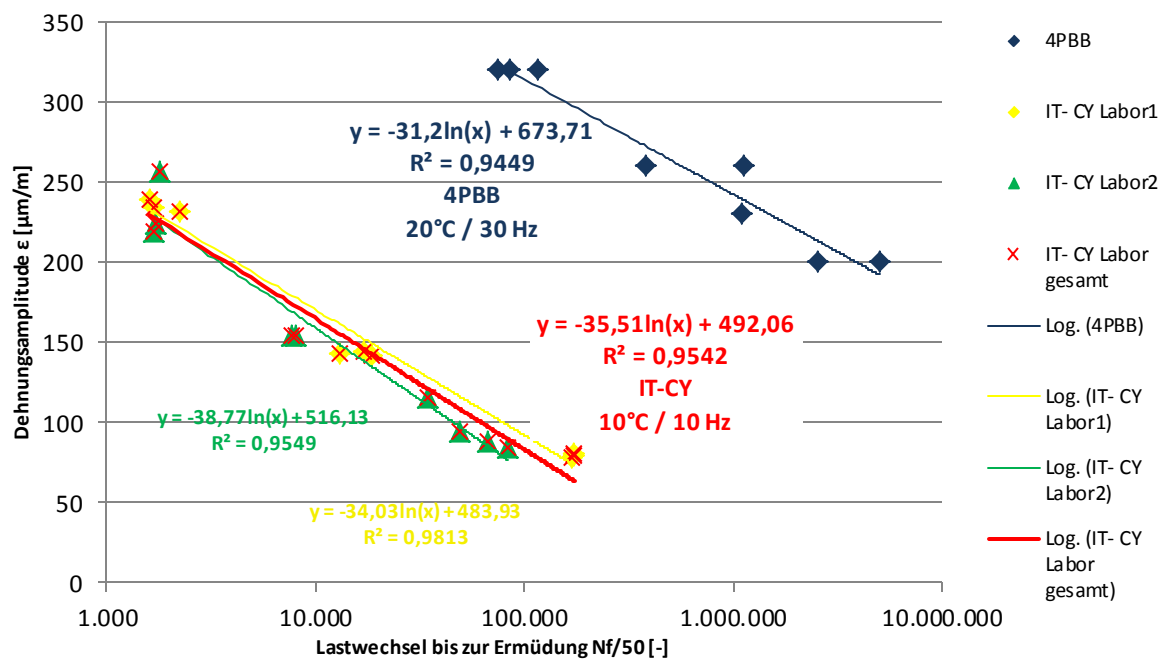


Abbildung 33: Vergleich 4PBB – IT-CY; AC 22

Im Vergleich dazu ist der IT-CY-Versuch eine kraftgesteuerte Prüfung. Es wird eine Oberspannung definiert, mit der der zylindrische Probekörper senkrecht, periodisch mit einer Prüffrequenz von 10 Hz belastet wird. Die Verformung wird quer zur Kraftrichtung gemessen und die Ermüdungslastwechsel sollen sich zwischen 10^3 und 10^6 Lastspielen einstellen. Die Prüftemperatur liegt bei diesem Versuch nur bei 10°C aufgrund der niedrigen Steifigkeit der untersuchten Probekörper.

In den Abbildung 32 und Abbildung 33 wurden die Ergebnisse des Indirekten Zugversuches mit dem Ergebnis der Vierpunktbiegebalkenprüfung verglichen. Beim AC 32 sowie beim AC 22 wurde jeweils ein Versuchsablauf einer Vierpunktbiegeprüfung mit je neun Probekörpern durchgeführt. Beim IT-CY-Versuch wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt. In den Abbildungen stellen die dunkelblauen Linien immer die Ergebnisse der 4PBB-Prüfung dar, die gelbe und die grüne Linie die IT-CY-Versuche.

Es kann festgehalten werden, dass es schwierig ist, diese beiden Versuchsarten miteinander zu vergleichen. In den beiden Abbildungen erkennt man, dass die Ergebnisse des 4PBB-Versuchs ca. hundertmal so groß sind, das heißt hundertmal höhere Ermüdungsbeständigkeiten liefern, wie die der IT-CY-Versuche.

Steigung

Um die Steigung vergleichen zu können, wurden wieder Trendlinien erstellt. Beim AC 32 in Abbildung 32 lässt sich keine klare Aussage über die Vergleichbarkeit treffen, da die Steigung der IT-CY-Versuche bei $k = -36$ liegt und sich bei den 4PBB-Versuch eine Steigung von $k = -24$ einstellt.

