Diplomarbeit

Prüfung des Gebrauchsverhaltens von Asphaltmischgut und Asphaltmastix

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

Assessing the performance of asphalt mixture and asphalt mastic

submitted in satisfaction of the requirements for the degree
Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Taha ALDHAHI, BSc

Matr.Nr.: 01529353

Betreuung: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Hofko
Institut für Verkehrswissenschaften –
Christian Doppler Labor für Chemo-
Mechanische Analyse von Bituminösen Stoffen
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E230-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2025

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anmerkung

Ich bestätige, dass für die Fertigstellung dieser Arbeit mit dem Titel „Prüfung des Gebrauchsverhaltens von Asphaltmischgut und Asphaltmastix“ QuillBot, ein entwickeltes Sprachmodell für künstliche Intelligenz, verwendet wurde. QuillBot half bei der Verfeinerung der Formulierungen, bot Vorschläge an und las das Manuskript Korrektur. Obwohl sich QuillBot als wertvolles Hilfsmittel zur Unterstützung meiner akademischen Aktivitäten erwiesen hat, bin ich mir bewusst, dass seine Beiträge algorithmisch generiert werden und nicht die Arbeit menschlicher Forscher oder Experten darstellen. Darüber hinaus übernehme ich die volle Verantwortung für den endgültigen Inhalt und die Analyse meiner Abschlussarbeit. Ich erkläre, dass alle Abschnitte meiner Diplomarbeit, einschließlich derjenigen, die durch Interaktionen mit QuillBot entstanden sind, den von der Technischen Universität Wien geforderten akademischen Standards für Integrität, Zitierung und Originalität entsprechen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko vom Institut für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität für die Bereitstellung dieses Themas und die intensive Betreuung. Ich möchte mich auch beim gesamten Team des Straßenbaulabors des Forschungsbereichs für Straßenwesen für die äußerst herzliche Aufnahme, die Betreuung und Unterstützung bedanken. Insbesondere bedanke ich mich bei Bernhard Hadler, Thomas Riedmayer und David Valentin für die Unterstützung und Hilfe bei den Labortätigkeiten.

Ein weiterer großer Dank gilt meinen ArbeitskollegInnen, die mir neben meinem Studium an der TU Wien eine flexible Arbeitszeiteinteilung ermöglichten und mich in dieser Zeit großzügig unterstützten. Dank gilt auch meinen StudienkollegInnen, die mich während der Zeit meines Studiums begleitet und unterstützt haben.

Zum Abschluss möchte ich mich herzlich bei meiner Familie, meinen Verwandten und FreundInnen bedanken, die mir in emotionaler Hinsicht eine große Stütze waren. Meiner Verlobten Dalia, die zu mir stand, mich motivierte, mir gut zuredete und immer Verständnis für stressige Phasen hatte, gebührt ein besonderes Dankeschön!

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Kurzfassung

Eine dauerhafte und dadurch langanhaltende Straßeninfrastruktur bildet das Fundament und die Voraussetzung für hochentwickelte Gesellschaften, ist eine Basis für wirtschaftliches Wachstum und dient als Grundlage, um die Mobilitätsbedürfnisse der Menschen zu erfüllen. In Österreich existiert ein umfassendes System zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle (QS/QK) im Asphaltstraßenbau, basierend auf Typ-, Kontroll- und Abnahmeprüfungen. Dieses System ist in zahlreichen Normen und Richtlinien geregelt, wobei sowohl rezeptbasierte (empirische) als auch gebrauchverhaltensorientierte (GVO, funktionale) Anforderungen an Mischgut und Schichten festgelegt werden können. Durch die steigende Komplexität von Ausgangsstoffen und Rezepturen, die beispielsweise durch höhere Anforderungen aufgrund von Verkehrs- und Klimabelastungen entsteht, geht der für rezeptorientierte Anforderungen notwendige Erfahrungshintergrund langsam verloren. Aus diesem Grund wird der funktionale Ansatz, bei dem Mischgut im Labor in ähnlicher Weise wie auf der Straße unter Klima- und Verkehrsbedingungen beansprucht wird, an Bedeutung gewinnen. Durch diese Simulation wird sichergestellt, dass das Mischgut auch unter Laborbedingungen realitätsorientiert geprüft wird. Obwohl das derzeitige Verfahren zur Simulation der Belastungssituation auf der Straße durch GVO-Prüfmethoden effektiv ist, benötigt es den Einsatz großer Materialmengen und einen erheblichen Zeitaufwand für die Prüfungen. Dies ist in den meisten Fällen von laufenden Bauprojekten nicht realisierbar, vor allem die erforderlichen, kostenintensiven und komplizierten Prüfgeräte, die in Österreich nur eingeschränkt verfügbar sind.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird als Ermüdungsprüfung auf Asphaltebene der Spaltzug-Schwellversuch (CIT-CY) durchgeführt, der auf den Grundsätzen der Europäischen Normen (ÖNORM EN 12697-24 und ÖNORM EN 12697-26) basiert. Auf Asphaltmastixebene existieren noch keine normativen Grundlagen zu Ermüdungsprüfungen. Daher wurde an der TU Wien-IVWS ein standardisierter Ermüdungsversuch im dynamischen Scherr-Rheometer (DSR) mit einem hyperbolischen Probekörper entwickelt. Die resultierenden Daten werden analysiert und miteinander verglichen. Es wird auch nach potenziellen Zusammenhängen zwischen beiden Ebenen gesucht.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Polymermodifikation von Bitumen sowie die Änderung des Füller-Bitumen-Verhältnisses einen wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der beiden Ebenen haben, im Gegensatz zu anderen Rezepturparametern. Darauf kann für zukünftige Arbeiten aufgebaut werden. Die Zusammenhänge zwischen dem Ermüdungsverhalten auf Asphalt- und Mastixebene können bei der Steifigkeit der beiden Ebenen zuverlässig sein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abstract

A durable and thus long-lasting road infrastructure forms the foundation and prerequisite for highly developed societies, serves as a basis for economic growth, and provides the groundwork to meet the mobility needs of people. In Austria, there is a comprehensive system for quality assurance and quality control (QA/QC) in asphalt road construction, based on type, control, and acceptance tests. This system is regulated by numerous standards and guidelines, whereby both recipe-based (empirical) and performance-based (GVO, functional) requirements for the mixture and layers can be established. Due to the increasing complexity of raw materials and mix designs, which arises, for example, from higher demands due to traffic and climate stresses, the necessary experience background for recipe-oriented requirements is slowly being lost. For this reason, the functional approach, in which the mixture is tested in the laboratory in a manner similar to that on the road under climate and traffic conditions, is being adopted. Through this simulation, it is ensured that the mixture is tested under laboratory conditions in a way that is realistic and reflective of field stresses. Although the current method for simulating the stress situation on the road using performance-based (GVO) testing methods is effective, it requires the use of large quantities of materials and a significant amount of time for the tests. This is not feasible in most cases of ongoing construction projects, especially the required, costly, and complicated testing equipment, which is only available to a limited extent in Austria.

As part of this thesis, the Cyclic Indirect Tensile Test for Cylindric Specimens (CIT-CY) is conducted at the asphalt mixture level, which is based on the principles of the European Standards (ÖNORM EN 12697-24 and ÖNORM EN 12697-26). At the asphalt mastic level, there are still no normative foundations for fatigue tests. Therefore, a standardized fatigue test in the dynamic shear rheometer (DSR) with a hyperbolic specimen was developed at TU Wien-IVWS. The resulting data will be analyzed and compared with each other. Potential correlations between both levels are also being investigated.

The results illustrate that the polymer modification of bitumen as well as the change in the filler-bitumen ratio have a significant impact on the fatigue behavior of both levels, in contrast to other formulation parameters. This can be built upon for future work. The relationships between the fatigue behavior at the asphalt and mastic levels can be reliably given by the stiffness of both levels.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 8

1.1 Aufgabenstellung 8

1.2 Zielsetzung 9

2 Materialien 11

2.1 Bitumen 11

2.2 Gesteinskörnung 12

2.3 Asphaltmischgut 13

2.3.1 Kennzeichnung des Asphalts 14

2.3.2 Asphaltmischgüter 15

2.4 Asphaltmastix 17

3 Prüfmethoden 18

3.1 Asphaltmischgutebene 18

3.1.1 Asphaltprüfungen 18

3.1.2 Herstellung der Asphaltprobekörper 19

3.1.3 Bestimmung der Probekörperkenngrößen 21

3.1.4 Prüfung der Beständigkeit des Asphalts gegen Ermüdung 24

3.2 Mastixebene 32

3.2.1 Asphaltmastixprüfungen 32

3.2.2 Bitumen Alterung 33

3.2.3 Dynamic Shear Rheometer (DSR) 35

4 Auswertung und Interpretation der Prüfungsergebnisse 38

4.1 Asphaltmischgutebene 38

4.1.1 Spaltzugschwellprüfung (CIT-CY) 38

4.1.2 Ermüdungskurven für Asphaltmischgüter 39

4.1.3 Korrelation zwischen Lastwechsel bis zur Ermüdung und Oberspannung 41

4.1.4 Korrelation zwischen den Elastischen Anfangsdehnung und Oberspannung in CIT-CY 43

4.2 Mastixebene 45

4.3 Zusammenhang zwischen Asphalt- und Mastixebene: 47

4.3.1 Korrelation zwischen DSR-$T6$ und CIT-CY L.W. bis zur Ermüdung 47

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.3.2 Korrelation zwischen DSR-***T6*** und CIT-CY Oberspannung. 49
4.3.3 Korrelation zwischen DSR-***T6*** und CIT-CY elastische Anfangsdehnung..... 50
4.3.4 Korrelation zwischen Mastix- und Asphaltsteifigkeit. 52
5 Zusammenfassung..... 54
6 Literaturverzeichnis 56
7 Abbildungsverzeichnis 59
8 Tabellenverzeichnis 61
9 Anhang..... 62

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

In Österreich bestehen zwei parallele Normen- und Richtlinien-Familien für die Anforderungen an Asphaltmischgut und Asphaltschichten: rezeptorientierte bzw. empirische (ÖNORM B358x-1 bzw. RVS 08.97.05 und RVS 08.16.01) sowie gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) bzw. funktionale (ÖNORM B358x-2 bzw. RVS 08.97.06 und RVS 08.16.06).

Die Vorteile der GVO-Prüfmethoden bestehen darin, dass mit diesen Prüfungen die wesentlichen Gebrauchseigenschaften wie das Kälteverhalten, die Steifigkeit, der Widerstand gegen bleibende Verformung sowie der Widerstand gegen Ermüdung untersucht werden können. Mit ihrer Hilfe wird das erwartete Gebrauchsverhalten des Asphaltes im Feld abgeschätzt, auch aus wirtschaftlicher Sicht.

Allerdings benötigen die aktuell angewendeten GVO-Prüfmethoden den Einsatz großer Materialmengen und einen erheblichen Zeitaufwand für die Prüfungen. Dies ist in den meisten Fällen von laufenden Bauprojekten nicht realisierbar, vor allem die erforderlichen, kostenintensiven und komplizierten Prüfgeräte, die in Österreich nur eingeschränkt verfügbar sind.

Derzeit fehlt den Bauherren (Ausschreibenden) und der Bauwirtschaft eine technisch-wissenschaftlich fundierte Methodik zur Beurteilung einer erzielbaren technischen Qualitätssteigerung bei Einsatz von neu entwickelten Asphaltmischgütern im Vergleich zu gängigen Standardasphalten. Ebenso können mit den derzeitigen Instrumentarien mögliche Schichtdickenreduktionen oder verringerte Lebenszykluskosten durch erhöhte GVO-Anforderungen an die eingesetzten (Sonder-)Asphalte nicht adäquat beurteilt und dargestellt werden. Damit stehen derzeit dem mit dem GVO-Ansatz verbundenen höheren Prüfaufwand und -kosten kein technisch wirtschaftlich darstellbarer Vorteil gegenüber, weshalb auf Seiten der Industrie der Anreiz zur Entwicklung innovativer bituminöser Baustoffe oder zur Konzeption neuer nach dem GVO-Ansatz optimierter Oberbausysteme beschränkt bleibt.

Das Institut für Verkehrswissenschaften (IVWS), Forschungsbereich für Straßenwesen, der TU Wien wurde mit dem Forschungsprojekt „Innovative Qualitätssicherung von Baustoffen für Asphaltstraßen“ durch die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) beauftragt. Das Projekt ist in mehrere Arbeitspakete gegliedert: Ermüdung, Kälteverhalten, Datenanalyse, Dimensionierung und Berichtlegung. Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des oben genannten Projektes erstellt, wobei sich der Umfang ausschließlich auf das Arbeitspaket „Ermüdung“ bezieht.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Motivation des beantragten Projekts ist es, diese Brücke zwischen Mischgut- und Bindemittel-/Mastix-Ebene im Bereich des mittleren und tiefen Temperaturbereichs zu schlagen, um das funktionale bzw. GVO-Prüfwesen in Österreich weiterzuentwickeln, praxistauglich zu gestalten und für das Normen- und Richtlinienwerk umzusetzen.

Dies soll durch eine Kombination aus

- intelligenter und effizienter Wahl der Mischgutvarianten,
- umfassender Materialprüfung auf Mischgut-, Mastix- und Bindemittelebene,
- Korrelationsanalyse mittels (multi-)linearer und multivariater Datenanalyse und
- praxisrelevanter Zusammenfassung in Form von Richtlinien-Entwürfen

erfolgen.

1.2 Zielsetzung

Derzeit ist ein Prognosemodell (Mastix-Mischgut) für Deckschicht-Mischgüter verfügbar [1] , [2] . Damit das Modell auch für die praktische QK/QS einsetzbar wird, muss es um repräsentative Binder- und Tragschichten erweitert werden. Daher werden in Abstimmung mit dem Auftraggeber sieben Mischgutvarianten auf Asphalt- und Mastixebene für Binder- und Tragschichtmischgut ausgewählt und geprüft.

Bindemittelsystem, Füllerart, Füller/Bitumen-Verhältnis und Größtkorn werden variiert, um wesentliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Nachdem sich die österreichische Normierung weiterentwickelt und in den nächsten Jahren die Vierpunkt-Biegeprüfung (4PB) durch die Spaltzug-Schwellprüfung (CIT-CY) für die QK/QS ersetzt wird, werden alle Mischgutvarianten mittels CIT-CY untersucht. So können Korrelationen zwischen allen Prüfmethoden abgeleitet werden.

Die Mischgut- und Probekörperherstellung im Labor wird zwischen den TU Wien IVWS und Nievelt Labor GmbH aufgeteilt, ebenso die Prüfung des Ermüdungsverhaltens, da sowohl die Vierpunkt-Biegeprüfung (4PB) als auch die Spaltzug-Schwellprüfung (CIT-CY) zur Anwendung kommen. Für einzelne Mischgutsorten werden Probekörper von beiden Labors parallel auf Ermüdung untersucht, um die Vergleichbarkeit der Prüfmaschinen darzulegen.

In dieser Diplomarbeit werden auf Asphaltmischgutebene aus jedem Mischgut von den sieben Mischgutvarianten Probekörper gemäß ÖNROM EN 12697-24 [3] und ÖNORM EN 12697-26 [4] hergestellt, vorbereitet und mit der Spaltzug-Schwellprüfung (CIT-CY) geprüft.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Auf Asphaltmastixebene werden dieselben Bindemittel sowie das Verhältnis von Bitumen zu Feinteilen ≤ 0,063 mm in jedem Asphaltmischgut zur Herstellung des Asphaltmastix-Mischguts verwendet. Derzeit existieren noch keine normativen Grundlagen zu Ermüdungsprüfungen. Daher wurde an der TU Wien-IVWS ein standardisierter Ermüdungsversuch im dynamischen Scherr-Rheometer (DSR) mit einem hyperbolischen Probekörper entwickelt und in dieser Diplomarbeit eingesetzt [5].

Aus den Prüfdaten der Ermüdungsprüfung auf Mischgut- und Mastixebene können verschiedene Parameter abgeleitet werden. Auf dieser Basis werden Analysenmethoden (lineare und multilineare Korrelationsanalysen) angewandt, um folgende Forschungsfragen, welche in dieser Diplomarbeit behandelt werden, beantworten zu können:

1. Wie ist der Einfluss von Rezepturparametern auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt und Mastix?
2. Wie sind die Zusammenhänge zwischen dem Ermüdungsverhalten auf Asphaltebene und Mastixebene?

Diese Diplomarbeit gliedert sich in folgende Abschnitte: Im zweiten Kapitel werden die einzelnen untersuchten Materialien der Mischgüter sowie Rezepturparameter für die Asphaltmischgutebene und die Mastixebene vorgestellt. Im dritten Kapitel werden sämtliche Prüfmethoden und ihre entsprechenden Prüfparameter erklärt, die bei der Prüfung der Asphaltmischgüte sowie Asphaltmastix verwendet werden. Die Ergebnisse dieser Prüfmethoden werden im vierten Kapitel dargestellt, wobei die Analyse bzw. die Bewertung dieser Ergebnisse diskutiert werden. Im fünften Kapitel werden alle wichtigen Feststellungen zusammengefasst und die oben genannten Forschungsfragen beantwortet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

2 Materialien

2.1 Bitumen

Bitumen ist ein schwerflüchtiges, dunkelfarbiges Gemisch verschiedener organischer Substanzen. Es wird bei der Destillation geeigneter Rohöle gewonnen. Die Besonderheit von Bitumen ist sein Verhalten als visko-elasto-plastisches Material. Dazu zählt auch seine starke Temperaturabhängigkeit. Bei hohen Temperaturen zeigt das Bitumen eine viskose Eigenschaft, während es bei niedrigen Temperaturen elastisch und spröde wird. Weitere Eigenschaften sind die Witterungsbeständigkeit, Wasserabweisung und Recyclierbarkeit. Allerdings zeigt das Bitumen bei langfristigen Witterungsbedingungen eine sogenannte Bitumenalterung, was die Viskoelastizität schwächt und die Versprödung erhöht [6]. Bitumen kann in verschiedene Sorten unterteilt werden, je nach Herstellungsmethoden, Eigenschaften und Anwendungsbereichen, wie zum Beispiel polymermodifiziertes Bitumen, Destillationsbitumen, Oxidationsbitumen, Fluxbitumen und Bitumenemulsion [7]. Abb. 2.1 stellt diese Sorten schematisch dar.

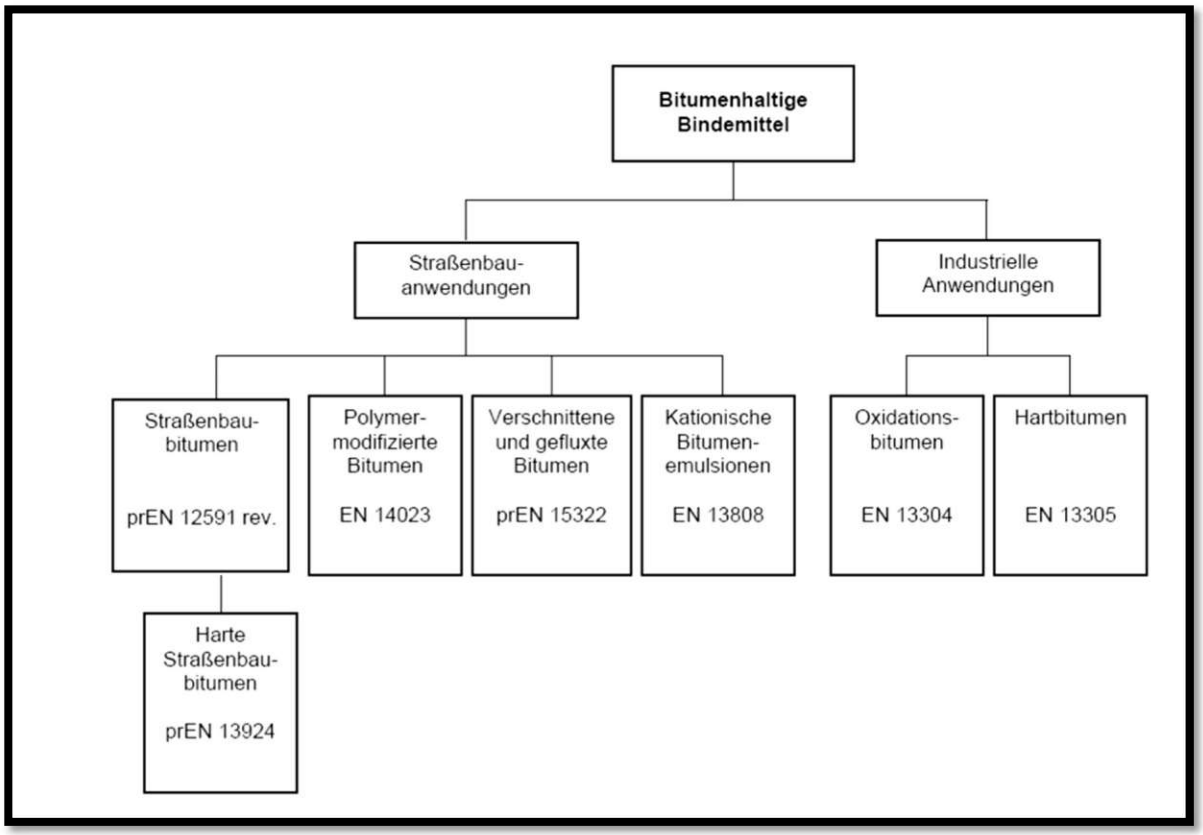

Abbildung 2.1: Bitumenhaltige Bindemittel **[7]**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Im Straßenbau mit Asphalt spielt das Bitumen eine wichtige Rolle. Es bindet die Gesteinskörnung zusammen im Asphaltmischgut und sorgt für eine wasserdichte Straßenoberfläche. Bitumen zeigt eine hohe Beständigkeit und Robustheit gegenüber intensivem Verkehr und extremen Wetterbedingungen. Hauptsächlich werden Straßenbaubitumen und polymermodifiziertes Bitumen im Straßenbau verwendet. Es wird nach dem Verfahren der Nadelpenetration gemäß ÖNORM EN 1426 sowie dem Verfahren Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß ÖNORM EN 1427 eingeteilt, wobei die Härte des Bitumens sowie die obere Grenze der Gebrauchsspanne maßgebend sind [6].

2.2 Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung übernimmt die Stützfunktion im Asphalt und ist für die Lastabtragung verantwortlich, ausgenommen von Gussasphalt, im Asphalt. Daher muss die Gesteinskörnung eine hohe Festigkeit aufweisen sowie weitere Eigenschaften wie z. B. Witterungs-, Frost- und Tausalzbeständigkeit, Schlag- und Druckfestigkeit, Widerstand gegen Hitze und gegen Polieren und die Affinität zum Bindemittel. Die Korngrößenzusammensetzung, auch als Sieblinie bezeichnet, muss auf die Verkehrsbelastung, Schichtdicke und Anwendungsbereich (Trag-, Binder- oder Deckschichten) abgestimmt werden. Geeignete Gesteinsarten für den Straßenbau sind Granit, Basalt, Kalkstein, Sandstein, Quarzit, recycelter Asphalt bzw. Beton usw. Die hochwertigen Gesteinskörnungen bilden die Grundlage für hochwertige Straßen [6] [8].

Nach der Korngröße wird die Gesteinskörnung unterteilt in [9]:

Grobe Gesteinskörnung: Durchmesser 2-45 mm

· Feine Gesteinskörnung: Durchmesser 0,063-2 mm

· Füller, Feinanteil: Durchmesser ≤ 0,063 mm

Feinanteile: ist jener Teil der Gesteinskörnung, deren überwiegender Teil durch das 0,063 mm-Sieb hindurchgeht [9].

Füller wird in „Fremdfüller“ und „Mischfüller“ unterteilt:

Fremdfüller: ist ein mineralischer Füller, der gezielt hergestellt und dem Asphaltmischgut zugegeben wird. Eine wichtige Art von Fremdfüller ist Kalkhydrat (*Calciumhydroxid* $Ca(OH)_2$). Es hat auch eine versteifende Wirkung auf das Bindemittel und das Mischgut, was dazu beiträgt, dass der Widerstand gegen Spurrinnenbildung verbessert wird und der Affinitätsverlust sowie die Alterung des Bitumens verringert werden [10].

Mischfüller: Füller mineralischen Ursprungs, der mit Kalkhydrat gemischt wurde [9].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die in dieser Diplomarbeit verwendete Gesteinskörnung ist Kalkstein aus dem österreichischen Steinbruch Bad Deutsch-Altenburg „Hollitzer“. Der verwendete Fremdfüller ist Kalksteinmehl.

2.3 Asphaltmischgut

Asphalt setzt sich aus Bitumen als Bindemittel und Gesteinskörnungen zusammen. Er kann in verschiedene Sorten unterteilt werden, wie zum Beispiel: Asphaltbeton AC, Gussasphalt MA, offenporiger Asphalt PA, Splittmastixasphalt SMA. Die Werkstoffkennwerte von Asphalt sind abhängig von dem Mischgutverhältnis und den Eigenschaften der beiden Bestandteile (Bitumen und Gesteinskörnungen). Die Asphaltmischgüter im Straßenbau bestehen aus 93-96 M-% Gesteinskörnungen und 4-7 M-% Bitumen. Um eine ausreichende Tragfähigkeit zu erreichen, sollen die Asphaltschichten möglichst dicht sein. Zusammen mit einer sachgemäßen Verdichtung beim Einbau wird ein hohlraumarmer Asphalt erstellt [6].

Im Regelfall setzt sich der gebundene Teil eines Asphaltstraßenoberbaus aus einer bituminösen Deck- und Tragschicht und eventuell einer dazwischenliegenden bituminösen Binderschicht zusammen. Eine Übersicht ist in Abb. 2.2 dargestellt. Diese Schichten werden basierend auf ihrer Funktionalität, Schichtdicke, Größtkorn, Hohlraumgehalt und Bindemittelgehalt unterschieden [6] [8]:

- Tragschicht: Verteilung und Ableitung der Verkehrslast in die ungebundenen Schichten.
- Binderschicht: wird auf hochrangigen Straßennetzen zur weiteren Lastverteilung verwendet, hergestellt mit polymermodifiziertem Bitumen.
- Deckschicht: Konservierung der Binder- und Tragschicht; direkter Kontakt mit Verkehrslasten, hat besondere Anforderungen an Reibungs- und Polierbeständigkeit.
- Kombinierte Trag-Deckschichten: Vereint die Aufgaben von Trag- und Deckschicht für untergeordnetes Straßennetz.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

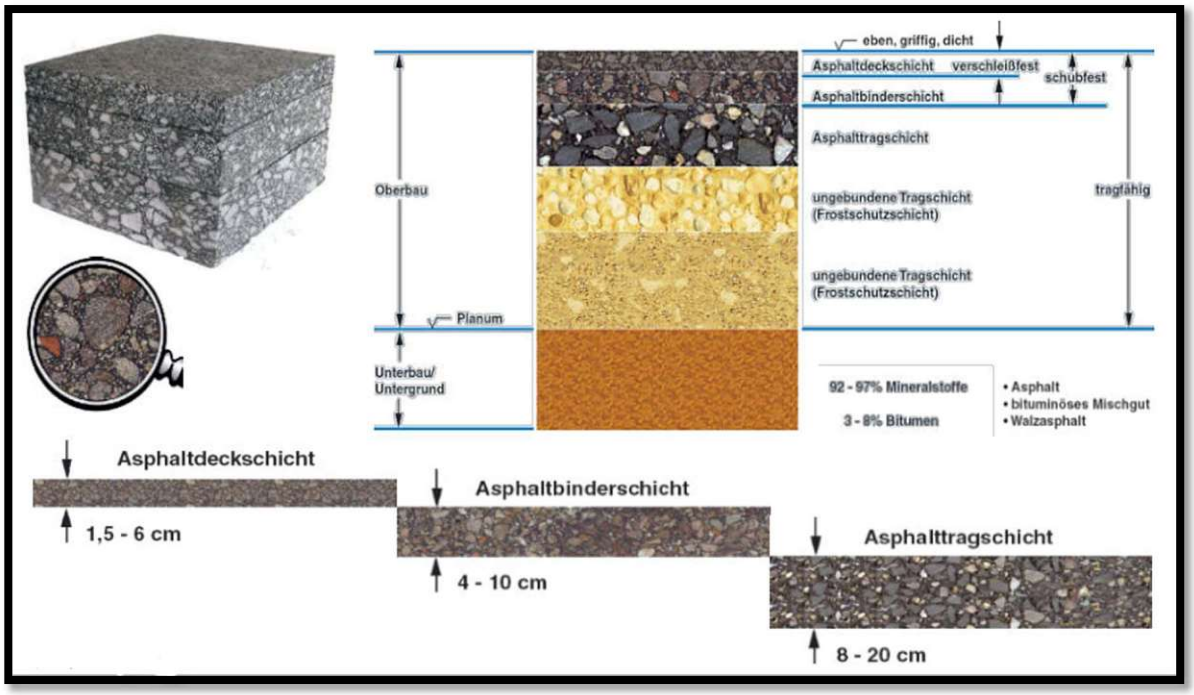

Abbildung 2.2: Asphaltstraßenbau **[7]**

2.3.1 Kennzeichnung des Asphalts

Die Kennzeichnung des Asphalts erfolgt entweder nach empirischer oder funktionaler Kategorisierung (siehe Abb. 2.3). Beide beschreiben den Asphalttyp, das Größtkorn, Deck-/Binder-/Tragschicht, das verwendete Bindemittel und die Gesteinsklasse. Der Unterschied liegt in der Kennzeichnung des empirischen Sieblinientyps (A1-A7) oder der funktionalen Anforderungen an das Gebrauchsverhalten, welche in Abb. 2.4 dargestellt sind [6].

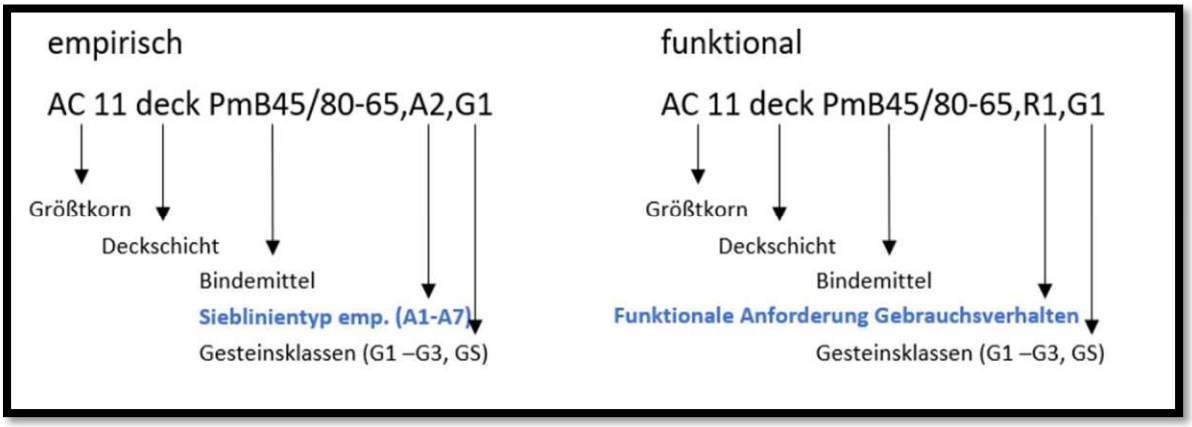

Abbildung 2.3: Kennzeichnung empirisch und funktional **[6]**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

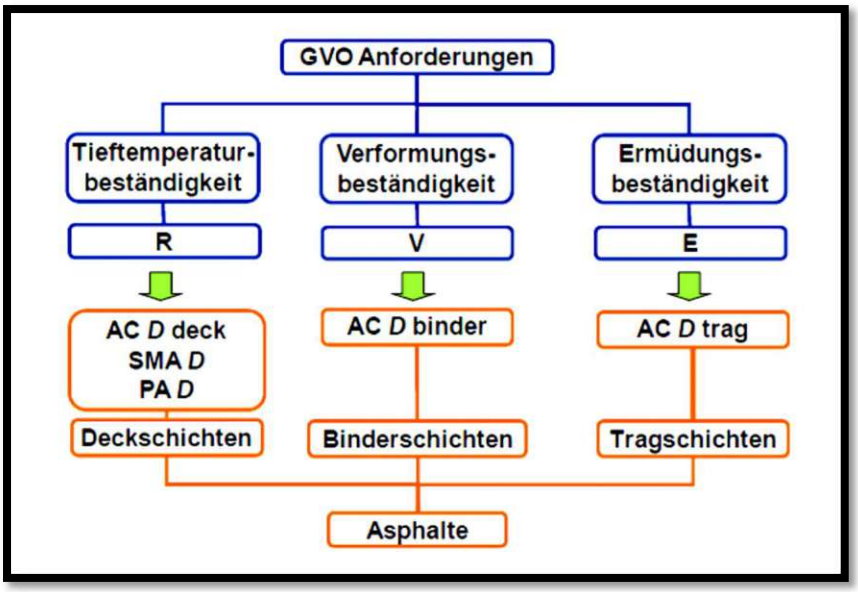

Abbildung 2.4: Gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) Anforderungen an Asphalt **[11]**

Die Bezeichnung nach dem Gebrauchsverhalten beinhaltet folgende Faktoren [11]:

- R=Risse: bezeichnet die Tieftemperaturbeständigkeit (Widerstand gegen Kälterissbildung infolge ver- bzw. behinderten thermischen Schrumpfens).
- V=Verformung: bezieht sich auf die Verformungsbeständigkeit (Widerstand gegen irreversible Verformungen infolge wiederholter Verkehrsbelastung).
- E=Ermüdung: weist auf die Ermüdungsbeständigkeit (Widerstand gegen einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess durch Risse).

2.3.2 Asphaltmischgüter

Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber werden in dieser Diplomarbeit die in Tabelle 2-1 aufgeführten sieben Asphaltmischgüter für Binder- und Tragschichtmischgut hergestellt und geprüft:

Tabelle 2-1: In dieser Diplomarbeit behandelte Asphaltmischgüter

Nr.	Typ	Bindemittel	Gestein	Füller	Anmerkung
1	AC 22 bin	PmB 45/80-65	Kalkstein	Kalksteinmehl	
2	AC 22 bin	PmB 25/55-65	Kalkstein	Kalksteinmehl	
3	AC 22 trag	50/70	Kalkstein	Kalksteinmehl	
4	AC 22 bin	PmB 45/80-65	Kalkstein	Kalksteinmehl	Var. B:F (Füller+)
5	AC 22 bin	PmB 45/80-65	Kalkstein	Kalksteinmehl	Var. B:F (Füller-)
6	AC 16 bin	PmB 45/80-65	Kalkstein	Kalksteinmehl	
7	AC 32 bin	PmB 45/80-65	Kalkstein	Kalksteinmehl	

Die Asphaltbinderschicht spielt im Straßenbau eine wichtige Rolle bei der Verteilung der Verkehrsbelastung. Neben der Aufnahme von Schubspannungen aus dem Verkehr,

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

welche in Abb. 2.5 dargestellt sind, ermöglicht die Asphaltbinderschicht einer gleichmäßigen Dicke der Asphaltdeckschicht bzw. ausgleicht der Unebenheiten der Asphalttragschicht. Daher muss sie verformungs- und ermüdungsbeständig sein, um die hohen Schubspannungen aufzunehmen und Verformungen zu verhindern [12]. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher auf der Asphaltbinderschicht und dem Einfluss ihrer Rezepturparameter auf die Ermüdungsbeständigkeit.

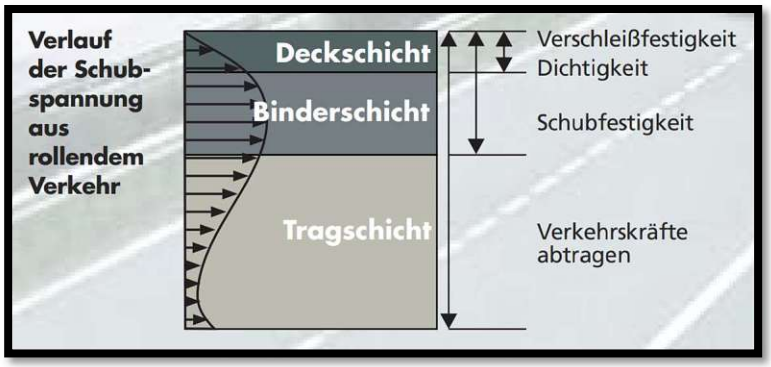

Abbildung 2.5: Verlauf der durch Verkehr resultierenden Schubspannung im Asphalt **[12]**

Als Referenzmischgut wird „AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4“ genommen und mit sechs verschiedenen Mischgütern verglichen, wobei das Bindemittel, der Füllergehalt und die Gesteinskörnung sequenziell variiert werden.

Als erste Mischgut-Variante wird „AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4“ mit härterem Bindemittel betrachtet. Die zweite Mischgut-Variante „AC 22 trag 50/70, T1, G4“ ist eine mit Straßenbaubitumen (nicht modifiziert). Alle anderen Rezepturparameter von Referenzmischgut bleiben unverändert.

Weiters wird der Einfluss des Fremdfüllers auf die Ermüdungsbeständigkeit untersucht. In dem eine Mischgut-Variante mit 4,2% Kalksteinmehl statt 1,2% im Referenzmischgut und eine weitere Variante ohne Kalksteinmehl hergestellt und geprüft werden. Ein optimales Maß des Fremdfüllers erhöht die Affinität im Asphaltmischgut und verbessert die Ermüdungsbeständigkeit. Jedoch kann ein Übermaß an Fremdfüller den Hohlraumgehalt verringern, was für die Ausdehnung des Bitumens im Asphalt relevant ist. Bitumen weist eine 20-mal höhere Wärmeausdehnung als Gesteinskörnungen auf. Daher kann eine Asphaltbinderschicht mit Hohlraumgehalt von weniger als 2% zu Verformungen führen. Andererseits kann ein zu geringes Maß an Fremdfüller den Hohlraumgehalt erhöhen, was das Risiko von Wasserdurchlässigkeit erhöht und die Schäden an der ungebundenen Tragschicht verursacht [8].

Die grobe Gesteinskörnung übernimmt die Stützfunktion im Asphalt. Daher muss die Variierung des Größtkorns bei der Untersuchung der Ermüdungsbeständigkeit auch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

berücksichtigt werden. Die vorletzte und letzte Mischgut-Variante werden mit Größtkorn von 16mm und 32mm hergestellt.

2.4 Asphaltmastix

Asphaltmastix, oder kurz Mastix, bezeichnet die Mischung aus Bitumen und Füller bzw. Feinanteilen. Er ist für den Verbund der groben Gesteinskörnung zuständig und somit maßgebend für den Zusammenhalt im Asphalt [13]. Da es keine normative Festlegung für das Größtkorn in Mastix gibt, wurde es im Rahmen dieser Diplomarbeit mit Feinanteilen mit einem Durchmesser von ≤ 0,063 mm definiert.

Zur Herstellung des Asphaltmastixes wird das Verhältnis Bitumen zum Füller- und Feinanteil ≤ 0,063 mm anhand der Soll-Sieblinie und dem gewählten Bitumengehalt aus jeder vorgegebenen Asphaltmischgutvariante in der Tabelle 2-2 berechnet.

Tabelle 2-2: Verhältnis Bitumen zum Füller- und Feinanteil ≤ 0,063 mm in den Asphaltmischgütern.

Nr.	Asphaltmischgut	Bitumenanteil vom Asphalt	Füller- und Feinanteil vom Asphalt 0,063mm	Bitumen:Füller- und Feinanteil 0,063mm
1	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	4,7%	5,9%	1:1,26
2	AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	4,7%	5,9%	1:1,26
3	AC 22 trag 50/70, T1, G4	4,7%	5,9%	1:1,26
4	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+	4,7%	8,31%	1:1,77
5	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-	4,7%	4,52%	1:0,96
6	AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	4,9%	6,38%	1:1,3
7	AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	4,7%	5,73%	1:1,22

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

3 Prüfmethoden

3.1 Asphaltmischgutebene

3.1.1 Asphaltprüfungen

Asphaltprüfungen können hauptsächlich in drei Gruppen unterteilt werden:

1. Allgemeine Prüfverfahren

Darunter zählen die im Labor durchgeführten Prüfungen zur Herstellung und Vorbereitung der Asphaltprobekörper für die konventionellen bzw. gebrauchsverhaltensorientierten Prüfungen [8].

- Korngrößenverteilung (EN 12697-2)
- Labormischungen (EN 12697-35)
- Laborverdichtung (4 Methoden EN 12697-30 to-33)
- Bestimmung der Maße von Probekörpern (EN 12679-29)
- Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken der Probekörper (EN 12679-8)
- Bestimmung der Rohdichte (EN 12679-5)
- Bestimmung der Raumdichte (EN 12679-6 und -7)
- Verdichtbarkeit (EN 12697-10)

2. Konventionelle Prüfverfahren

Hierzu zählen empirische Prüfmethoden, in denen geprüft werden kann, ob das Asphaltmischgut bestimmte konventionelle Parameter erfüllt, die erfahrungsgemäß mit einer adäquaten Leistung auf dem Feld in Verbindung stehen. Jedoch erfährt das Asphaltmischgut nicht die gleiche Beanspruchung wie in der Realität hinsichtlich Verkehrs- und Witterungsbedingungen. [8].

- Marshall-Prüfung (EN 12697-30 und -34)
- Wasserempfindlichkeit (EN 12697-12)
- Treibstoffbeständigkeit (EN 12697-43)
- Beständigkeit gegen Enteisungsmittel (EN 12697-41)
- Spurbildungstest (EN 12697-22)
- Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen (EN 12697-11)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3. Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen (GVO-Prüfungen)

Darunter zählen Prüfmethoden, die die Belastungssituation in der Straße gut simulieren (siehe Abb. 3.1).