Beim AC 22 verläuft die Steigung der IT-CY-Versuche mit $k = -35$. Wenn die Steigung ($k = -31$) des 4PBB-Versuchs, der jetzt im Labor untersucht wurde (siehe Abbildung 33), mit diesen IT-CY-Ergebnissen verglichen wird, kann festgehalten werden, dass die Steigungen annähernd ident sind. Deshalb kann von einer gewissen Ähnlichkeit bei den Versuchen des Mischguts AC 22 ausgegangen werden.

Dauerhaltbarkeit

In Abbildung 32 und in Abbildung 33 lassen sich folgende Aussagen treffen: Beim AC 32 liegt der ϵ_6 -Wert (4PBB) bei 239 $\mu\text{m/m}$, beim AC 22 bei 243 $\mu\text{m/m}$. Je höher dieser Wert ist, desto steifer ist der Probekörper und desto mehr Last kann er aufnehmen. Bei den IT-CY-Versuchen kann ein ϵ_4 -Wert abgelesen werden, welcher sich bei 10.000 Lastspielen ergibt. Beim AC 32 liegen die beiden Werte bei 171 $\mu\text{m/m}$ und 160 $\mu\text{m/m}$.

Der AC 22 weist fast dieselben Werte auf, nämlich 171 $\mu\text{m/m}$ und 159 $\mu\text{m/m}$. Es kann somit festgestellt werden, dass sich die Mittelwerte der beiden Mischgüter bei 165 $\mu\text{m/m}$

einstellen. Es lässt sich außerdem feststellen, dass die Differenz der ϵ_4 - zu den ϵ_6 -Werten im gleichen Bereich von ungefähr 75 $\mu\text{m}/\text{m}$ verläuft.

Ergebnis

Es lässt sich feststellen, dass die Steigung beim Mischgut AC 22 annähernd parallel verläuft. Beim AC 32 kann keine klare Aussage über die Steigung getroffen werden. Weiters kann aber gesagt werden, dass sich die Differenz der ϵ_4 - zu den ϵ_6 -Werten beim AC 32 im Bereich von 75 $\mu\text{m}/\text{m}$ bewegt. Beim AC 22 kann aber keine Aussage darüber gemacht werden.

6.2.3 Vergleich Erstprüfung/Mischgut aus Baustellenprobe/Bohrkerne

Im nachfolgenden Vergleich werden alle Einzelergebnisse der geprüften Probekörper zu einem Ergebnis zusammengefasst. Das bedeutet, dass alle Ergebnisse der IT-CY- und 4PBB-Versuche berücksichtigt wurden und für jeden der Versuche eine Wöhlerkurve entwickelt wurde. Dabei wurden natürlich die Mischgüter AC 32 und AC 22 getrennt dargestellt und sind in Abbildung 34 und Abbildung 35 ersichtlich.

Steigung

Beim AC 32 in Abbildung 34 sowie beim AC 22 in Abbildung 35 kann gesagt werden, dass die Steigung der 4PBB-Versuche von der Steigung der IT-CY-Versuche abweicht. Damit lässt sich erkennen, dass es einen Unterschied macht, ob die Probekörper im Labor hergestellt wurden oder Probekörper aus Bohrkernen aus der Straße gezogen werden. Weiters kann man erkennen, dass die Ergebnisse der IT-CY-Versuche geringere Streuungen liefern als die der 4PBB-Versuche. Aufgrund der großen Streuungen, die sich bei beiden Versuchen ergeben, kann natürlich auch ein größerer Unterschied zwischen den Steigungen entstehen.

Dauerhaltbarkeit

Beim AC 32 stellt sich bei den IT-CY-Versuchen eine Dauerhaltbarkeit von 164 $\mu\text{m}/\text{m}$ ein, bei den 4PBB-Versuchen eine Dauerhaltbarkeit von 228 $\mu\text{m}/\text{m}$. Daher ergibt sich eine Differenz von 64 $\mu\text{m}/\text{m}$. Beim AC 22 ergeben sich der ϵ_4 -Wert bei 165 $\mu\text{m}/\text{m}$ und der ϵ_4 -Wert bei 250 $\mu\text{m}/\text{m}$. Die Differenz liegt daher bei 85 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Ergebnis

Die Steigung ist hier schwieriger zu vergleichen, da die Abweichungen bei den 4PBB-Versuchen größer sind als bei den vorherigen Betrachtungen. Es lässt sich wieder feststellen, dass beim AC 32 die Differenz im Bereich von ca. 75 $\mu\text{m}/\text{m}$ liegt, aber beim AC 22 keine solche Aussage getroffen werden kann. Daher kann man sagen, dass es nicht von Vorteil ist, wenn alle Ergebnisse miteinander verglichen werden, denn die Aussagekraft sinkt dadurch.