- Tieftemperaturverhalten: Abkühlprüfung (TSRST - Thermal Stress Restrained Specimen Test) und direkter Zugversuch (UTST - Uniaxial Tensile Strength Test) (EN 12697-46)
- Verformungsverhalten: Triaxialer Druck-Schwellversuch (TCCT) (EN 12697-25)
- Ermüdung und Steifigkeit: Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR) und indirekter Zugversuch (IT-CY bzw. CIT-CY) (EN 12697-24 und -26)

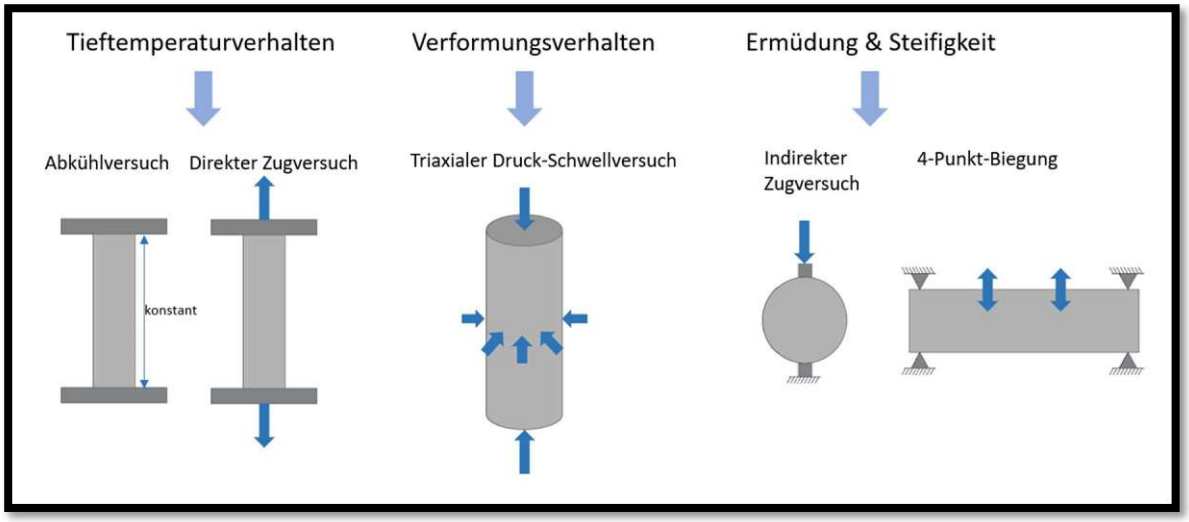

Abbildung 3.1: Übersicht der Gebrauchsverhaltensorientierten Prüfungen **[6]**

3.1.2 Herstellung der Asphaltprobekörper

Zur Herstellung der zylindrischen Probekörper für den indirekten Zugversuch (CIT-CY) wurden Gesteinskörnungen und entsprechende Einwaagen verwendet. Jede Gesteinskorngröße wurde manuell mit einer elektronischen Waage (Genauigkeit ±1 g) abgewogen. Eine Übersicht ist in Abb. 3.2 dargestellt. Dann wurde die abgewogene Gesteinskörnung separat mit dem zugeordneten Bitumen in einem Wärmeschrank mit Umluft 5 Stunden lang auf eine Temperatur von 190 °C erhitzt (Genauigkeit ±5 °C).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 3.2: Vorbereitung der Gesteinskörnung

Als Nächstes wurden die Gesteinskörnung und das zugeordnete Bitumen in einem Gegenlaufzwangsmischer 5 Minuten lang miteinander vermischt. Der Gegenlaufzwangsmischer ist auf eine Temperatur von 190 °C vorgeheizt.

Anschließend wurde die zur Herstellung der Asphaltplatte erforderliche Asphaltmischgutmenge manuell mit einer elektronischen Waage (Genauigkeit ±1g) abgewogen und in einer quaderförmigen Verdichtungsform gleichmäßig angelegt und mit dem Stahlwalzsegment-Verdichtungsgerät automatisch verdichtet. Sowohl die Verdichtungsform als auch das Einlegeblech und das Stahlwalzsegment sind auf eine Temperatur von 125 °C vorgeheizt, gemäß EN 12697-33 [14].

Die Abmessungen der hergestellten quaderförmigen Asphaltplatte sind von den Innenmaßen der Verdichtungsform abhängig, wobei die Länge 500 mm und die Breite 260 mm betragen. Die Höhe der Platte ist im Verdichtungsgerät verstellbar und je nach Größtkorn des Asphaltmischgutes auszuwählen. Bei den Asphaltmischgütern mit Größtkorn 22 mm sowie 16 mm wurden die Asphaltplatten mit einer Höhe von 60 mm hergestellt, während beim Asphaltmischgut mit Größtkorn 32 mm die Asphaltplatten mit einer Höhe von 90 mm hergestellt wurden [15]. Nach Ende des Verdichtungsprozesses wurden die Asphaltplatten in der Verdichtungsform unter Laboratmosphäre zum Abkühlen belassen.

Insgesamt wurden pro Asphaltmischgut vier Asphaltplatten hergestellt. Außerdem wurden von jedem Asphaltmischgut zwei unverdichtete (Lose) Asphaltproben zur Bestimmung der Rohdichte entnommen. Die Berechnung der Rohdichte erfolgt manuell mit einem Pyknometer gemäß EN 12697-5 [16].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Nach 24 Stunden wurde die Verdichtungsform geöffnet und die Aluminiumtrennstreifen von der unteren Seite der Asphaltplatte entfernt. Mittels einer Nass-Kernbohrmaschine wurden drei zylindrische Probekörper mit 150 mm Durchmesser aus jeder Asphaltplatte gebohrt, wie in Abb. 3.3 gezeigt. Anschließend wurden die Probekörper gekennzeichnet und zur Bestimmung der Raumdichte gemäß EN 12697-6 bereitgestellt.

Abbildung 3.3: Drei gebohrte Probekörper aus der Asphaltplatte.

3.1.3 Bestimmung der Probekörperkenngrößen

1. Raumdichte

Die Raumdichte bezeichnet die Masse eines Probekörpers, einschließlich der Hohlräume, bezogen auf sein Volumen bei bekannter Prüftemperatur. Jeder Probekörper wurde in einem temperierten Wasserbad bei +25 °C mindestens eine Stunde lang eingetaucht und nachher mittels Tauchwägung gewogen, um die Masse des Probekörpers in Wasser zu bestimmen. Dann wurde die Masse des gesättigten, oberflächlich abgewischten Probekörpers ermittelt. Zuletzt wurde das Probekörper auf einem Tisch unter Laboratmosphäre zur Trocknung belassen. Nach 24 Stunden wurden die Masse des trockenen Probekörpers sowie die mittlere Höhe und der mittlere Durchmesser gemäß ÖNORM EN 12697-29 [17] bestimmt. Die Raumdichte der Probekörper wurde gemäß ÖNORM EN 12697-6 Verfahren (B) (1) sowie Verfahren (D) (2) gleichzeitig mit Hilfe des im Labor vorhandenen Datenbanksystems (LaMa) gemäß ÖNORM EN 12697-6 [18] wie folgt ermittelt:

$$\boldsymbol{\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \rho_w} \tag{1}$$

Dabei ist [18]:

ρ_{bssd} gesättigte Oberfläche trocken Raumdichte [kg/m^3];

m_1 Masse des trockenen Probekörpers [g];

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

m_2 Masse des Probekörpers in Wasser [g];

m_3 Masse des mit Wasser gesättigten und oberflächlich abgetrockneten Probekörpers [mm];

ρ_w Dichte des Wassers bei Prüftemperatur [kg/m^3].

$$\boldsymbol{\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6} \tag{2}$$

Dabei ist [18]:

$\rho_{b,dim}$ durch Ausmessen bestimmte Raumdichte des Probekörpers (kg/m^3];

m_1 Masse des trockenen Probekörpers [g];

h Höhe des Probekörpers [mm];

d Durchmesser des Probekörpers [mm].

2. Rohdichte

Die Rohdichte bezieht sich auf die Masse des Asphalts ohne Hohlräume, bezogen auf das Volumen bei einer bekannten Prüftemperatur. Sie wird zusammen mit der Raumdichte benötigt, um den Hohlraumgehalt einer verdichteten Probe und andere mit dem Volumen im Zusammenhang stehende Eigenschaften eines verdichteten Asphalts zu berechnen. Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte nach dem volumetrischen Verfahren mittels Pyknometers gemäß ÖNORM EN 12697-5 Verfahren (A). Hierzu wurden zwei lose Asphaltproben aus dem Referenzmischgut „AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4“ entnommen und gemäß Arbeitsanweisung des IVWS-Labors der TU Wien [19] vorbereitet. Die Rohdichte von Asphalt wird durch die Sieblinie der Gesteinskörnung beeinflusst. Deshalb wurde die Rohdichte bei den anderen Asphaltmischgütern, bei denen die Sieblinie vom Referenzmischgut abweicht, erneut bestimmt. Mit Hilfe des im Labor vorhandenen Datenbanksystems (LaMa) kann die Rohdichte wie folgt ermittelt werden [16]:

$$\boldsymbol{\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 . V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}} \tag{3}$$

Dabei ist [16]:

ρ_{mv} nach dem volumetrischen Verfahren ermittelte Rohdichte des Asphalts [Mg/m^3];

m_1 Masse des Pyknometers mit Aufsatz [g];

m_2 Masse des Pyknometers mit Aufsatz und Laborprobe [g];

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

m_3 Masse des Pyknometers mit Aufsatz, Laborprobe und Wasser [g];

V_p Volumen des Pyknometers bei Füllung bis zur Messmarke [m³];

ρ_w Dichte des Wassers [Mg/m³].

3. Hohlraumgehalt (Va)

Der Hohlraumgehalt bezeichnet das Volumen des Hohlraums in einem Asphaltprobekörper, das prozentual zum gesamten Volumen des Probekörpers angegeben wird. Ebenso wurde der Hohlraumgehalt jedes Probekörpers mit Hilfe des im Labor vorhandenen Datenbanksystems (LaMa) und gemäß EN 12697-8 wie folgt ermittelt:

$$\boldsymbol{V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} . 100} \tag{4}$$

Dabei ist [20]:

V_a der Hohlraumgehalt des Asphalt-Probekörpers [Volumenanteil %];

ρ_m die Rohdichte des Mischguts [Mg/m³];

ρ_b die Raumdichte des Probekörpers [Mg/m³].

Abb. 3.4 zeigt eine grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Rohdichte und dem mittleren Hohlraumgehalt der jeweiligen Mischgüter.

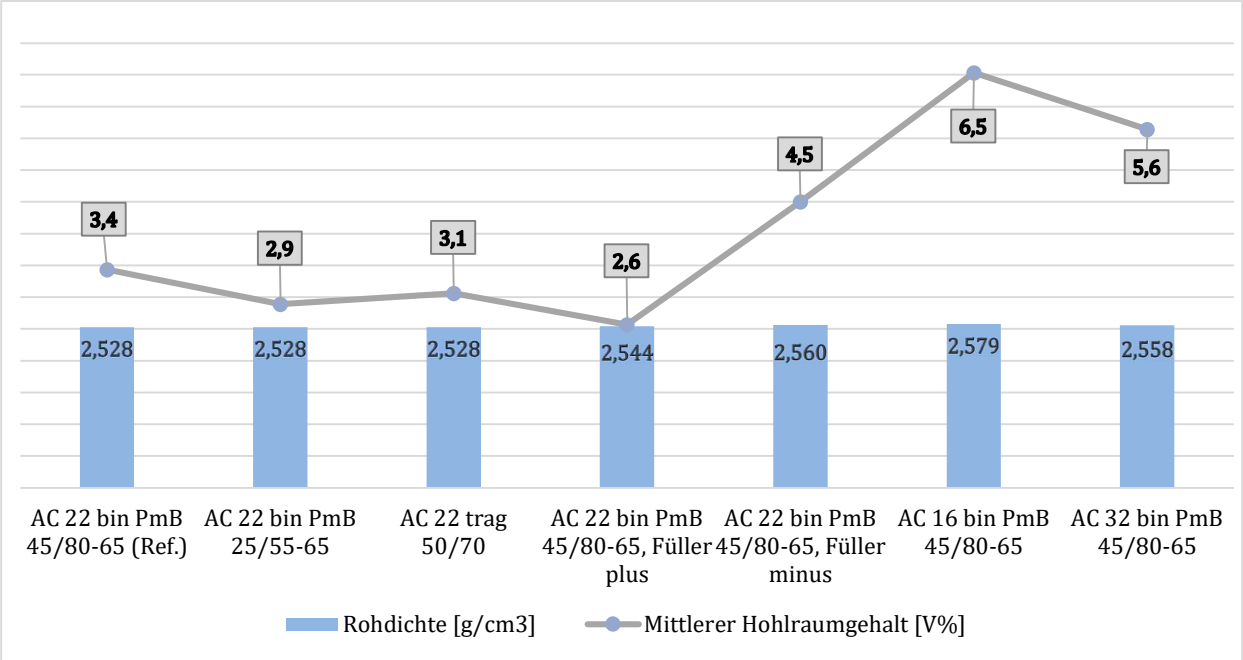

Abbildung 3.4: Rohdichte und mittleren Hohlraumgehalt der jeweiligen Mischgüter.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Anschließend wurden die Probekörper in der temperierten Kammer des CIT-CY-Prüfgeräts (+10 °C) zwischen 3 und 7 Tage auf einer ebenen Fläche gelagert und nacheinander mit dem CIT-CY-Prüfgerät geprüft.

3.1.4 Prüfung der Beständigkeit des Asphalts gegen Ermüdung

Ermüdung bezeichnet das Phänomen, wenn die Festigkeit eines Werkstoffs bei wiederholter Belastung im Vergleich zur Festigkeit unter einer Einzellast abnimmt.

Im Straßenasphalt entsteht die Ermüdung durch die Verkehrsbelastung. Die wiederholte Beanspruchung des Straßenverkehrs führt zu kleinen, aber nicht elastischen Verformungen. Dadurch akkumulieren sich im Lauf der Zeit, aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von Asphalt, Ermüdungsrisse am unteren Bereich der Asphaltschicht, wo die aus dem Verkehr resultierenden Zugspannungen ausgesetzt sind. Weiters breiten sich die Ermüdungsrisse vertikal aus, bis sie die Fahrbahnoberfläche erreichen. Häufig entstehen infolge von Ermüdungsrissen vollständige Rissnetze, die auf der Straße sichtbar sind. Durch die Risse tritt Wasser ein und erreicht die ungebundene Tragschicht, was mit der Zeit Schlaglöcher im Straßenasphalt verursachen kann. Daher ist die GVO-Prüfung zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Ermüdung ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung der Lebensdauer von Asphaltstraßen. [21].

Die ÖNORM EN 12697-27 vorschreibt 6 verschiedene Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit des Asphalts gegen Ermüdung, welche in Abb. 3.5 schematisch dargestellt ist:

1. Zweipunkt-Biegeprüfung an trapezförmigen Probekörpern (2PB-TR)
2. Zweipunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (2PB-PR)
3. Dreipunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (3PB-PR)
4. Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern (4PB-PR)
5. Prüfung mit indirekter impulsförmiger Zugbelastung an zylindrischen Probekörpern (IT-CY)
6. Prüfung mit indirekter zyklischer Zugbelastung an zylindrischen Probekörpern (CIT-CY)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

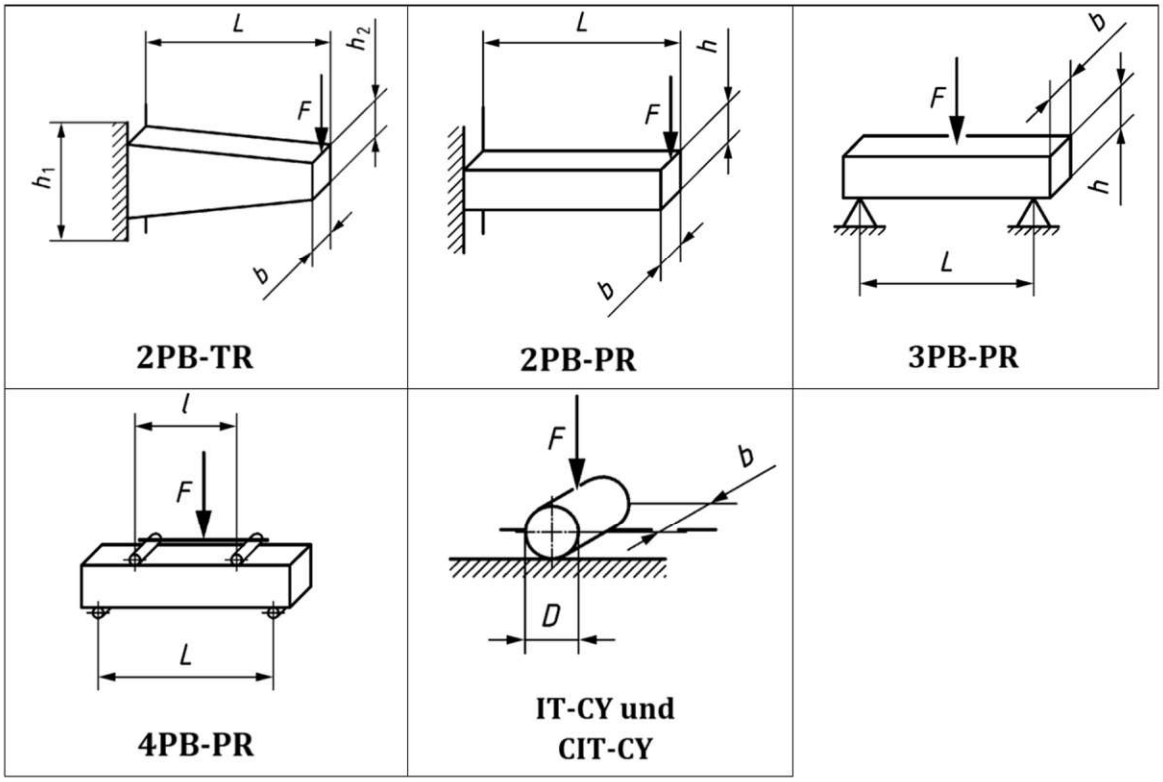

Abbildung 3.5: Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit des Asphalts gegen Ermüdung **[22]**

Die am meisten zur Verfügung stehenden Prüfgeräte im Labor sind die 4PB-PR und CIT-CY. In Tabelle 3-1 erfolgt ein Vergleich zwischen beiden Prüfmethoden:

Tabelle 3-1: Vergleich zwischen 4PB-Prüfung und CIT-CY & IT-CY Prüfung **[23]**

Vierpunkt-Biegeprüfung (4PB)	Indirekte Zugbelastung IT-CY & CIT-CY
Prismatische Probekörper	Zylindrische Probekörper
Die Probe wird auf zwei Auflagen positioniert und in der Mitte mit zwei Druckpunkten belastet.	Indirekte Zugspannung wird durch Druckbelastung erzeugt.
Verformungsgesteuert	Kraftgesteuert
+ Realitätsnahe Simulation der Belastung in der Fahrbahnkonstruktion	- Weniger realitätsnahe Belastungs-situation im Vergleich zur 4PB-Prüfung
- Hoher Materialaufwand	+ Geringerer Materialaufwand
- Zeitintensive Prüfung	+ Schnellere Durchführung als die 4PB

Wie bereits im ersten Kapitel erwähnt wurde, werden im Rahmen dieses Projekts sowohl 4PB als auch CIT-CY zur Anwendung kommen. Daher werden die Ermüdungsprüfungen zwischen den TU Wien IVWS und Nievelt Labor GmbH aufgeteilt. Für einzelne Mischgutsorten werden sogar Probekörper von beiden Labors parallel auf Ermüdung untersucht, um die Vergleichbarkeit der Prüfmaschinen darzulegen. In dieser Diplomarbeit wird die Ermüdung auf Asphaltebene mit der Prüfung mit indirekter zyklischer Zugbelastung an zylindrischen Probekörpern (CIT-CY) beurteilt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.1.4.1 Prüfung mit indirekter zyklischer Zugbelastung an zylindrisch Probekörpern (CIT-CY)

Der Unterschied zwischen CIT-CY und IT-CY ist, dass die CIT-CY mit einer kraftgeregelten Belastungsart ohne Ruhepausen unterzogen wird. Während IT-CY mit einer konstanten Belastungsart mit Ruhepausen unterzogen wird. D.h., dass der Probekörper während der CIT-CY Prüfung mit vertikalen zyklischen Drucklastimpulsen belastet wird. Jeder Lastzyklus ist mit vorgegebener Unterspannung und Oberspannung begrenzt. Diese zyklische Belastung führt zu einer sinusförmigen Zugspannung in der vertikalen Durchmesserebene, senkrecht zur aufgebrachten Last, wie in der Abb. 3.6 veranschaulicht. Diese Belastung verursacht ein Ermüdungsversagen des Probekörpers durch Spaltung entlang des vertikalen Durchmessers. Als Versagenskriterium kann die Anzahl der Lastzyklen bis zur Entstehung von Makrorissen im Probekörper angenommen werden.

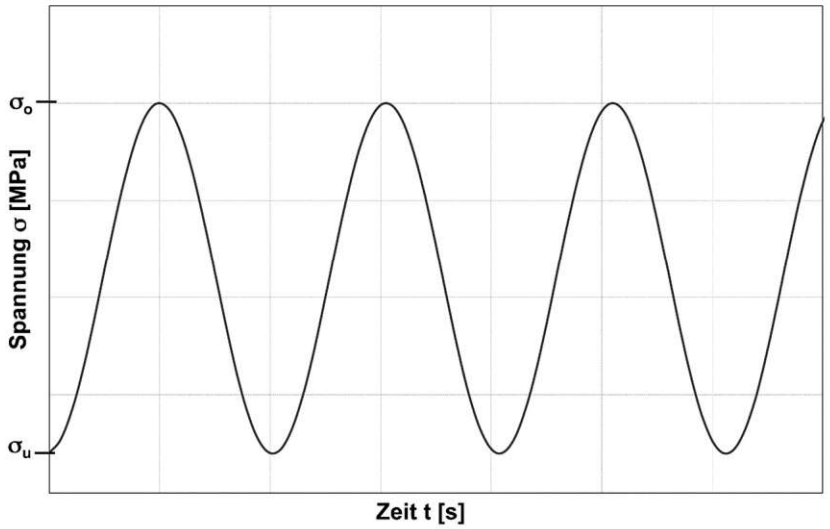

Abbildung 3.6: Prinzip des Spannungsverlaufs auf dem Probekörper in CIT-CY Prüfung, $\boldsymbol{\sigma_o}$: Oberspannung, $\boldsymbol{\sigma_u}$: Unterspannung **[15]**

Die CIT-CY Prüfung wird nach EN 12697-24 [24] durchgeführt. Als Unterspannung wird 35 kPa gewählt, um sicherzustellen, dass die Unterspannung während der Versuche konstant gehalten wird. Die Oberspannung wird anhand nacheinander an einem Probekörper durchgeführter Vorversuche festgestellt.

Vorversuche:

Es wird ein Probekörper vom jeweiligen Asphaltmischgut für die Vorversuche eingesetzt. Die Prüftemperatur liegt bei 10°C. Die Belastungsfrequenz ist mit 10 Hz definiert. Zunächst wird der Probekörper unmittelbar nacheinander mit jeweils 110 Lastwechseln bei unterschiedlichen - während des Versuchs stufenweise ansteigenden - Oberspannungen belastet. Die Unterspannung ist bei 35 kPa über den gesamten Versuch konstant gehalten. Es wird mit einer Oberspannung von 200 kPa begonnen und für die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

nachfolgenden Laststufen wird die Oberspannung jeweils um 100 kPa erhöht, bis das Versagen des Probekörpers durch Rissbildung einsetzt [15]. In Abb. 3.7 sind die Belastungsstufen abgebildet.

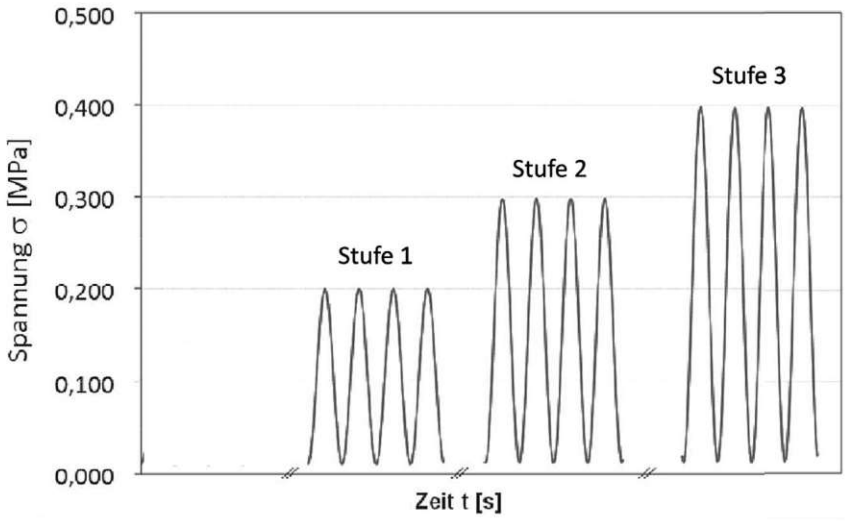

Abbildung 3.7: Beispiel für die Belastungsstufen im Vorversuch **[15]**

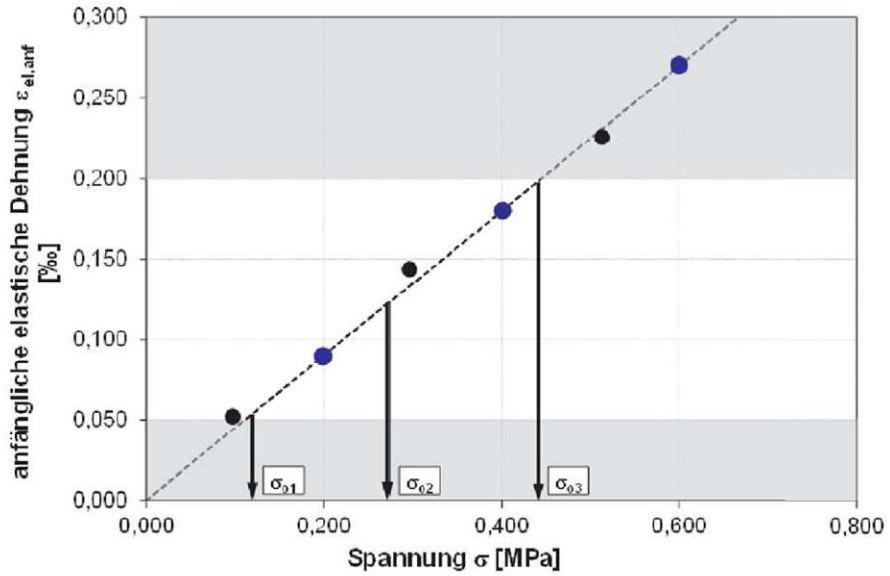

Abbildung 3.8: Beispiel für die Festlegung der Oberspannungen für die Ermüdungsversuche **[15]**

Bei den einzelnen Belastungsstufen wird jeweils die anfängliche elastische horizontale Dehnung zwischen dem 98. und 102. Lastwechsel für die zugehörige Oberspannung gemittelt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse können drei geeignete Oberspannungen $\boldsymbol{\sigma_{o1}}$, $\boldsymbol{\sigma_{o2}}$ und $\boldsymbol{\sigma_{o3}}$ für die Versuche zur Aufstellung der Ermüdungsfunktion so ausgewählt werden, dass die elastischen Anfangsdehnungen zwischen 0,050 ‰ und 0,300 ‰ (siehe Abbildung 3.8) und die Lastwechselzahlen bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums zwischen 10^3 und 10^6 Lastwechseln liegen [15].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Hauptversuche:

Zur Ermittlung einer Ermüdungsfunktion sind mindestens drei unterschiedliche Spannungsamplituden (Variation der Oberspannung) erforderlich. Diese sind mit Hilfe der Vorversuche festzulegen, wobei die anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen im Probekörpermittelpunkt in einem Bereich von 0,050 ‰ bis 0,300 ‰ liegen. Weiterhin muss die Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums zwischen 10^3 und 10^6 Lastwechseln gefallen sein [15]. Die Prüftemperatur liegt bei +10°C. Die Belastungsfrequenz ist mit 10 Hz definiert. Die Unterspannung ist in allen Versuchen bei 35 kPa konstant gehalten. Bei jeder Oberspannungsstufe wurden mindestens 3 Probekörper geprüft. Der temperierte Probekörper wurde zwischen den Lastschienen so angeordnet, dass er einen guten Sitz ohne übermäßige Bewegung hat und die beiden Stirnseiten des Probekörpers nominell rechtwinklig zu den Lastschienen sind. Der Probekörper muss in der Belastungseinrichtung so angeordnet werden, dass die Achse der Verformungsstreifen in einem Winkel von (90 ± 5)° zur Achse der Druckstreifen ist. Die Abb. 3.9 veranschaulicht den Aufbau des Probekörpers im CIT-CY Prüfgerät. Die Parameter des CIT-CY Versuches sind in Abb. 3.10 schematisch dargestellt.

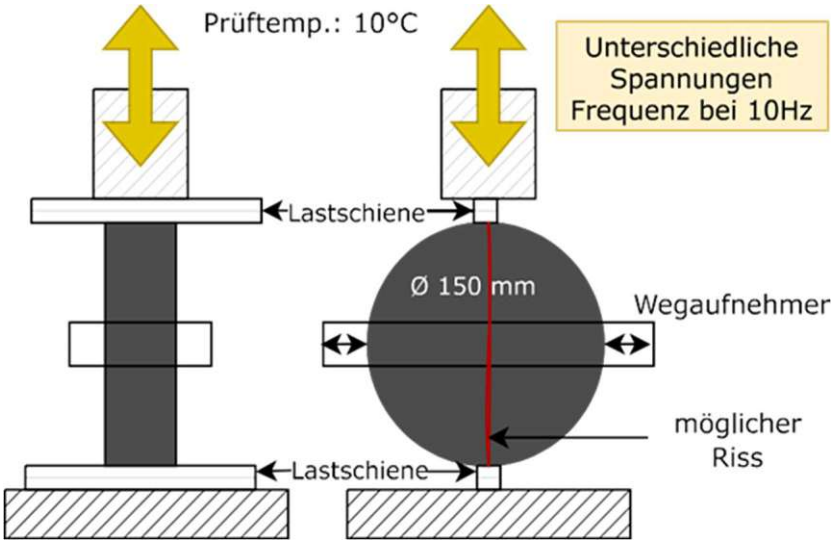

Abbildung 3.9: CIT-CY Versuchsaufbau **[25]**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

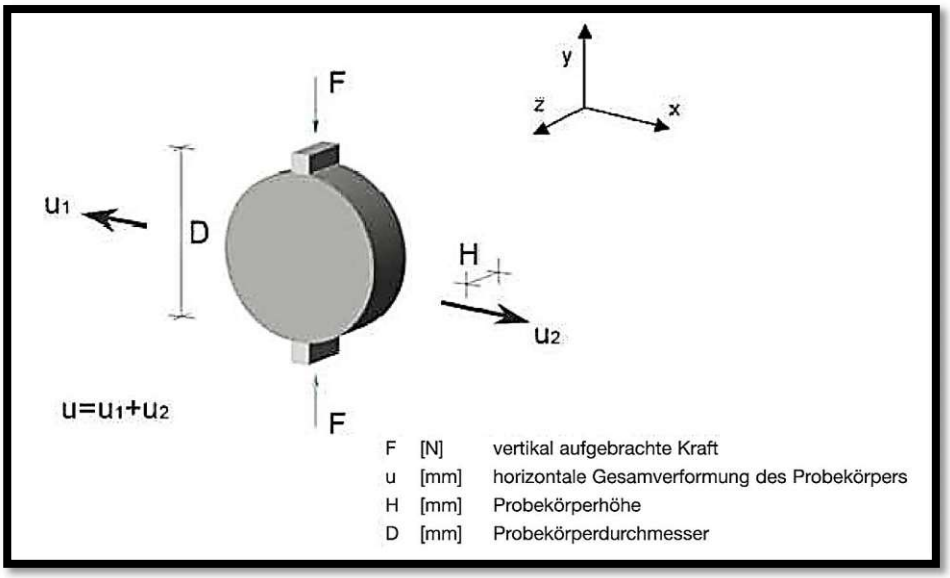

Abbildung 3.10: Prinzip des CIT-CY Versuches **[15]**

Die maximale Zugspannung σ im Probekörpermittelpunkt wird wie folgt bestimmt [24]:

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H}} \tag{5}$$

Wobei ist:

σ : Horizontalspannung (Spaltzugspannung) im Probekörpermittelpunkt [MPa];

F : Kraft [N];

D : Probekörperdurchmesser [mm];

H : Probekörperhöhe [mm].

Die Querdehnzahl v ist von der Prüftemperatur abhängig, welche bei allen Versuchen +10°C beträgt. Mit Hilfe der folgenden Formel ergibt sich die Querdehnzahl $v =$ 0,2395 [24]:

$$\boldsymbol{v = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{[1,83034 - 0,07619 \cdot T]}}} \tag{6}$$

Wobei ist:

v : Querdehnzahl/Poissonzahl [-];

T : Prüftemperatur [°C].

Die durch die Kraft F im Probekörper-Mittelpunkt erzeugte elastische horizontale Dehnung ε_{el} wird nach der folgenden Formel berechnet [24]:

$$\boldsymbol{\varepsilon_{el} = \frac{2 \cdot \Delta u}{D} \cdot \frac{(1 + 3 \cdot v)}{(4 + \pi . v - \pi)} \cdot 1000} \tag{7}$$

Wobei ist:

ε_{el} : elastische horizontale Dehnung [‰];

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

D : Probekörperdurchmesser [mm];

Δu : Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung des Probekörpers [mm];

v : Querdehnzahl/Poissonzahl [-].

Die anfängliche elastische horizontale Dehnung $\varepsilon_{el,anf}$ ist ein wichtiges Kriterium zur Bestimmung der materialspezifischen Ermüdungsfunktion. Dabei wird die gleiche Formel für ε_{el} verwendet, indem die Δu für den Lastwechselbereich 98 bis 102 angenommen wird. Nach Berechnung der $\varepsilon_{el,anf}$ kann die materialspezifische Ermüdungsfunktion wie folgt ermittelt werden [24]:

$$\boldsymbol{N_{Makro} = k \cdot \varepsilon_{el,anf}{}^{\mathrm{n}}} \tag{8}$$

Wobei ist:

N_{Makro} : Anzahl der Lastwechsel bis zum Makroriss [-];

$\varepsilon_{el,anf}$: anfängliche elastische horizontale Dehnung in Probekörpermitte [‰];

k, n : materialspezifische Parameter der Ermüdungsfunktion [-].

N_{Makro} beschreibt die Lastwechselzahl, bei welcher während des Ermüdungsversuchs der Beginn des Auftretens von Makrorissen im Probekörper erkannt werden kann. Der Versuchsverlauf danach ist durch eine rasch fortschreitende Rissbildung gekennzeichnet, welche zum gesamten Versagen des Probekörpers führt.

Zur Berechnung des Steifigkeitsmoduls des Probekörpers $|E*|$ kann die folgende Formel verwendet werden [24]:

$$\boldsymbol{|E*| = \frac{\Delta F}{\Delta u \cdot \mathrm{H}} \cdot \left(\frac{4}{\pi} - 1 + v\right)} \tag{9}$$

Wobei ist:

$|E*|$: absoluter Wert des komplexen E-Moduls (Steifigkeitsmodul) [MPa];

ΔF : Differenz von maximaler und minimaler Kraft [N];

Δu : Differenz von maximaler und minimaler horizontaler Gesamtverformung des Probekörpers [mm];

H : Probekörperhöhe [mm];

v : Querdehnzahl/Poissonzahl [-].

Die oben genannten Eigenschaften für jeden der 11 Probekörper, die aus jedem Mischgut der in dieser Diplomarbeit definierten 7 Asphaltmischgüter hergestellt werden, sind mit Hilfe des Labor-Datenbanksystems (LaMa) ermittelt und protokolliert worden. Insgesamt sind 84 Probekörper im Labor hergestellt worden, davon wurden 7 Probekörper für die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Vorversuche verbraucht und die restlichen 77 Probekörper für die Hauptversuche der Ermüdung CIT-CY verwendet.

Gemäß *„Technische Prüfvorschriften für Asphalt Teil 24: Spaltzug-Schwellversuch-Beständigkeit gegen Ermüdung“* [15] sollen die folgenden Angaben in Tabelle 3-2 für jeden geprüften Probekörper protokolliert werden:

Tabelle 3-2: Angaben zu jedem geprüften Probekörper **[15]**

Probekörper-bezeichnung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el,\,anf}$ [‰]	Unter-span-nung σ_u [MPa]	Ober-span-nung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul |E*| [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]

3.1.4.2 Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 (Referenzmischgut)

- Rohdichte: 2,528 [g/cm³]
- CIT-CY Prüftemperatur: +10°C
- CIT-CY Belastungsfrequenz:10 Hz

Tabelle 3-3: Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 (Referenzmischgut)

Nr.	P.K. bezeich-nung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	Hohl-raum-gehalt [V%]	Elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el,\,anf}$ [‰]	Unter-spannung σ_u [MPa]	Ober-spannung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul |E*| [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]
1	E1419A	149,6	61,6	2,456	2,9	-	0,035	Vorversuch	-	-
2	E1419B	149,8	61,3	2,455	2,9	37	0,035	0,250	10201	940475
3	E1419C	149,6	61,1	2,447	3,2	56	0,035	0,350	9784	234213
4[1]	E1420A	149,7	62,1	2,461	2,7	118	0,035	1,100	16124	795
5	E1420B	149,7	61,4	2,444	3,3	273	0,035	1,100	6947	531
6	E1420C	149,7	61,7	2,433	3,8	73	0,035	0,400	8760	91744
7	E1421A	149,7	61,9	2,442	3,4	230	0,035	1,000	7407	895
8	E1421B	149,7	61,4	2,426	4,0	116	0,035	0,600	8442	8380
9	E1421C	149,7	61,9	2,445	3,3	124	0,035	0,600	7966	13326
10	E1422A	149,7	61,7	2,441	3,4	127	0,035	0,600	7708	8589
11	E1422B	149,7	61,0	2,399	5,1	254	0,035	1,100	7269	636
12	E1422C	149,7	62,0	2,447	3,2	76	0,035	0,400	8332	74202

Alle Angaben zu den weiteren Asphaltmischgütern befinden sich im Anhang.

[1] Nicht weiter berücksichtigt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.2 Mastixebene

3.2.1 Asphaltmastixprüfungen

Die Prüfungen für Asphaltmastix und Bitumen können hauptsächlich in zwei Gruppen geteilt werden:

1. Konventionelle Prüfverfahren

Hierzu zählen empirische Prüfmethoden, in denen das Bitumen bzw. der Mastix nach Gebrauchsspanne klassifiziert werden kann [8].

- Nadelpenetration (EN 1426): Dient zur Klassifikation von Bitumen nach seiner Härte.
- Erweichungspunkt Ring und Kugel (EN 1427): Bestimmung der Gebrauchsspanne von Bitumen bzw. Mastix.
- Brechpunkt nach Fraaß (EN 12593): Bestimmung der Gebrauchsspanne von Bitumen bzw. Mastix.
- Duktilität (ÖNORM C 9218) und elastische Rückstellung (EN 13398): Bestimmung der Streckeigenschaften.

2. Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen (GVO-Prüfungen)

Die GVO-Prüfungen zeichnen die leistungsorientierten physikalischen Eigenschaften des Bitumens bzw. Mastixes auf, die eine Voraussage über seine Gebrauchseigenschaften als Bindemittel im Asphalt zulassen. Dadurch berücksichtigen die Prüfungsbedingungen jene, die in der Praxis relevant sind, wie Temperaturen und Alterungseffekte [8]. In Abb. 3.11 erfolgt eine Übersicht der GVO-Prüfungen der bitumenösen Bindemittel.

- Dynamisches Scherrheometer DSR (EN 14770): Bestimmung der Standfestigkeit, Verformbarkeit und Ermüdungsbeständigkeit.
- Rotational Viscosimeter RV (EN 13302): Bestimmung der Verarbeitbarkeit.
- Bending Beam Rheometer BBR: (EN 14771): Ermittlungen des Tieftemperaturverhaltens und der Biegekriechsteifigkeit.
- Direct Tension Test DTT: Ermittlungen des Tieftemperaturverhaltens.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

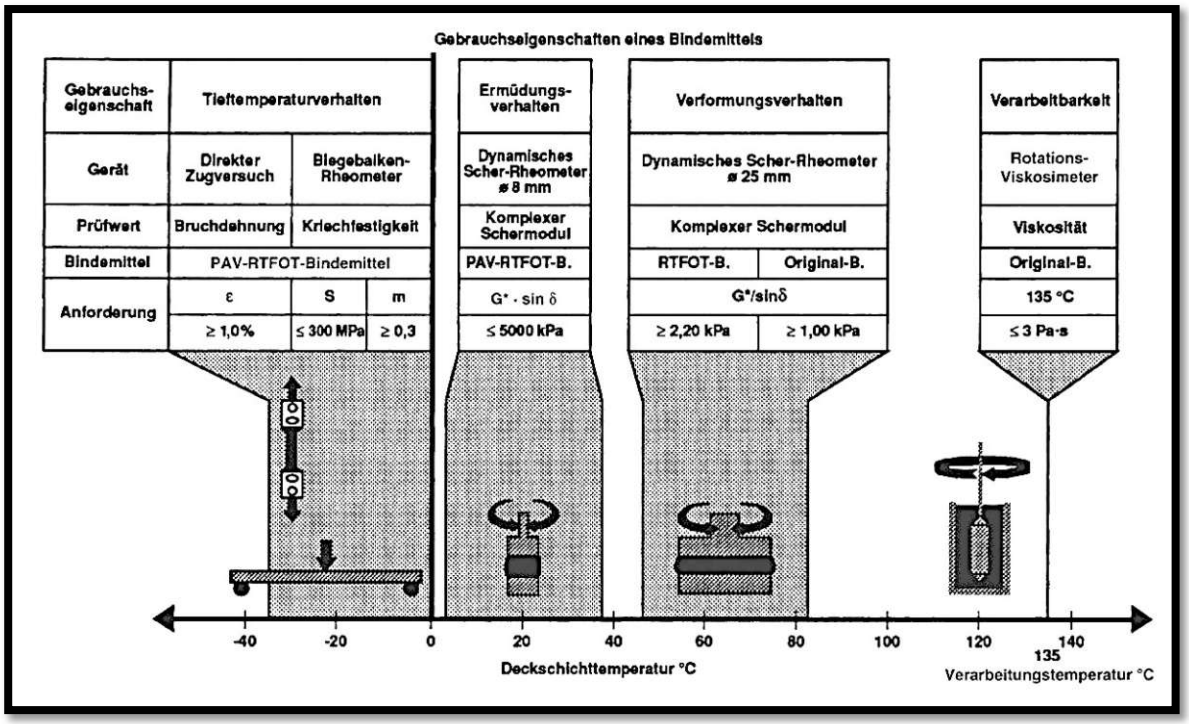

Abbildung 3.11: GVO-Prüfungen der Bitumenösen Bindemittel **[6]**

In dieser Diplomarbeit wird anhand der Soll-Sieblinie und dem gewählten Bitumengehalt aus jeder vorgegebenen Asphaltmischgutvariante das Verhältnis Bitumen zum Füller- und Feinanteil ≤ 0,063 mm berechnet (Tabelle 2). Davon werden sieben Asphaltmastix-Proben (mit verschiedenen Bitumen:Füller Verhältnis bzw. Bitumenklassen) hergestellt, gealtert und mit Hilfe des DSR-Prüfverfahrens ($DSRE_{hyp}$) zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens sowie der Steifigkeit geprüft. Damit der kurzzeitgealterte Zustand des Bitumens durch die Herstellung und Verdichtung der Asphaltprobekörper auch bei Herstellung des Asphaltmastixes aus frischem Bitumen berücksichtigt werden kann, wird das Bitumen zuerst gealtert. Dieses Alterungsverfahren erfolgt mittels einer RTFOT-Wärmekammer.

3.2.2 Bitumen Alterung

RTFOT (Englisch: *Rolling Thin Film Oven Test*) ist eine Simulation der Kurzzeitalterung von Bitumen, welche zur Oxidation und zur Verdunstung noch verbliebener niedrigsiedender Komponenten aufgrund hoher Temperaturen führt [6]. Dieses Verfahren wird nach EN 12607-1 [26] durchgeführt. wobei das Bitumen in acht Glasflaschen, 35 g pro Flasche (± 0,5 g Genauigkeit), eingegossen und in der RTFOT-Wärmekammer auf einem senkrechten Drehgestell eingelegt wird (siehe Abb. 3.12). Die Drehgeschwindigkeit des Drehgestells und der Luftdurchfluss in der Wärmekammer sind verstellbar. Es wird in diesem Fall eine Drehgeschwindigkeit von ca. 15 U/min und ein Luftdurchfluss von ca. 4 Liter/min ausgewählt. Die Lufttemperatur in der Wärmekammer

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

beträgt 163°C. Insgesamt dauert das Alterungsverfahren mit RTFOT-Wärmekammer 75 Minuten [26].