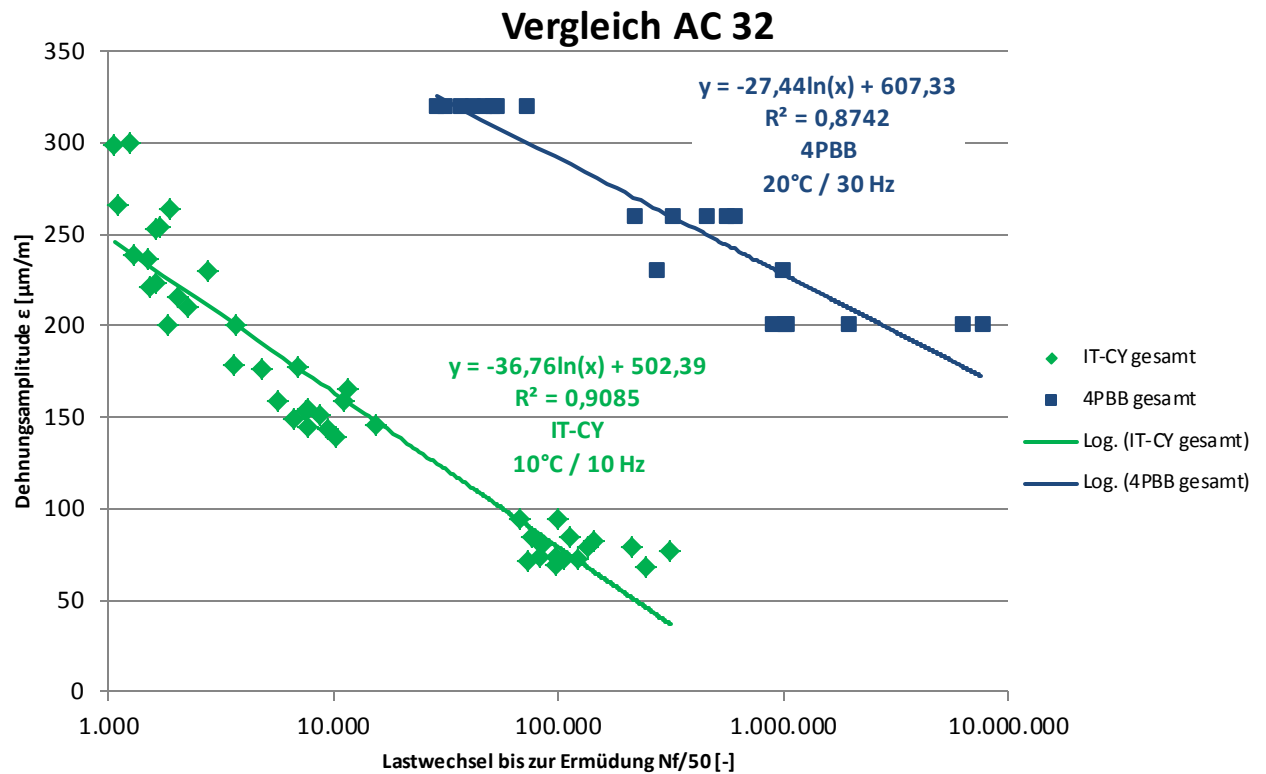


Abbildung 34: Vergleich aller Versuchsergebnisse; AC 32

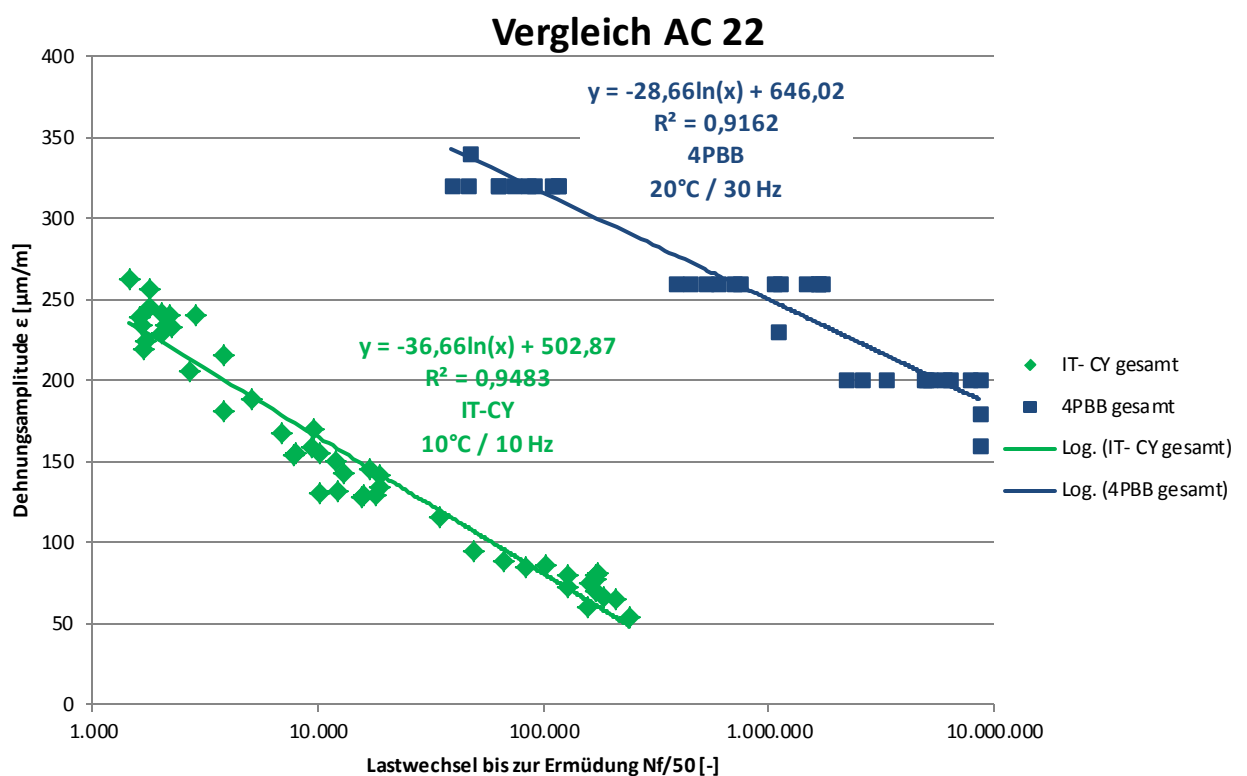


Abbildung 35: Vergleich aller Versuchsergebnisse; AC 22

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ergebnisse der Indirekten Zugversuche beim AC 22 sowie beim AC 32 fast genau übereinstimmen. Die Steigungen sind bis auf geringe Abweichungen vergleichbar. Die Ergebnisse der Dauerhaltbarkeiten der IT-CY-Versuche lagen beim AC 32 in einem Bereich von $\epsilon_4 = 158 \mu\text{m/m}$ bis $170 \mu\text{m/m}$ und beim AC 22 zwischen $\epsilon_6 = 159 \mu\text{m/m}$ und $170 \mu\text{m/m}$. Nach der Bestimmung der Mittelwerte der Dauerbeständigkeit der laborhergestellten Probekörper sowie der Probekörper aus Bohrkernen wurden diese miteinander verglichen. Dieser Vergleich weist bei beiden Mischgütern eine maximale Abweichung von 2 % auf. Somit kann festgehalten werden, dass die im Labor hergestellten Probekörper anstelle der Probekörper aus Bohrkernen zur Bestimmung der Ermüdungsbeständigkeit verwendet werden können.