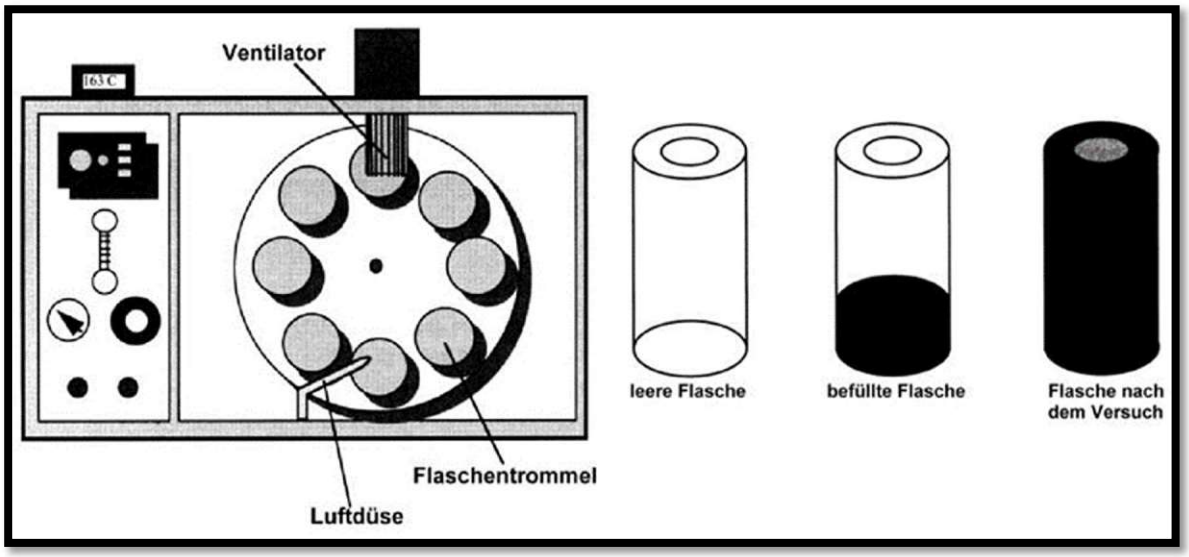

Abbildung 3.12: RTFOT-Wärmekammer und die dazugehörigen Glasflaschen **[6]**

Danach wird das gealterte Bitumen aus den acht Glasflaschen entnommen und in einem Metallbehälter zusammen mit dem Füller, abhängig vom Bitumen:Füller Verhältnis aus Tabelle 2, heiß gemischt. Wie in Abb. 3.13 dargestellt.

Der Füller wurde aus Siebung der feinen Gesteinskörnung (Durchmesser 0–2 mm) mittels 0,063 mm Sieb im Labor gewonnen.

Der jeweils resultierende Asphaltmastix wird in einen gekennzeichneten Metallbehälter eingefüllt und in einem Kühlschrank bei ca. 5°C gelagert, um ein Absinken des Füllers zu verhindern. Somit steht der Mastix für das DSR-Prüfverfahren bereit.

Abbildung 3.13: Herstellung des Asphaltmastixes

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

3.2.3 Dynamic Shear Rheometer (DSR)

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Prüfmethoden auf der Mastixebene entwickelt, für die ein guter Zusammenhang zwischen Mastix- und Mischgutebene nachgewiesen wurde [27]. Die dynamische Scherrheometer -Ermüdungsprüfung an dem Mastix bietet wesentliche Vorteile: geringer Materialbedarf und Prüfaufwand (Ergebnis in 3 Arbeitstagen), zunehmende Verfügbarkeit des Prüfgeräts in den Straßenbaulabors und hohe Korrelation zur Asphaltmischgutebene bei gleichzeitig vollständiger Ermüdungsprüfung [28].

Dafür wird das Prüfgerät Anton Paar MCR-302 Rheometer verwendet. Die Herstellung des Probekörpers erfolgt mit Hilfe einer Silikonform, welche eine zylindrische Probekörper-Form mit einer Höhe von 3mm, einem Durchmesser von 8mm und einer Einschnürung auf 6mm in der Mitte bietet. Die Einschnürung bewirkt als Sollbruchstelle durch Schubspannungsspitze. Eine schematische Darstellung der Geometrie des DSR-Probekörpers erfolgt in Abb. 3.15.

Zuerst wird die Silikonform auf der unteren Platte des Gerätes aufgebaut und mit heißem Mastix gefüllt. Dann wird die obere bewegende Platte bis zum Probekörper abgesenkt und kurzfristig bis auf +180 °C erwärmt, um den Probekörper darauf zu kleben. Der Abstand zwischen den unteren und oberen Platten entspricht der Höhe des Probekörpers. Nach der Abkühlung des Probekörpers kann die Silikonform abgebaut und der überständige Mastix sorgfältig entfernt werden, wie in Abb. 3.14 dargestellt.

Abbildung 3.14: Herstellung des DSR-Probekörpers

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

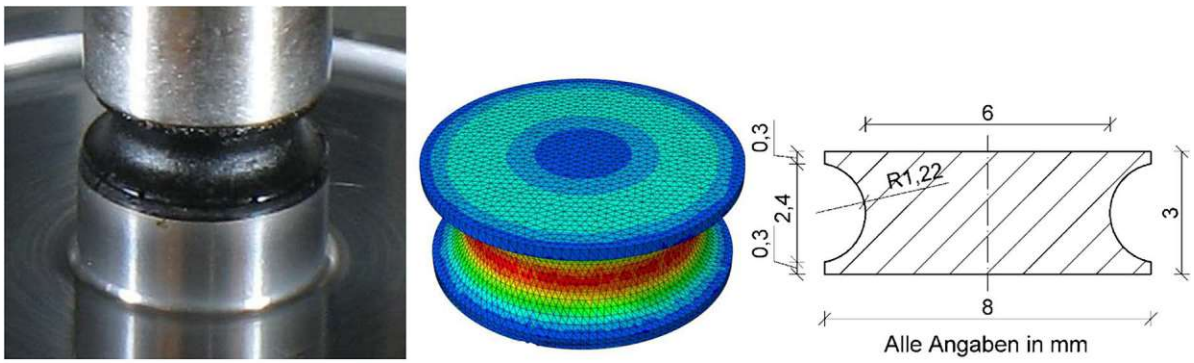

Abbildung 3.15: Geometrie des DSR-Probekörpers **[28]**

Der Ermüdungsversuch wird mit einer Temperatur von +10 °C und einer Frequenz von 30 Hz durchgeführt. Diese Temperatur entspricht einerseits dem gebrauchsverhaltensorientierten Ansatz und andererseits erreicht der Mastix bei dieser Temperatur eine Steifigkeit, die ein Kriechen verhindert [28].

Sobald der Probekörper auf +10 °C abgekühlt ist, kann der Versuch mit der angegebenen Schubspannung gestartet werden. Es ist wichtig, die Schubspannung so zu wählen, dass sie einerseits nicht zu gering ist, um eine angemessene Prüfdauer zu gewährleisten, und andererseits nicht zu hoch, da die Ermüdungsprüfung sonst nicht mehr im linear-viskoelastischen Bereich durchgeführt wird [28]. Der in dieser Diplomarbeit gewählte Schubspannungsbereich für den DSR-Ermüdungsversuch liegt zwischen 0,25 und 0,60 MPa.

Das komplexe Schubmodul |G*| beschreibt die Verformbarkeit viskoelastischer Materialien. Ein hohes komplexes Schubmodul weist auf eine schwere Verformbarkeit hin. Bei niedrigem |G*| ist dagegen eine niedrigere Kraft für Deformationen nötig. Während der Phasenwinkel δ den Versatz zwischen aufgebrachter Last und Deformation darstellt. Wenn der Phasenwinkel 90° erreicht, liegt rein viskoses Verhalten vor. Beim Phasenwinkel 0° verhält sich das Material rein elastisch. Zwischen 0° und 90° verhält sich das Material viskoelastisch [28].

Die Abbildung 3.16 stellt den Verlauf des komplexen Schubmoduls |G*| und des Phasenwinkels δ bis hin zum Kohäsionsbruch des Probekörpers dar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

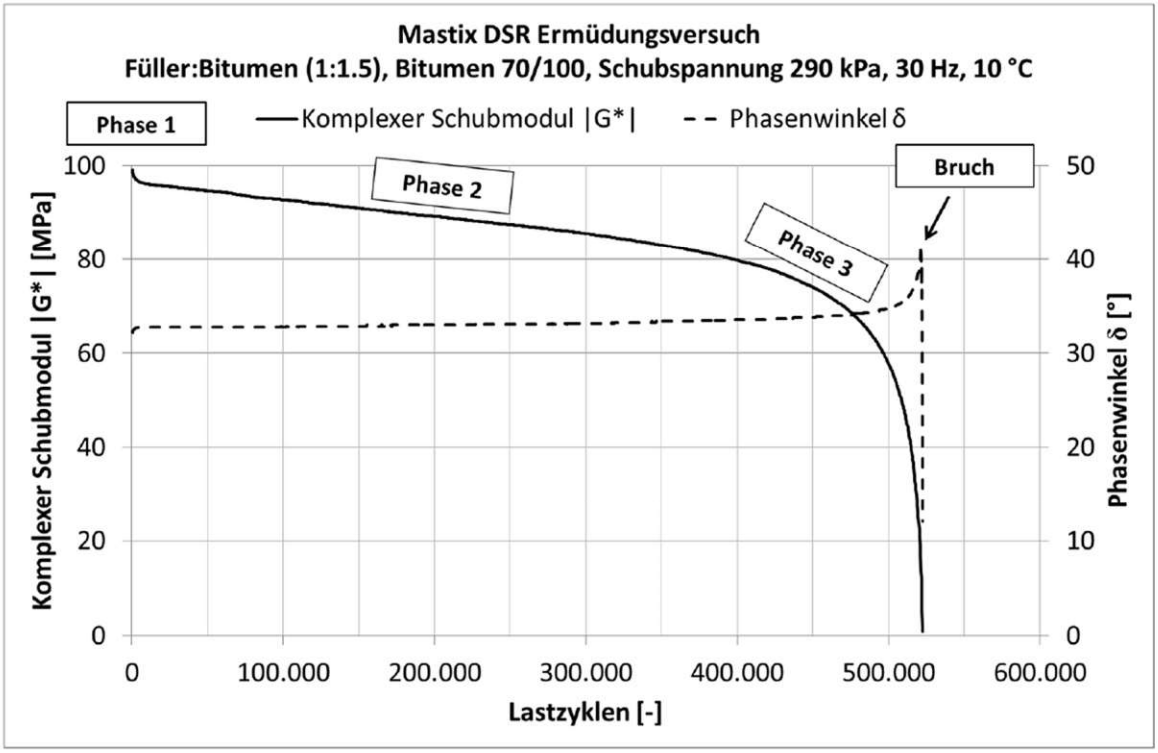

Abbildung 3.16: Mastix DSR-Ermüdungsversuch **[28]**

Dabei zeichnet sich der Verlauf der Kurve durch 3 Phasen aus [28]:

- Phase 1 ist durch einen besonders starken Abfall des komplexen Schubmoduls charakterisiert.
- Phase 2 nimmt das komplexe Schubmodul nahezu linear ab und kennzeichnet damit die Phase der Mikrorissbildung.
- Phase 3 bezeichnet das Zusammenkommen und die Ausbreitung der Mikrorisse zu Makrorissen bis zum vollständigen Versagen des Probekörpers.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

4 Auswertung und Interpretation der Prüfungsergebnisse

4.1 Asphaltmischgutebene

4.1.1 Spaltzugschwellprüfung (CIT-CY)

Wie bereits im zweiten Kapitel erwähnt, Bitumen ist ein visko-elasto-plastisches Material. Mit jedem Lastwechsel in der CIT-CY-Prüfung wird ein Teil der Belastungsenergie in innere Reibung umgewandelt (dissipierte Energie). Diese steigt im Lauf des Ermüdungsversuches weiter. Langsam wird das Bitumen leicht ermüdet und mehr Energie dissipiert, bis ein Makroriss -Ermüdungsriss- im Probekörper entsteht. Zu diesem Zeitpunkt versagt der Probekörper und kann keine Energie mehr speichern. Daher ist das Maximum der dissipierten Energie das Ermüdungskriterium in der CIT-CY-Prüfung. Als Maß dafür wird die Anzahl des Lastwechsels bis zur Bildung von Makrorissen angenommen. Die ÖNORM EN 13108-1 kategorisiert den Widerstand gegen Ermüdung ($N_{Makro\ min}$) in Probekörpern nach der Anzahl von Lastwechseln bis zur Bildung von Makrorissen bei Dehnungsamplituden von 50, 75, 100 und 150 μm/m.

In der Tabelle 4-1 wird die Lastwechselanzahl bei Dehnungsamplituden von 50, 75, 100 und 150 μm/m der sieben Asphaltmischgüter aufgelistet. Je mehr Lastwechsel das Asphaltmischgut erreicht, desto günstiger ist es.

Tabelle 4-1: Kategorisierung nach EN 13108-1

Nr.	Typ	LW bis zur Ermüdung, bei ε_{el}, anf. 50µm/m	LW bis zur Ermüdung, bei ε_{el}, anf. 75µm/m	LW bis zur Ermüdung, bei ε_{el}, anf. 100µm/m	LW bis zur Ermüdung, bei ε_{el}, anf. 150µm/m	Klasse laut EN 13108-1
1	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	320 882	68 172	22 714	4 826	$N_{Makro\ min}$ 15/200
2	AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	250 760	57 550	20 254	4 648	$N_{Makro\ min}$ 15/200
3	AC 22 trag 50/70, T1, G4	36 229	9 778	3 861	1 042	$N_{Makro\ min}$ 3/30
4	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+	618 639	114 018	34 345	6 330	$N_{Makro\ min}$ 25/400
5	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-	403 207	84 186	27 706	5 785	$N_{Makro\ min}$ 25/400
6	AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	295 440	68 810	24 471	5 699	$N_{Makro\ min}$ 15/200
7	AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	265 885	57 531	19 419	4 202	$N_{Makro\ min}$ 15/200

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Das Mischgut *AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+* zeigt deutlich höhere Lastwechselanzahl als die anderen Mischgüter, besonders bei niedrigen Dehnungsamplituden. Damit ist es die beste Mischgutvariante in Bezug auf den Widerstand gegen Ermüdung. Der Grund dafür ist die erhöhte Menge vom Füller im Vergleich zu den anderen Mischgutvarianten. Der Füller sorgt dafür, dass das Bitumen steifer wird. Andererseits ist es merkbar, dass das Mischgut AC 22 trag 50/70, T1, G4 aufgrund der nicht polymermodifizierten Bitumenklasse trag 50/70 eine sehr geringe Anzahl von Lastwechseln aufweist.

4.1.2 Ermüdungskurven für Asphaltmischgüter

Die Korrelation zwischen der Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung und der elastischen Anfangsdehnung im CIT-CY-Versuch ist umgekehrt proportional. D. h., je höher die elastische Anfangsdehnung ist, welche von der angegebenen Oberspannung abhängig ist, desto geringer die Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung.

In Abb. 4.1 erfolgt ein genauerer Vergleich zwischen den Ermüdungskurven der Mischgutvarianten AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70, welche die gleiche Sieblinie der Gesteinskörnung haben, aber verschiedene Bitumenklassen. Dieser zeigt eine deutlich geringere Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung bei Verwendung von nicht modifizierten Bitumen. Die Ermüdungskurven der AC 22 PmB 45/80-65 und AC 22 bin PmB 25/55-65 weisen nahezu identische Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung auf.

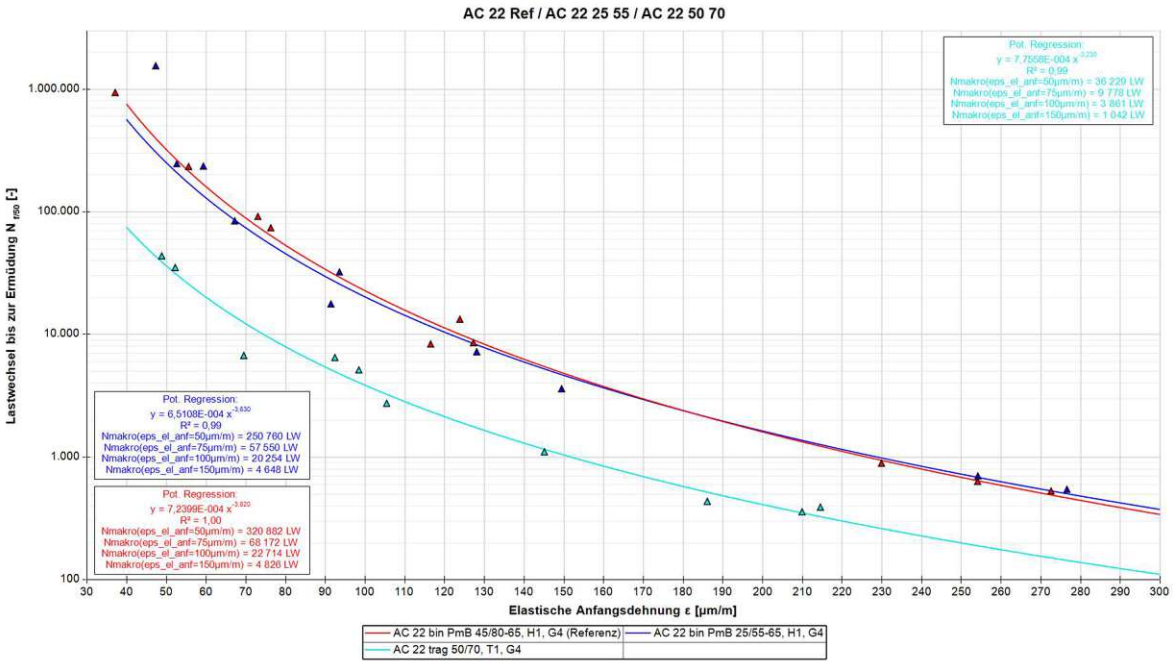

Abbildung 4.1: Ermüdungskurven für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ein weiterer Vergleich (Abb. 4.2) zwischen den Ermüdungskurven der Mischgutvarianten AC 22 bin PmB 45/80-65 (Referenz-Mischgut), AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ und AC 22 45/80-65 Füller-, welche die gleiche Bitumenklasse haben, aber verschiedene Fremdfüllerinhalt ≤ 0,063 mm besitzen, zeigt eine geringfügige Erhöhung in der Lastwechselanzahl bei der Mischgutvariante AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ (mit insgesamt 8,31% Feinanteilen ≤ 0,063 mm) gegenüber dem Referenz-Mischgut, welches 5,9% Feinanteile ≤ 0,063 mm beinhaltet. Gleichzeitig zeigt die Mischgutvariante AC 22 45/80-65 Füller-, welche nur 4,52% Feinanteile ≤ 0,063 mm beinhaltet, ein Verhältnis zwischen beiden obigen Mischgutvarianten.

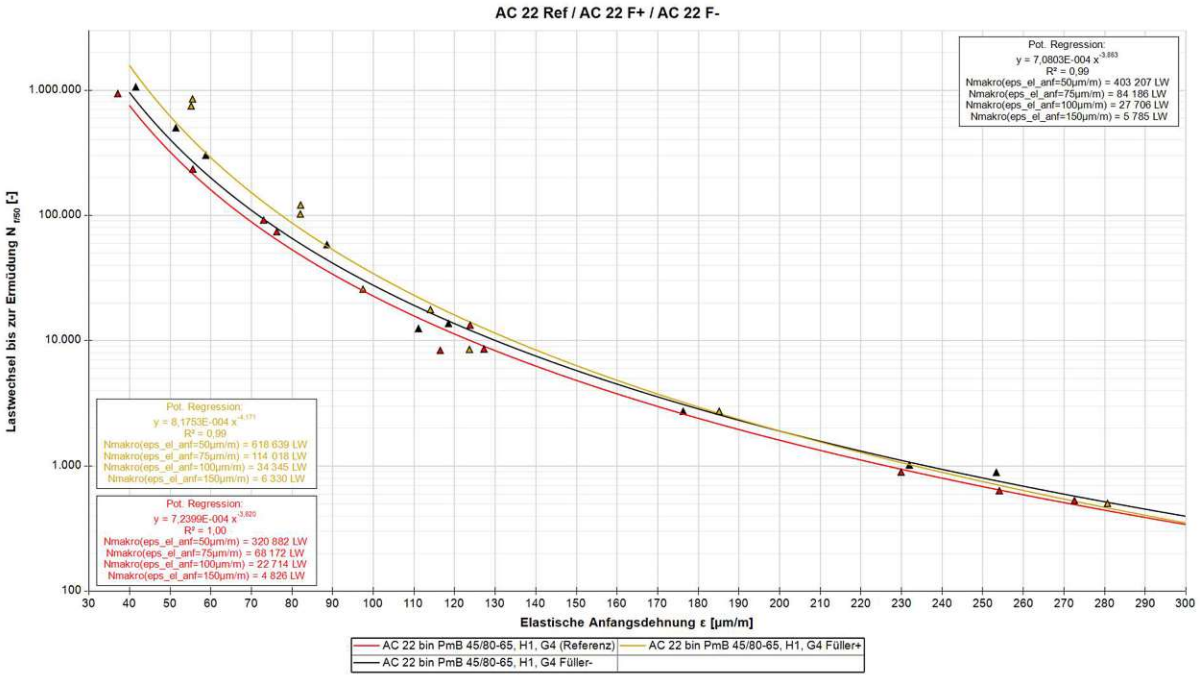

Abbildung 4.2: Ermüdungskurven für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ und AC 22 45/80-65 Füller-.

Weiters ist ein Vergleich (Abb. 4.3) zwischen den Ermüdungskurven der Mischgutvarianten AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65, welche die gleichen Bitumen-Klassen beinhalten, aber verschiedene Sieblinien und Größtkörner besitzen. Bei niedrigen Dehnungsamplituden ergeben sich ähnliche Lastwechselanzahlen bis zur Ermüdung. Allerdings steigt die Lastwechselanzahl der Mischgutvariante AC 32 45/80-65 bei höheren Dehnungsamplituden geringfügig an.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

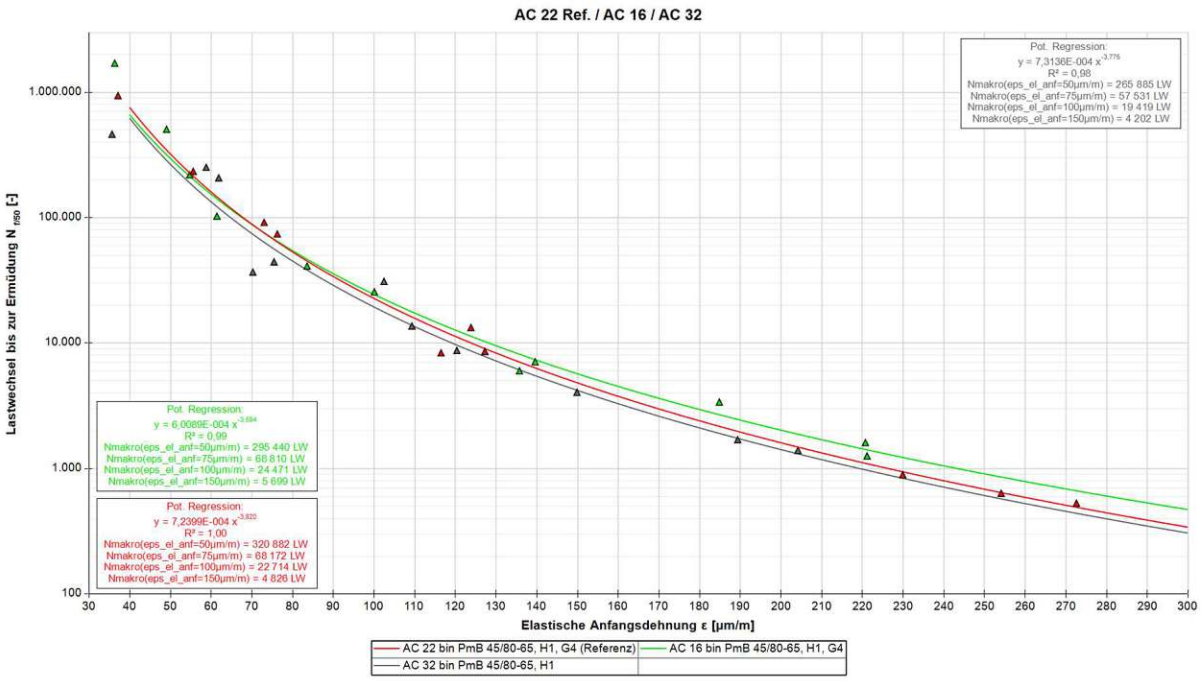

Abbildung 4.3: Ermüdungskurven für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65.

4.1.3 Korrelation zwischen Lastwechsel bis zur Ermüdung und Oberspannung

Die Korrelation zwischen der Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung und der Oberspannung im CIT-CY-Versuch ist ebenfalls umgekehrt proportional. D. h., bei der Auswahl von höheren Oberspannungen in CIT-CY-Versuchen verringert sich die Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung.

Die Abb. 4.4 stellt einen Vergleich zwischen den Ermüdungskurven der Mischgutvarianten AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70 dar. Hierzu zeigt die Verwendung vom härteren PmB in AC 22 bin PmB 25/55-65 eine höhere Lastwechselanzahl gegenüber dem weicheren PmB in AC 22 bin PmB 45/80-65. Während die Verwendung von nicht modifiziertem Bitumen in AC 22 trag 50/70 eine flachere Ermüdungskurve zwischen den beiden obigen Mischgutvarianten zeigt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

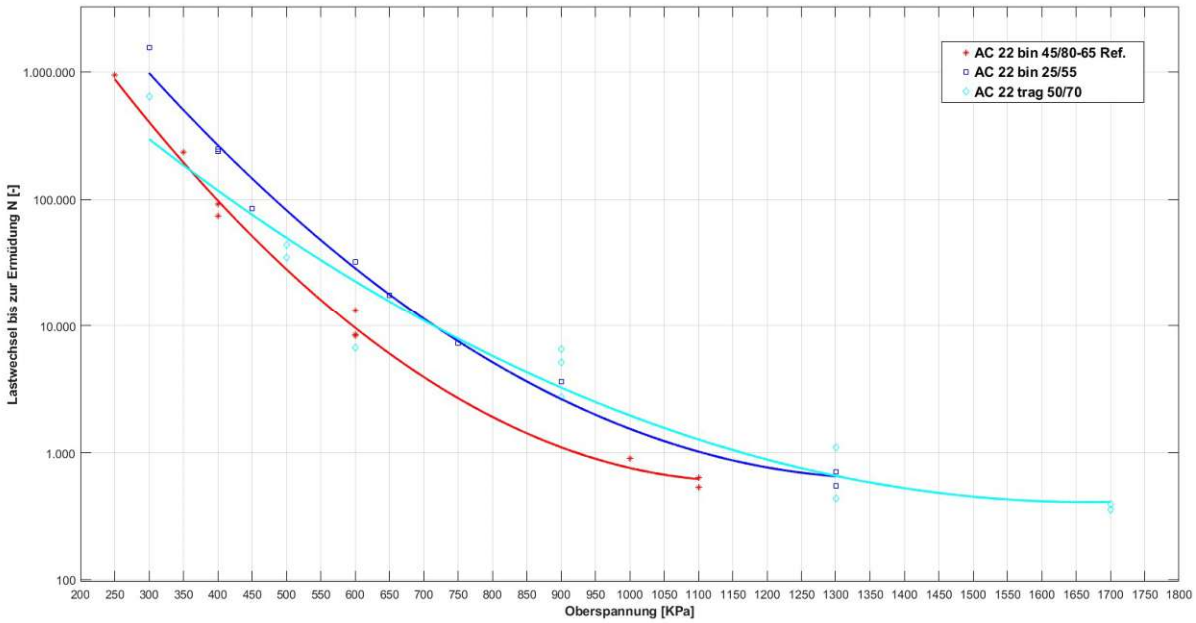

Abbildung 4.4: Lastwechsel bis zur Ermüdung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70.

Die Erhöhung von den Feinanteilen ≤ 0,063 mm (von 5,9% auf 8,31%) zeigt eine klare Steigerung der Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung (in Abb. 4.5). Während die Reduktion von den Feinanteilen ≤ 0,063 mm (von 5,9% auf 4,52%) keine wesentliche Änderung in Bezug auf das Ermüdungsverhalten ergibt.

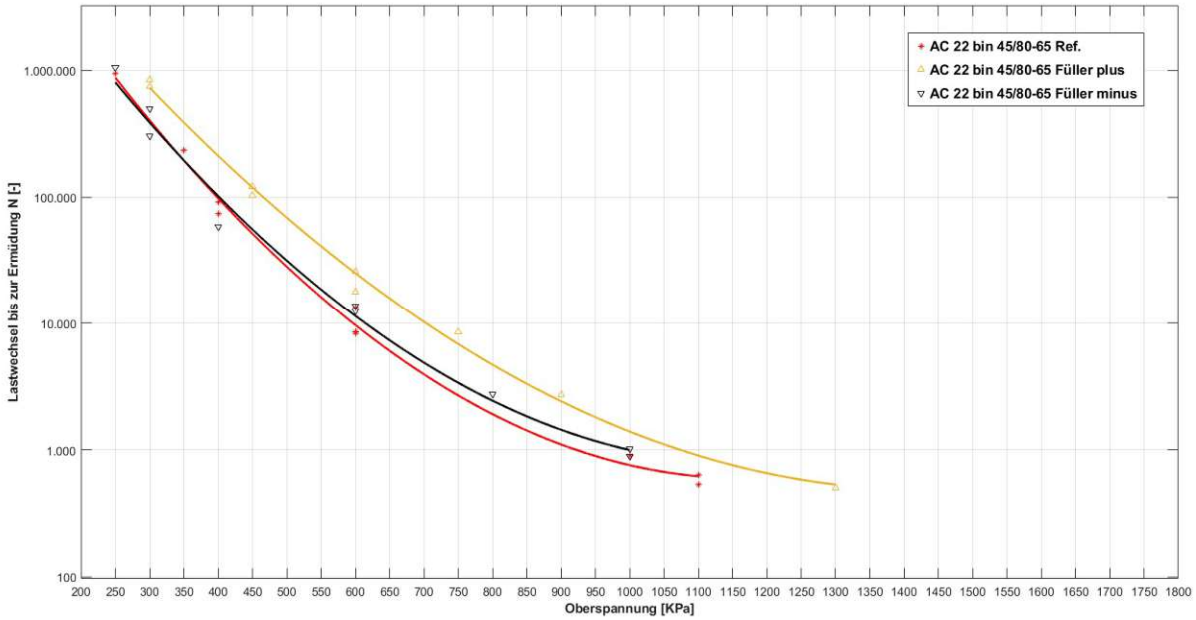

Abbildung 4.5: Lastwechsel bis zur Ermüdung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ und AC 22 45/80-65 Füller-.

Die Änderungen der Sieblinie und Größtkorn des Asphaltmischgutes ergeben keine eindeutige Erhöhung oder Reduktion der Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung. Abb. 4.6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

zeigt einen Vergleich zwischen AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65.

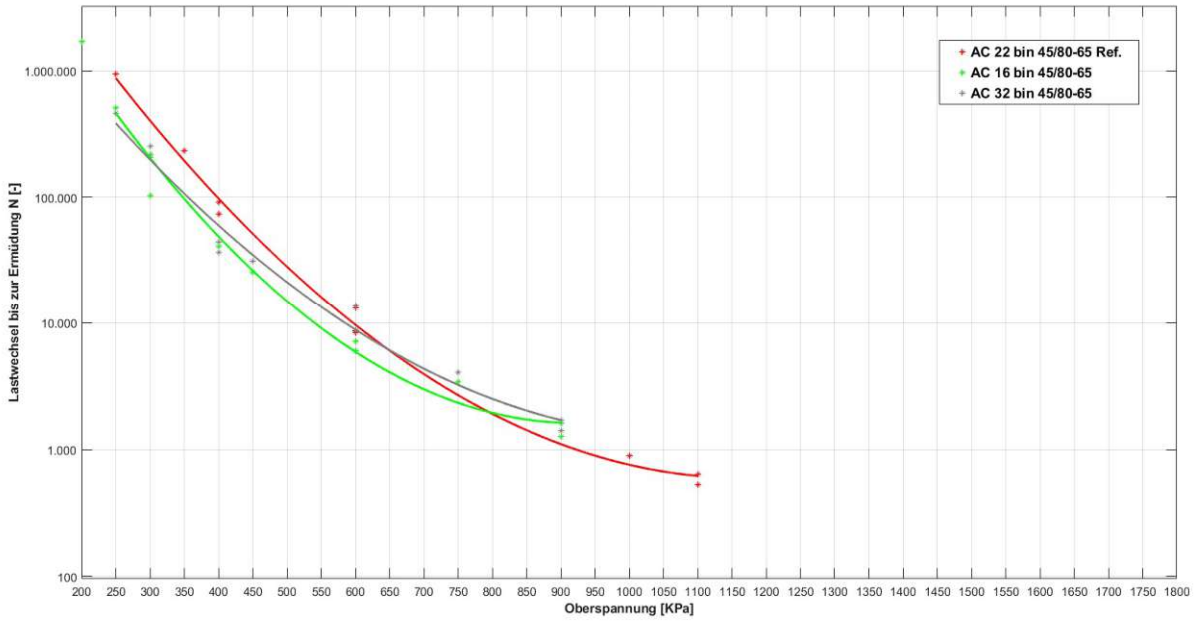

Abbildung 4.6: Lastwechsel bis zur Ermüdung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65.

4.1.4 Korrelation zwischen den Elastischen Anfangsdehnung und Oberspannung in CIT-CY

Die Korrelation zwischen der elastischen Anfangsdehnung und der Oberspannung im CIT-CY-Versuch ist proportional. D. h., bei der Auswahl von höheren Oberspannungen erhöht sich die Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung. Dazu zeigt die Abb. 4.7 einen Vergleich zwischen den Mischgutvarianten AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70. Die Verwendung vom härteren PmB in AC 22 bin PmB 25/55-65 weist eine Abnahme der elastischen Anfangsdehnung gegenüber dem weicheren PmB in AC 22 bin PmB 45/80-65 auf, besonders bei höheren Oberspannungen. Eine weitere Abnahme der elastischen Anfangsdehnung ist bei der Verwendung von nicht modifiziertem Bitumen in AC 22 trag 50/70 deutlich zu erkennen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

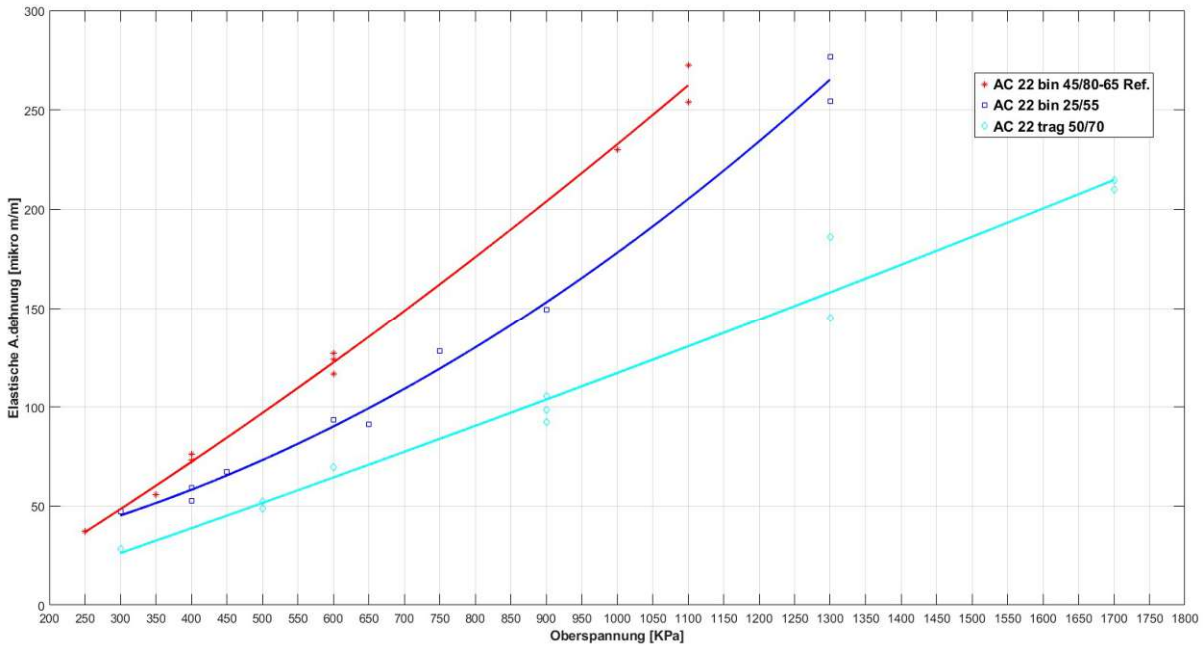

Abbildung 4.7: Elastische Anfangsdehnung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70.

Die Erhöhung der Feinanteile ≤ 0,063 mm (von 5,9% auf 8,31%) zeigt in Abb. 4.8 eine Abnahme der elastischen Anfangsdehnung, besonders bei höheren Oberspannungen, während die Reduktion von den Feinanteilen ≤ 0,063 mm (von 5,9% auf 4,52%) keine wesentliche Änderung bezüglich der elastischen Anfangsdehnung ergibt.

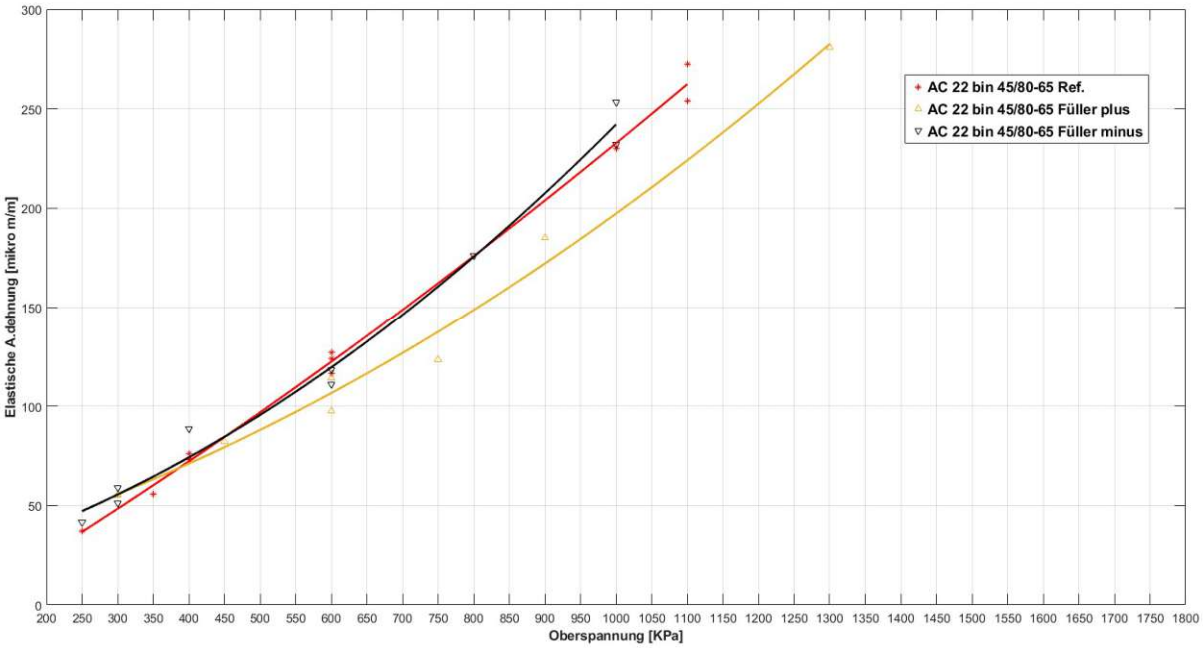

Abbildung 4.8: Elastische Anfangsdehnung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ und AC 22 45/80-65 Füller-.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Änderungen von den Sieblinie und Größtkorn führen zu einer geringfügigen Änderung der elastischen Anfangsdehnung. Abb. 4.9 zeigt einen Vergleich zwischen AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65, wobei das Asphaltmischgut mit Größtkorn 16 mm eine leichte Erhöhung aufweist.

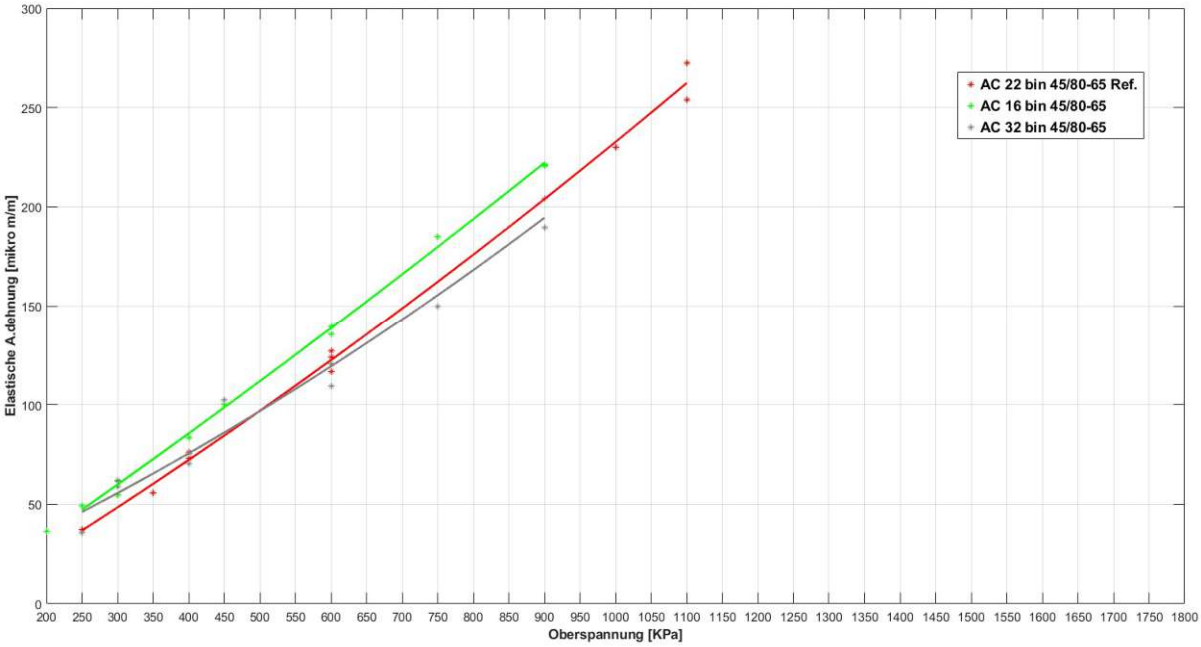

Abbildung 4.9: Elastische Anfangsdehnung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65.