Weiters wurden die Vierpunktbiegebalken-Versuche mit den Spaltzug-Schwellversuchen verglichen. Es wurden bei beiden Versuchen laborhergestellte Probekörper den Prüfungen bei unterschiedlichen Prüfbedingungen unterzogen. Die Ergebnisse der 4PBB-Versuche sind hundertmal so groß wie die Ergebnisse der IT-CY-Versuche. Deshalb ist der Vergleich problematisch. Die Steigungen der IT-CY-Ergebnisse sowie der 4PBB-Ergebnisse lassen sich beim AC 22 sehr gut vergleichen, da sie annähernd die selben sind. Beim AC 32 lässt sich keine klare Aussage über diesen Vergleich treffen. Die Dauerhaltbarkeit ϵ_6 der 4PBB-Ergebnisse des AC 32 sind um ungefähr $75 \mu\text{m/m}$ größer als der Mittelwert der Dauerhaltbarkeiten ϵ_4 der beiden IT-CY-V Versuchsergebnisse. Beim AC 22 kann das nur festgestellt werden, wenn die Erstprüfung sowie das zweite geprüfte Mischgut außer Acht gelassen werden. Deshalb kann man feststellen, dass der Vergleich anhand der Dauerhaltbarkeit eher wenig aussagekräftig ist. Weiters kann man festhalten, dass sich die Steigung bei Mischgütern mit geringerer Korngröße sehr gut vergleichen lässt. Umso höher die Korngröße steigt, desto weniger kann eine Aussage getroffen werden. Denn es handelt sich um Punktprüfungen, und aufgrund der kleinen Abmessungen der Probekörper im Vergleich zu den großen Korngrößen kann es passieren, dass die Lastableitung und Verteilung nicht mehr so funktioniert wie in der Straßenschicht.

Abschließend konnten noch alle Ergebnisse verglichen werden. Hier kann man feststellen, dass es keinen Vorteil bringt, wenn man Ergebnisse aus laborhergestellten Probekörpern und Probekörpern aus der Straße vermischt. Weiters kann man sagen, dass bei verschiedenen 4PBB-Versuchen die Streuungen immer größer sind und dadurch die Aussagekraft sinkt.

Aufgrund dieser Schlussfolgerungen lassen sich noch folgende Fragestellungen für weitere Untersuchungen festhalten:

- Kann bei Asphalten mit den selben Anforderungen und bei gleichen Versuchsbedingungen (Temperatur oder Frequenz) ein besserer Zusammenhang zwischen den Steigungen festgestellt werden?

- Können bei Wiederholungsprüfungen die Abweichungen der 4PBB-Versuche verbessert werden?

Das in weiteren Versuchen zu überprüfen, ist sicher interessant und spannend und liefert möglicherweise weitere wertvollere Ergebnisse.

I. Literaturverzeichnis

- Blab, R. (2006). Asphalt im Kontext der neuen Europäischen Norm. Gestrata Bauseminar 2006.
- Blab, R. (2007). Asphalt - empirisch oder fundamental. *Gestrata Journal*, 116, 35.
- CEN. (2008). EN 13108-1: Bituminous mixtures - Material specifications - Part 1: Asphalt Concrete. Brussels.
- CEN. (2009). DIN EN 1993-1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung.
- CEN. (2012a). EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie. Brussels.
- CEN. (2012b). EN 12697-6: Asphalt—Prüfverfahren für Heißasphalt—Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern.
- CEN. (2012c). EN 12697-24: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. Brussels.
- CEN. (2012d). EN 12697-26: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit. Brussels.
- CEN. (2013). EN 12697-33: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Rollenverdichtungsgerät. Brussels.
- Chemie.de. (2016a). Gesteinskörnung. Retrieved from Retrieved from mso-bidi-language:AR-SA"><http://www.chemie.de/lexikon/Gesteinsk%C3%B6rnung.html>
- Chemie.de. (2016b). Thixotropie. Retrieved from <http://www.chemie.de/lexikon/Thixotropie.html>
- Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundström, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures.
- Eberhardsteiner, L. (2014). Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt. *Straße und Autobahn*.
- Eberhardsteiner, L., & Buchta, M. (2015). Bedeutung der Ermüdung im Asphaltstraßenbau. *Gestrata Journal*, 144, 40.