4.2 Mastixebene

Auf Mastixebene wird die Schubspannung, bei der der DSR-Probekörper 1.000.000 Lastwechsel bis zur Ermüdung erträgt, bezeichnet als „T_6", das entscheidende Kriterium zum Vergleich der Mastix-Varianten untereinander bzw. zwischen Mastix- und Asphaltmischgutebene. Die Tabelle 4-2 zeigt die T_6-Werte, die aus dem DSR-Ermüdungsversuch ermittelt wurden.

Tabelle 4-2: DSR-T_6 (Schubspannung bei 10^6 L.W.) der Mastix-Varianten

Nr.	Typ	Mastix-laborcode	Füller: Bitumen	DSR-T_6 [MPa]
1	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0063	1:1,26	299
2	AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	MX0067	1:1,26	354
3	AC 22 trag 50/70, T1, G4	MX0066	1:1,26	281
4	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+	MX0065	1:1,77	376
5	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-	MX0064	1:0,96	261
6	AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0068	1:1,3	266
7	AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0069	1:1,22	304

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ein Einflussfaktor auf die Schubspannung in Mastix ist die Bitumenklasse. Das kann beim Vergleich der T_6 der drei Mastixvarianten aus AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70 nachgewiesen werden. Obwohl diese drei Mastixvarianten den gleichen Füllergehalt (Bitumen:Füller =1:1,26) beinhalten, zeigt das härtere polymodifizierte Bitumen (PmB 25/55-65) eine höhere Schubspannung gegenüber dem weicheren polymodifizierten Bitumen (PmB 45/80-65). Während das nicht modifizierte Bitumen (50/70) die niedrigste Schubspannung in diesem Vergleich zeigt.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Füllergehalt. Dazu werden die T_6 der vier Mastixvarianten aus AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+, AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-, AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4 und AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4 berücksichtigt. Je höher der Füllergehalt, desto steifer wird der Mastix. Abb. 4.10 stellt einen Vergleich zwischen den sieben Mastix-Varianten im DSR-Test hinsichtlich der Schubspannungen und Lastwechsel schismatisch dar.

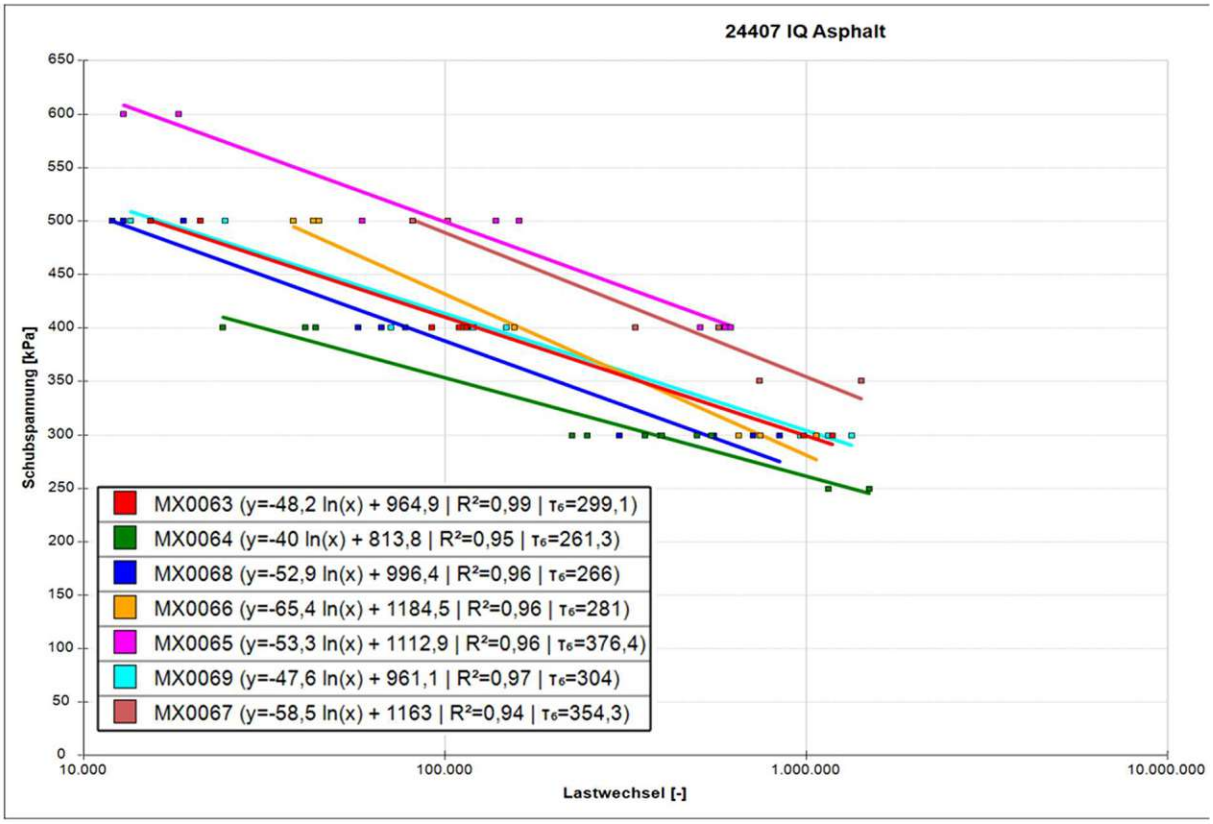

Abbildung 4.10: Ermüdungskurven für Asphaltmastix

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.3 Zusammenhang zwischen Asphalt- und Mastixebene:

4.3.1 Korrelation zwischen DSR-T_6 und CIT-CY L.W. bis zur Ermüdung.

Um die Zusammenhänge zwischen dem Ermüdungsverhalten auf Asphaltebene und Mastixebene besser zu verstehen, werden die Prüfdaten der Ermüdungsprüfung auf beiden Ebenen miteinander schematisch verglichen. Zuerst wird eine Korrelation zwischen den Schubspannung T_6 des Mastixes und Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung bei elastischer Anfangsdehnung von 50, 75, 100 und 150 µm/m des Asphalts erstellt (Abb. 4.11).

Die vier Trendlinien besitzen niedrige Bestimmtheitsmaße (R^2= 0,24-0,44). D. h., die Trendprognose ist nicht besonders zuverlässig. Trotzdem lässt sich visuell feststellen, dass die Trendlinien eine Steigerung mit der Zunahme der Schubspannung T_6 zeigen. Die Trendlinie der Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung bei elastischer Anfangsdehnung 50 µm/m weist eine steilere Steigung als die anderen Trendlinien auf, was ein schnelleres Wachstum bedeutet. Während die jene von der Lastwechselanzahl bis zur Ermüdung bei elastischer Anfangsdehnung 150 µm/m eine sanfte Steigung aufweist, was ein langsameres Wachstum repräsentiert. Die weiteren Trendlinien zeigen einen parallelen Verlauf, was auf eine ähnliche Wachstumsrate hindeutet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

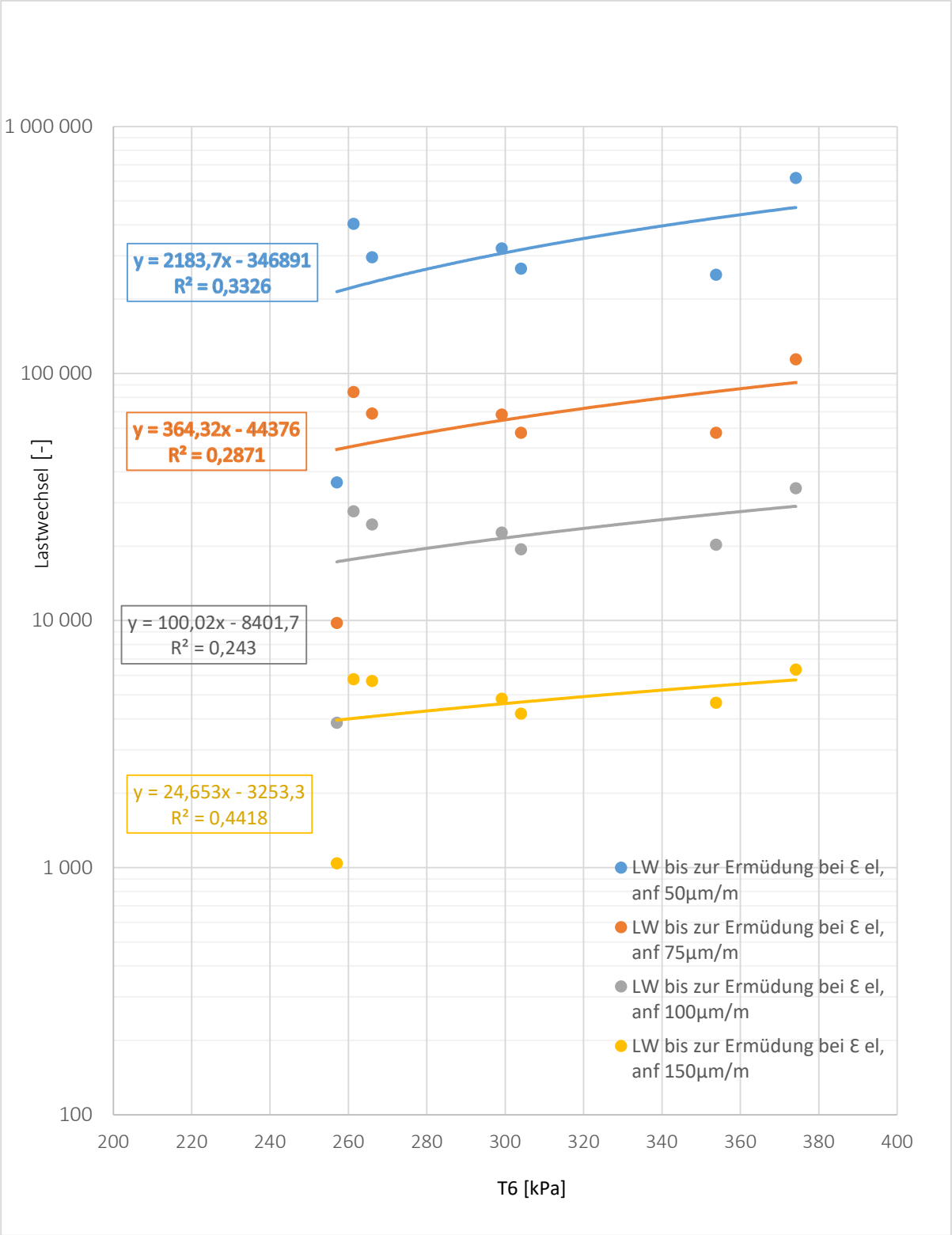

Abbildung 4.11: Korrelation zwischen DSR-T_6 und CIT-CY Lastwechsel bis zur Ermüdung bei Ɛ el, anf. 50, 75, 100 und 150 µm/m

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.3.2 Korrelation zwischen DSR-T_6 und CIT-CY Oberspannung.

Weiters wäre es auch sinnvoll, eine Korrelation zwischen den Schubspannung T_6 des Mastixes und Oberspannung des Asphalts bei 1.000.000 Lastwechseln zu erstellen. Beide Parameter sind in Tabelle 4-3 aufgeführt und in Abb. 4.12 schematisch dargestellt. Die Trendlinie weist visuell eine steile Steigung auf und besitzt weiterhin ein relativ geringes Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0{,}5$).

Tabelle 4-3: DSR-T_6 und CIT-CY Oberspannung bei 1.000.000 L.W.

Nr.	Typ	Mastix-laborcode	Füller: Bitumen	DSR-T_6 [Mpa]	CIT-CY Asphalt Oberspannung [kPa] bei 1.000.000 LW
1	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0063	1:1,26	299	241,89
2	AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	MX0067	1:1,26	354	298,60
3	AC 22 trag 50/70, T1, G4	MX0066	1:1,26	281	179,32
4	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+	MX0065	1:1,77	376	276,34
5	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-	MX0064	1:0,96	261	235,73
6	AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0068	1:1,3	266	205,75
7	AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0069	1:1,22	304	182,77

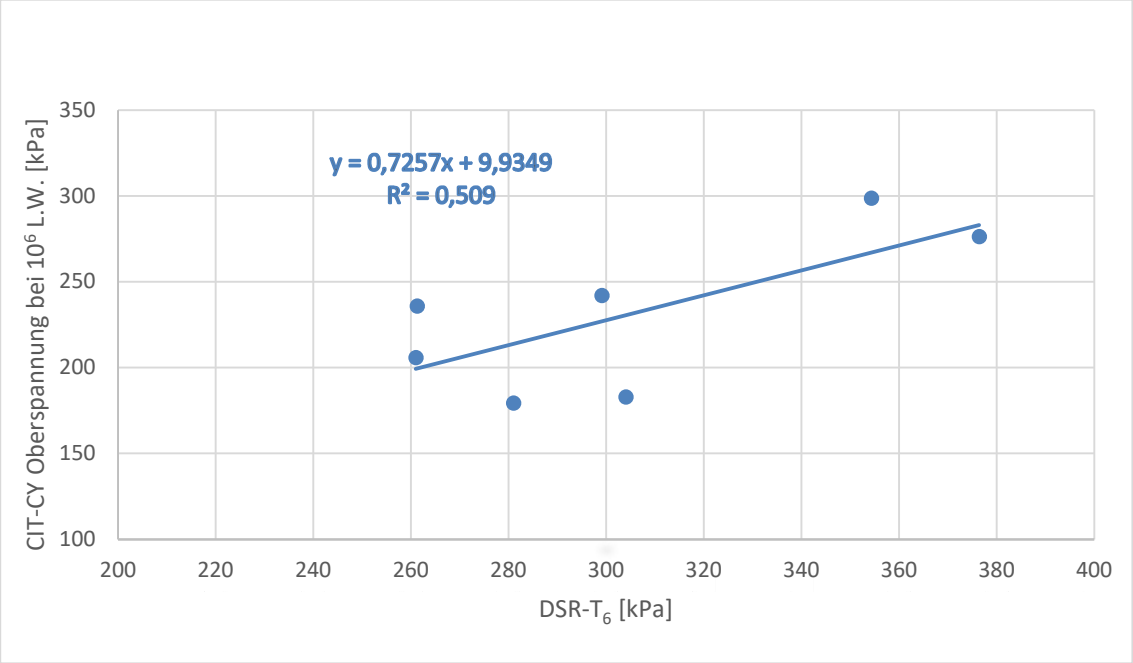

Abbildung 4.12: Korrelation zwischen den DSR-T_6 und CIT-CY Oberspannung bei 1.000.000 L.W.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.3.3 Korrelation zwischen DSR-T_6 und CIT-CY elastische Anfangsdehnung.

Eine weitere Korrelation kann auch zwischen den Schubspannung T_6 des Mastixes und elastischen Anfangsdehnung des Asphalts bei Lastwechselanzahl 10^6, 10^5 und 10^4 betrachtet werden. Die dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 4-4 aufgelistet.

In Abb. 4.13, 4.14 und 4.15 ist die Korrelation aus jedem Lastwechsel-Niveau schismatisch dargestellt. Die Bestimmtheitsmaße sind sehr niedrig (R^2= 0,08-0,22). Daher ist die Trendprognose in dieser Korrelation unzuverlässig. Jedoch zeigt ein visueller Vergleich zwischen den Trendlinien der drei Lastwechsel-Niveaus, dass die Trendlinie des Lastwechsel-Niveaus 10^4 eine leicht steilere Steigung als die Trendlinien der Lastwechsel-Niveaus 10^5 und 10^6 hat, was ein etwas schnelleres Wachstum als die anderen bedeutet.

Tabelle 4-4: DSR-T_6 und CIT-CY Asphalt Ɛ el, anf. Dehnung bei 1.000.000 L.W., 100.000 L.W. und 10.000 L.W.

Nr.	Typ	Mastix-labor-code	Füller: Bitumen	DSR-T_6 [MPa]	CIT-CY Asphalt Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 1.000.000 LW.	CIT-CY Asphalt Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 100.000 LW.	CIT-CY Asphalt Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 10.000 LW.
1	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0063	1:1,26	299	33	72	126
2	AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	MX0067	1:1,26	354	39	66	118
3	AC 22 trag 50/70, T1, G4	MX0066	1:1,26	281	13	47	67
4	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+	MX0065	1:1,77	376	49	82	122
5	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-	MX0064	1:0,96	261	41	83	96
6	AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0068	1:1,3	266	36	62	133
7	AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0069	1:1,22	304	25	71	118

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

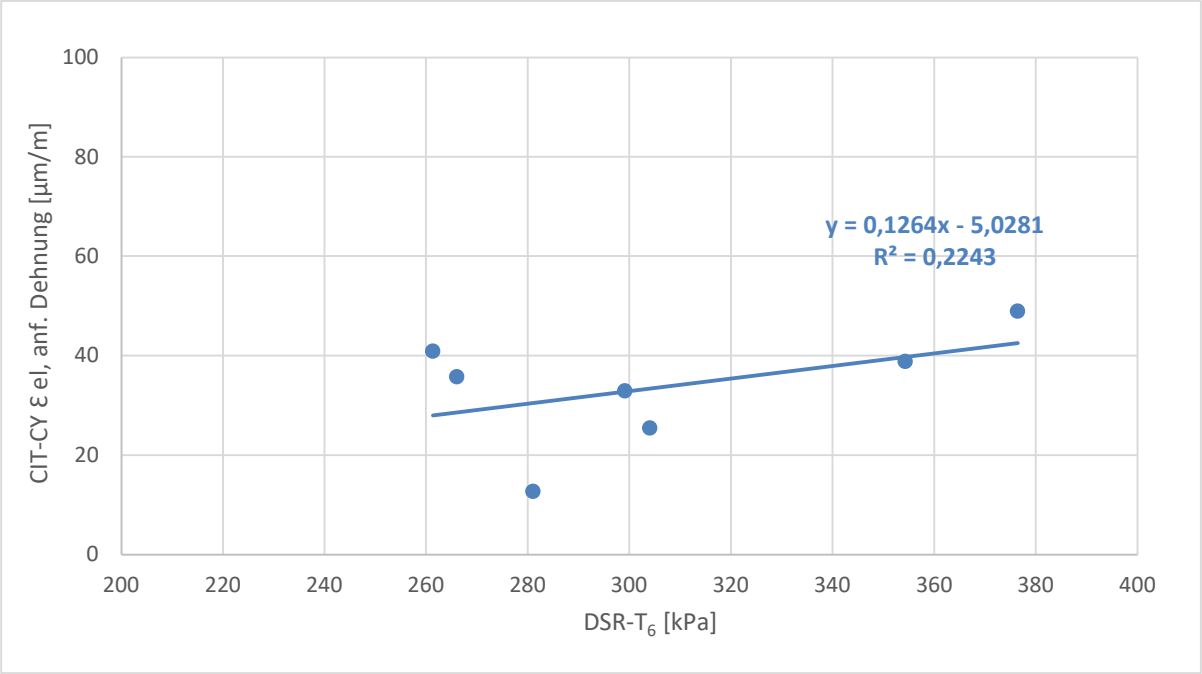

Abbildung 4.13: Korrelation zwischen den DSR-T_6 und CIT-CY Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 1.000.000 L.W.

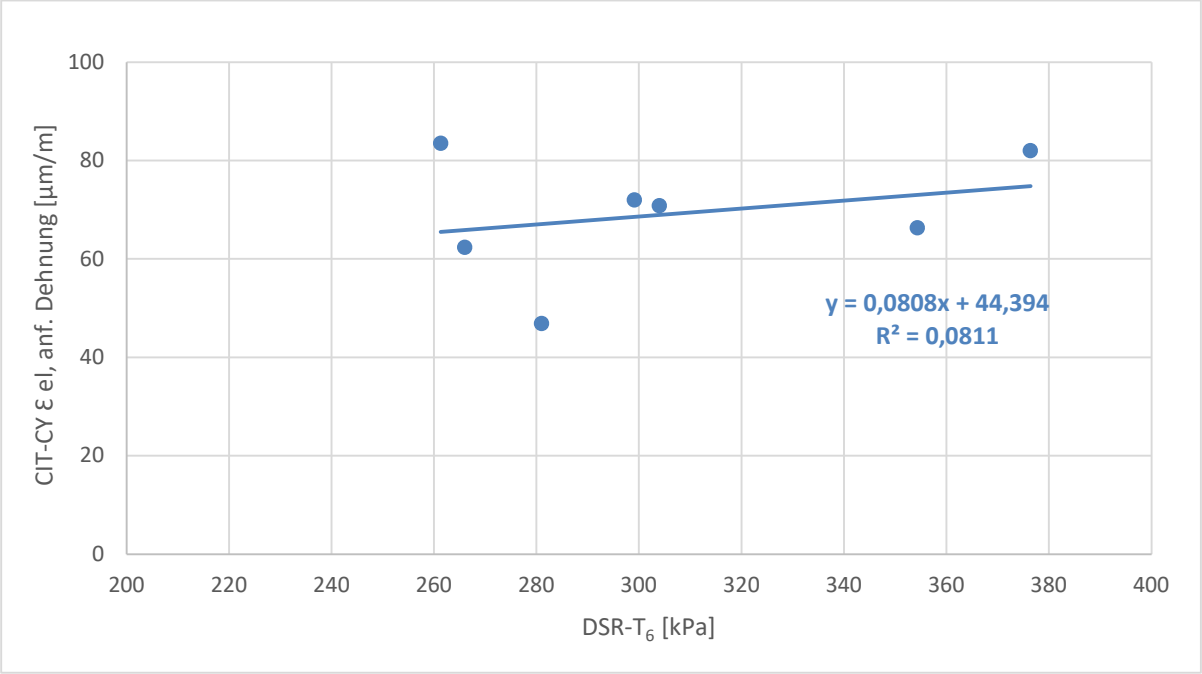

Abbildung 4.14: Korrelation zwischen den DSR-T_6 und CIT-CY Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 100.000 L.W.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

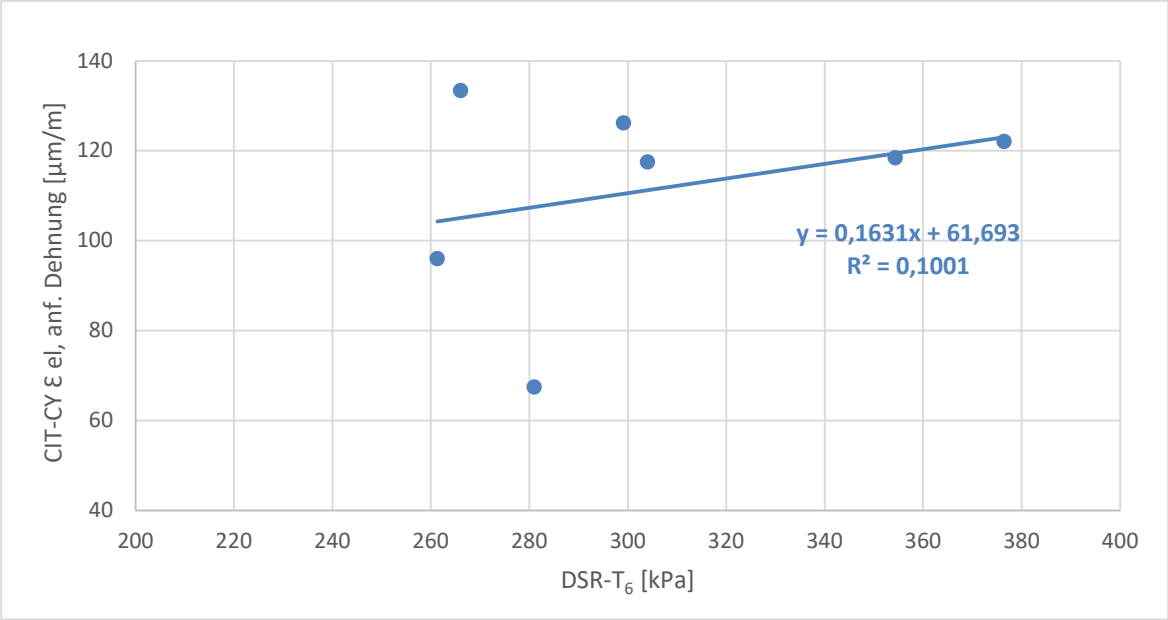

Abbildung 4.15: Korrelation zwischen den DSR-T_6 und CIT-CY Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 10.000 L.W.