- FGSV. (2009). Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung: AL SP-Asphalt 09. Köln.
- Fink, J. (WS 2011/2012). *Studienblätter zur Vorlesung STAHLBAU 1*.
- FSV. (2012). RVS 08.97.05 - Anforderungen an Asphaltmischgut: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr.
- FSV. (2013). RVS 08.97.06 - Anforderungen an Asphaltmischgut - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr.
- Gestrata. Asphalt Welten - Gestrata Image Broschüre. *Gestrata Journal*.
- Handle, F. (2013). *Bitumen Structure and Bitumen Ageing*. Retrieved from 15th Austrian Chemistry Days, Graz:
- Hartner, O. (2010). Bindemittel *Gestrata Asphalthandbuch*. Wien: Gestrata.
- Hartung, J., Elpelt, B., & Klösener, K.-H. (2009). *Statistik: Lehr-und Handbuch der angewandten Statistik*: Walter de Gruyter.
- Hofko, B., Blab, R., & Mader, M. (2012). Impact of Air Void Content on the LVE Behavior of HMA. UC Davis.
- Hofko, B., Steiner, D., & Kluger-Eigl, W. (2016). *Zwischenbericht: Errichtung einer Untersuchungsstrecke Teil 2: Messtechnische Betreuung der GVO Untersuchungsstrecke*. Wien.
- Kappl, K. (2008). *Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit Hilfe von zyklischen Triaxialprüfungen: Assessment and modelling of permanent deformation behavior of bituminous mixtures with triaxial cyclic compression tests*: ISTU.
- Kappl, K. (2011). GVO konzipierte Asphalte - was ist anders? *Gestrata Journal, Folge 132*, 44.
- Krzemien, R. (2010). Gesteinskörnungen *Gestrata Asphalthandbuch*. Wien: Gestrata.
- Luza, G., Palka, M., Schnaubelt, S., & Ramberger, G. (2007). *Stahlbau: Grundlagen, Konstruktion, Bemessung*: Manz Verlag Schulbuch.
- Müller, W., & al., e. (2010). Asphalt im Straßenbau *Gestrata Asphalthandbuch*. Wien: Gestrata.
- Müller, W., & Vasiljevic, A. (2010). Asphalt im Straßenbau *Gestrata Asphalthandbuch*. Wien: Gestrata.

- Neroth, G., & Vollenschaar, D. (2011). Bitumenhaltige Baustoffe. In G. Neroth & D. Vollenschaar (Eds.), *Wendehorst Baustoffkunde* (pp. 751-811): Vieweg+Teubner.
- Piringer, G., & Schiller, W. (2009). Gussasphalt in der Praxis - Eigenschaften und Einsatzgebiete. *Gestrata Journal*, 125, 27.
- Richard, H.-A., & Sander, M. (2009). Ermüdungsrisse. *Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden*.
- Schumann, W. (1975). Steine und Mineralien. Ein Bestimmungsbuch.
- Steiner, D. (2014). *Entwicklung und Optimierung einer Labor- Alterungsmethode für Asphaltprobekörper zur Simulation der Langzeitalterung und Bewertung der Alterungsbeständigkeit*. Retrieved from Wien:
- Wikipedia. (2016). Materialermüdung. Retrieved from <https://de.wikipedia.org/wiki/Bitumen>
- ÖNORM. (2011). ÖNORM B3613 Polymermodifizierte Bitumen für den Straßenbau - Anforderungen.

II. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: DARSTELLUNG DER BITUMENAUFTRENNUNG NACH POLARITÄT DER BESTANDTEILE (HANDLE, 2013)	16
ABBILDUNG 2: MODELL DER MIKRO-PHYSIKALISCHEN STRUKTUR VON BITUMEN (EBERHARDSTEINER, 2014)	17
ABBILDUNG 3: KREISLAUF DER MINERALE (SCHUMANN, 1975)	20
ABBILDUNG 4: PERIODISCHE BEANSPRUCHUNG (RICHARD & SANDER, 2009)	22
ABBILDUNG 5: WÖHLERKURVE (LUZA, PALK, SCHNAUBELT, & RAMBERGER, 2007)	23
ABBILDUNG 6: ERMÜDUNGSFESTIGKEITSKURVE NACH EN 1993-1-9 (CEN, 2009; LUZA ET AL., 2007)	23
ABBILDUNG 7: STEIFIGKEITSENTWICKLUNG WÄHREND EINES ERMÜDUNGSVERSUCHS (DI BENEDETTO ET AL., 2004)	26
ABBILDUNG 8: PRINZIPIELLER VERSUCHSAUFBAU DES 4PBB-VERSUCHS (HOFKO, BLAB, & MADER, 2012)	29
ABBILDUNG 9: VERSUCHSAUFBAU VIERPUNKT-BIEGEPRÜFUNG	31
ABBILDUNG 10: VERSUCHSAUFBAU EINES INDIREKTEN ZUGVERSUCHS	32
ABBILDUNG 11: HORIZONTALER SPANNUNGSVERLAUF DES PROBEKÖRPERS (FGSV, 2009; STEINER, 2014)	33
ABBILDUNG 12: WÖHLERKURVE EINES AC 22 (20°C / 30 Hz)	42
ABBILDUNG 13: BEISPIEL EINER VERSUCHSAUSWERTUNG (FGSV, 2009)	43
ABBILDUNG 14: BEISPIEL EINER ERMÜDUNGSFUNKTION (20°C / 10 Hz), (FGSV, 2009)	43
ABBILDUNG 15: HERSTELLUNG EINER PLATTE	46
ABBILDUNG 16: PROBEKÖRPER FÜR DIE 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG (HOFKO ET AL., 2012)	46
ABBILDUNG 17: PROBEKÖRPERHERSTELLUNG FÜR DIE IT-CY-VERSUCHE	47
ABBILDUNG 18: EINTEILUNG ABSCHNITTE UNTERSUCHUNGSSTRECKE (HOFKO ET AL., 2016)	47
ABBILDUNG 19: AUFBAU DER ABSCHNITTE DER VERSUCHSSTRECKE (HOFKO ET AL., 2016)	48
ABBILDUNG 20: SCHICHTDICKENBESTIMMUNG	48
ABBILDUNG 21: SCHEMA DER PROBEKÖRPERVORBEREITUNG	49
ABBILDUNG 22: PROBEKÖRPER FÜR 4PBB-PRÜFUNGEN	50
ABBILDUNG 23: BOHRKERNE	50
ABBILDUNG 24: ERGEBNIS 4PBB-PRÜFUNG AC 32 (20°C / 30 Hz)	59

ABBILDUNG 25: ERGEBNIS 4PBB-PRÜFUNG AC 22 (20°C / 30 Hz)	60
ABBILDUNG 26: ERGEBNISSE DES IT-CY-VERSUCHS DER IM LABORHERGESTELLTEN PK; AC 32 (10°C / 10 Hz).....	61
ABBILDUNG 27: ERGEBNISSE DES IT-CY-VERSUCHS DER IM LABORHERGESTELLTEN PK; AC 22 (10°C / 10 Hz).....	62
ABBILDUNG 28: ERGEBNISSE DES IT-CY-VERSUCHS DER PROBEKÖRPER DER PROBESTRECKE 3A BZW. 3M (10°C / 10 Hz)	63
ABBILDUNG 29: ERGEBNISSE DES IT-CY-VERSUCHS DER PROBEKÖRPER DER PROBESTRECKE 1A BZW. 2A (10°C / 10 Hz).....	64
ABBILDUNG 30: VERGLEICH IT-CY LABOR MIT DEN BK; AC 32 (10°C / 10 Hz)	66
ABBILDUNG 31: VERGLEICH IT-CY LABOR MIT DEN BK; AC 22 (10°C / 10 Hz)	66
ABBILDUNG 32: VERGLEICH 4PBB – IT-CY; AC 32	68
ABBILDUNG 33: VERGLEICH 4PBB – IT-CY; AC 22	68
ABBILDUNG 34: VERGLEICH ALLER VERSUCHSERGEBNISSE; AC 32	71
ABBILDUNG 35: VERGLEICH ALLER VERSUCHSERGEBNISSE; AC 22	71

III. Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNGSBEREICHE VON PMB 45/80-65 (HARTNER, 2010)	19
TABELLE 2: CODES DER BOHRKERNENTNAHME (HOFKO ET AL., 2016).....	51
TABELLE 3: PROBEKÖRPERKENNGRÖßEN (CEN, 2012B)	52
TABELLE 4: STATISTISCHE AUSWERTUNG DER RAUMDICHTEN; AC 32	54
TABELLE 5: STATISTISCHE AUSWERTUNG DER RAUMDICHTEN; AC 22	56
TABELLE 6: VORVERSUCH DES BOHRKERN E754A (AC 22) 20°C	58
TABELLE 7: VORVERSUCH DES BOHRKERN E756G (AC 32) 10°C	58
TABELLE 8: OBERSPANNUNGEN DER VERSCHIEDENEN IM LABOR HERGESTELLTEN PROBEKÖRPER.....	61
TABELLE 9: OBERSPANNUNGEN DER VERSCHIEDENEN IM LABOR HERGESTELLTEN PROBEKÖRPER.....	62
TABELLE 10: OBERSPANNUNGEN DER VERSCHIEDENEN PROBEKÖRPER AUS BOHRKERNEN.....	63