4.3.4 Korrelation zwischen Mastix- und Asphaltsteifigkeit.

Abschließend kann auch eine Korrelation zwischen den von CIT-CY herausresultierenden Steifigkeit S* nach 100 Lastwechseln auf Asphaltebene – Mittelwert der 11 Probekörper je Mischgut – und der von DSR herausresultierenden dynamischen Steifigkeit G* auf Mastixebene erstellt werden. Beide Parameter sind in Tabelle 4-5 aufgeführt und in Abb. 4.16 schematisch dargestellt. Die Trendlinie hat ein hohes Bestimmtheitsmaß (R^2= 0,85). Daraus ergibt sich eine zuverlässige Trendprognose und es lässt sich visuell feststellen, dass die Trendlinien eine steile Steigerung zeigen.

Tabelle 4-5: Mastixsteifigkeit G* und Asphaltsteifigkeit S* der 7 Mischgut-Varianten

Nr.	Typ	Mastix-laborcode	Füller: Bitumen	Mastix-steifigkeit G* [Mpa]	Asphalt-steifigkeit S* [Mpa]
1	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0063	1:1,26	38,2	8995
2	AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	MX0067	1:1,26	61,06	10228
3	AC 22 trag 50/70, T1, G4	MX0066	1:1,26	90,42	14806
4	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+	MX0065	1:1,77	57,89	8774
5	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-	MX0064	1:0,96	30,47	7932
6	AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0068	1:1,3	40,04	7271
7	AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	MX0069	1:1,22	37,56	8254

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

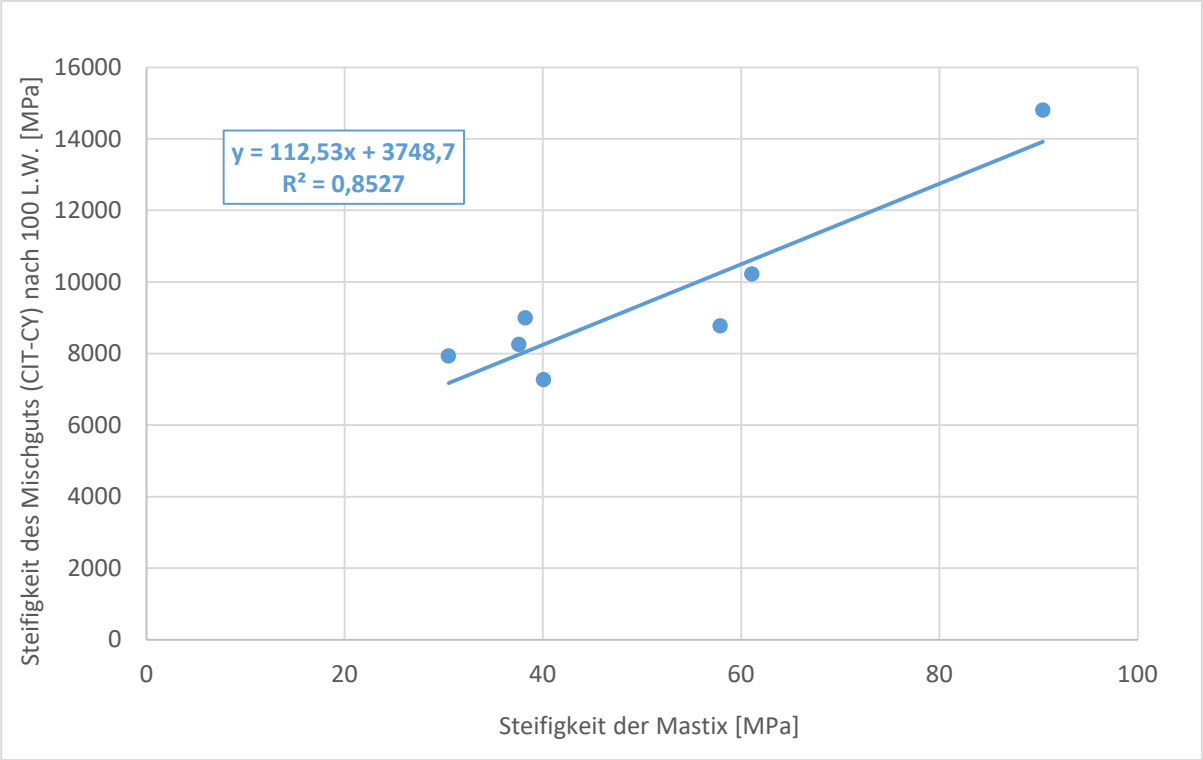

Abbildung 4.16: Korrelation zwischen den Mastixsteifigkeit G* und Asphaltsteifigkeit S* der 7 Mischgut-Varianten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Ermüdungsverhalten von sieben Mischgutvarianten auf Asphalt- und Mastixebene geprüft. Auf Asphaltebene wurde der Spaltzug-Schwellversuch (CIT-CY) durchgeführt, der auf den Grundsätzen der Europäischen Normen (ÖNORM EN 12697-24 und ÖNORM EN 12697-26) basiert. Auf Asphaltmastixebene existieren noch keine normativen Grundlagen zu Ermüdungsprüfungen. Daher wurde an der TU Wien-IVWS ein standardisierter Ermüdungsversuch im dynamischen Scherr-Rheometer (DSR) mit einem hyperbolischen Probekörper entwickelt. Die resultierenden Daten wurden analysiert und miteinander verglichen. Es wurde auch nach potenziellen Zusammenhängen zwischen beiden Ebenen gesucht. Dadurch können die Forschungsanfragen aus der Einleitung wie folgt beantwortet werden:

Einfluss der Rezepturparameter auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt und Mastix:

Bitumenhärte: Nachdem Korrelationen zwischen Lastwechsel und elastischer Anfangsdehnung sowie Oberspannung auf Asphaltebene analysiert wurden, lässt sich schlussfolgern, dass die Verwendung von härterem PmB keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf das Ermüdungsverhalten erzeugt. Dies führt stattdessen zu einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls vom Asphalt, was hervorruft, dass der Asphalt steifer wird und weniger elastisch reagiert. Auf Mastixebene zeigt das härtere polymodifizierte Bitumen eine höhere Schubspannung gegenüber dem weicheren polymodifizierten Bitumen.

Polymermodifikation: Die Verwendung von polymermodifiziertem Bitumen, wie PmB 45/80-65 und PmB 25/55-65, zeigt ein verbessertes Ermüdungsverhalten sowohl auf Asphaltebene als auch auf Mastixebene im Vergleich zum nicht modifizierten Bitumen, wie Bitumen 50/70. Dies wird durch die Erhöhung der Elastizität erreicht.

Füller-Bitumen-Verhältnis: Die Erhöhung des Anteils vom Fremdfüller (Durchmesser ≤ 0,063 mm) von 5,9% auf 8,31% im Asphaltmischgut zeigt eine geringfügige Verbesserung im Ermüdungsverhalten, während eine Reduktion von 5,9% auf 4,52% keine klare Änderung im Ermüdungsverhalten ergibt. Weiterhin erzeugt die Erhöhung des Anteils von Fremdfüller eine klare Steigerung des Elastizitätsmoduls vom Asphalt und der Schubspannung vom Mastix.

Größtkorn und Sieblinie: Die Änderungen der Sieblinie und Größtkorn des Asphaltmischgutes ergeben keine eindeutige Erhöhung oder Reduktion des Ermüdungsverhaltens.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zusammenhänge zwischen dem Ermüdungsverhalten auf Asphaltniveau und dem Ermüdungsverhalten auf Mastixebene:

- Die Korrelation zwischen DSR-dynamischer Steifigkeit G* und der CIT-CY-Steifigkeit S* nach 100 L.W. zeigt eine zuverlässige positive Trendprognose. Die Trendlinie hat ein hohes Bestimmtheitsmaß (R^2= 0,85).
- Die Korrelation zwischen DSR-$\boldsymbol{T_6}$ und CIT-CY Oberspannung bei 1.000.000 L.W. weist eine positive Trendprognose auf. Die Trendlinie besitzt ein relativ geringes Bestimmtheitsmaß (R^2 = 0,5).
- Die Korrelation zwischen DSR-$\boldsymbol{T_6}$ und CIT-CY L.W. bis zur Ermüdung bei Ɛ el, anf. 50, 75, 100 und 150 µm/m hat keine zuverlässige Trendprognose. Die vier Trendlinien besitzen niedrige Bestimmtheitsmaße (R^2= 0,24-0,44).
- Die Korrelation zwischen DSR-$\boldsymbol{T_6}$ und CIT-CY Asphalt Ɛ el, anf. Dehnung bei 1.000.000 L.W., 100.000 L.W. und 10.000 L.W. ist äußerst gering. Die Bestimmtheitsmaße sind sehr niedrig (R^2= 0,08-0,22).

Aus den Untersuchungsergebnissen kann geschlossen werden, dass die Polymermodifikation von Bitumen sowie die Änderung des Füller-Bitumen-Verhältnisses einen wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten des Asphalts und des Mastix haben, im Vergleich zu anderen Rezepturparametern. Es ist zu empfehlen, für zukünftige Untersuchungen mehrere Varianten von Asphaltmischgut und Mastix zu betrachten und sich dabei auf diese zwei Rezepturparameter zu konzentrieren.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

6 Literaturverzeichnis

[1] M. Steineder, V. Donev, L. Eberhardsteiner und B. Hofko, *„Prediction of Fatigue Behaviour of Asphalt Mix from Tests on Asphalt Mastic“* In RILEM Bookseries (pp. 1489–1494), 2021.

[2] M. Steineder, V. Donev, B. Hofko und L. Eberhardsteiner, *„Correlation between Stiffness and Fatigue Behavior at Asphalt Mastic and Asphalt Mixture Level“* Journal of Testing and Evaluation, 50(2), 2021.

[3] ÖNORM EN 12697-24 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung“* Wien: Austrian Standards Institute, Apr. 2019.

[4] ÖNORM EN 12697-26 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 26: Steifigkeit“* Wien: Austrian Standards Institute, 2018+A1:2022.

[5] Technische Universität Wien, IVWS-Labor, *„AA 351 –Mastixermüdungsprüfungen am DSR*“, 2021.

[6] R. Blab, „Skriptum zur LVA *"Straßenbau und Straßenerhaltung"*, 2018.

[7] R. Blab, „IVWS. Skriptum zur LVA *"Straßenwesen"*, 2018.

[8] B. Hofko, IVWS. Skriptum zur LVA "*Road Pavement Materials*", 2023.

[9] ÖNORM EN 13043 *„Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen“* Wien: Austrian Standards Institute, Feb. 2014.

[10] Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V., *„KALKHYDRAT IM ASPHALT“* 01 2016. [Online]. Available: https://www.kalk.de/fileadmin/Home/Wissensportal/Publikationen/Fachpublikationen/Erd-_und_Stra%C3%9Fenbau/KALKHYDRAT_IM_ASPHALT.pdf.

[11] M. Wistuba, *„ORAB – Optimierung des Recyclinganteils in Asphalttrag- und -Binderschichten“ Verkehrsinfrastrukturforschung Austria“*,2012.

[12] Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., *„Asphaltschichten und ihr aufgaben“* [Online]. Available:https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/technik/asphaltschichten_und_ihr_aufgaben.pdf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

[13] M. Hospodka, *„Auswirkung des Feinanteils auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmastix“* 2017.

[14] ÖNORM EN 12697-33 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 33: Probestückvorbereitung mittels Walzverdichtungsgerät“* Wien: Austrian Standards Institute, Jan. 2023.

[15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen *„TP Asphalt-StB Teil 24 Spaltzug-Schwellversuch - Beständigkeit gegen Ermüdung“* Technische Prüfvorschriften für Asphalt, 2018.

[16] ÖNORM EN 12697-5 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 5: Bestimmung der Rohdichte“* Wien: Austrian Standards Institute, Feb. 2019.

[17] ÖNORM EN 12697-29 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 29: Bestimmung der Maße von Asphalt-Probekörpern“* Wien: Austrian Standards Institute, Aug. 2020.

[18] ÖNORM EN 12697-6 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern*“ Wien: Austrian Standards Institute, März. 2024.

[19] Technische Universität Wien, IVWS-Labor, *„AA 405 Bestimmung der Rohdichte von Asphalt-Probekörpern mit Wasser“,* 2007.

[20] ÖNORM EN 12697-8 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern“* Wien: Austrian Standards Institute, Feb. 2019.

[21] S. D. Diefenderfer, *„Investigation of Fatigue Properties of Superpave HMA at the Virginia Smart Road“* Virginia Polytechnic Institute and State University , 2009.

[22] ÖNORM EN 12697-26 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 26: Steifigkeit“* Wien: Austrian Standards Institute, Jan. 2023.

[23] L. Poulikakos und D. Poulikakos, *„Normierungsanforderungen für den Schweizer Anhang zur EN für Komplexer Modul und Ermudungswiderstand*“ Forschungsprojekt VSS 2014/502 auf Antrag des Schweizerischen Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), 2019.

[24] ÖNORM EN 12697-24 *„Asphalt - Prüfverfahren - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung.“* Wien: Austrian Standards Institute, Apr. 2019.

[25] L. K. Lercher, *„Materialtechnische Untersuchungen von Bitumen und Asphalt mit funktionalen Prüfmethoden“* 2024.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[26] ÖNORM B 12607-1 *„Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren.“* Wien: Austrian Standards Institute, Jan. 2025.

[27] M. Steineder, M. J. Peyer, B. Hofko, M. Chaudhary, N. Saboo und A. Gupta, *„Comparing different fatigue test methods at asphalt mastic level“* 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1617/s11527-022-01970-4.

[28] M. Hospodka, B. Hofko und R. Blab, *„Entwicklung einer Prüfmethode zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix“* Vortrag: Dresdner Asphalttage; Dresden, 2015

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Bitumenhaltige Bindemittel [7] 11
Abbildung 2.2: Asphaltstraßenbau [7] 14
Abbildung 2.3: Kennzeichnung empirisch und funktional [6] 14
Abbildung 2.4: Gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) Anforderungen an Asphalt [11] 15
Abbildung 2.5: Verlauf der durch Verkehr resultierenden Schubspannung im Asphalt [12] 16
Abbildung 3.1: Übersicht der Gebrauchsverhaltensorientierten Prüfungen [6] 19
Abbildung 3.2: Vorbereitung der Gesteinskörnung 20
Abbildung 3.3: Drei gebohrte Probekörper aus der Asphaltplatte. 21
Abbildung 3.4: Rohdichte und mittleren Hohlraumgehalt der jeweiligen Mischgüter. 23
Abbildung 3.5: Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit des Asphalts gegen Ermüdung [22] 25
Abbildung 3.6: Prinzip des Spannungsverlaufs auf dem Probekörper in CIT-CY Prüfung, $\boldsymbol{\sigma o}$: Oberspannung, $\boldsymbol{\sigma u}$: Unterspannung [15] 26
Abbildung 3.7: Beispiel für die Belastungsstufen im Vorversuch [15] 27
Abbildung 3.8: Beispiel für die Festlegung der Oberspannungen für die Ermüdungsversuche [15] 27
Abbildung 3.9: CIT-CY Versuchsaufbau [25] 28
Abbildung 3.10: Prinzip des CIT-CY Versuches [15] 29
Abbildung 3.11: GVO-Prüfungen der Bitumenösen Bindemittel [6] 33
Abbildung 3.12: RTFOT-Wärmekammer und die dazugehörigen Glasflaschen [6] 34
Abbildung 3.13: Herstellung des Asphaltmastixes 34
Abbildung 3.14: Herstellung des DSR-Probekörpers 35
Abbildung 3.15: Geometrie des DSR-Probekörpers [28] 36
Abbildung 3.16: Mastix DSR-Ermüdungsversuch [28] 37
Abbildung 4.1: Ermüdungskurven für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70. 39
Abbildung 4.2: Ermüdungskurven für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ und AC 22 45/80-65 Füller-. 40
Abbildung 4.3: Ermüdungskurven für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65. 41

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 4.4: Lastwechsel bis zur Ermüdung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70. 42
Abbildung 4.5: Lastwechsel bis zur Ermüdung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ und AC 22 45/80-65 Füller-. 42
Abbildung 4.6: Lastwechsel bis zur Ermüdung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65. 43
Abbildung 4.7: Elastische Anfangsdehnung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 25/55-65 und AC 22 trag 50/70. 44
Abbildung 4.8: Elastische Anfangsdehnung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 22 bin PmB 45/80-65 Füller+ und AC 22 45/80-65 Füller-. 44
Abbildung 4.9: Elastische Anfangsdehnung vs. Oberspannung für AC 22 bin PmB 45/80-65, AC 16 bin PmB 45/80-65 und AC 32 45/80-65. 45
Abbildung 4.10: Ermüdungskurven für Asphaltmastix 46
Abbildung 4.11: Korrelation zwischen DSR-***T6*** und CIT-CY Lastwechsel bis zur Ermüdung bei Ɛ el, anf. 50, 75, 100 und 150 µm/m 48
Abbildung 4.12: Korrelation zwischen den DSR-***T6*** und CIT-CY Oberspannung bei 1.000.000 L.W. 49
Abbildung 4.13: Korrelation zwischen den DSR-***T6*** und CIT-CY Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 1.000.000 L.W. 51
Abbildung 4.14: Korrelation zwischen den DSR-***T6*** und CIT-CY Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 100.000 L.W. 51
Abbildung 4.15: Korrelation zwischen den DSR-***T6*** und CIT-CY Ɛ el, anf. Dehnung [µm/m] bei 10.000 L.W. 52
Abbildung 4.16: Korrelation zwischen den Mastixsteifigkeit G* und Asphaltsteifigkeit S* der 7 Mischgut-Varianten 53

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: In dieser Diplomarbeit behandelte Asphaltmischgüter 15
Tabelle 2-2: Verhältnis Bitumen zum Füller- und Feinanteil ≤ 0,063 mm in den Asphaltmischgütern. 17
Tabelle 3-1: Vergleich zwischen 4PB-Prüfung und CIT-CY & IT-CY Prüfung [23] 25
Tabelle 3-2: Angaben zu jedem geprüften Probekörper [15] 31
Tabelle 3-3: Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 (Referenzmischgut) 31
Tabelle 4-1: Kategorisierung nach EN 13108-1 38
Tabelle 4-2: DSR- ***T*6** (Schubspannung bei 10^6 L.W.) der Mastix-Varianten 45
Tabelle 4-3: DSR-***T*6** und CIT-CY Oberspannung bei 1.000.000 L.W. 49
Tabelle 4-4: DSR-***T*6** und CIT-CY Asphalt Ɛ el, anf. Dehnung bei 1.000.000 L.W., 100.000 L.W. und 10.000 L.W. 50
Tabelle 4-5: Mastixsteifigkeit G* und Asphaltsteifigkeit S* der 7 Mischgut-Varianten 52
Tabelle 8-1: Angaben zum AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4 62
Tabelle 8-2: Angaben zum AC 22 trag 50/70, T1, G4 63
Tabelle 8-3: Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+ 64
Tabelle 8-4: Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller- 65
Tabelle 8-5: Angaben zum AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4 66
Tabelle 8-6: Angaben zum AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4 67

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

9 Anhang

9.1.1.1 Angaben zum AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4

- Rohdichte: 2,528 [g/cm³]
- CIT-CY Prüftemperatur: +10°C
- CIT-CY Belastungsfrequenz:10 Hz

Tabelle 9-1: Angaben zum AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4

Nr.	P.K. bezeich-nung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	Hohl-raum-gehalt [V%]	Elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el,\,anf}$ [‰]	Unter-spannung σ_u [MPa]	Ober-spannung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul lE*l [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]
1	E1423A	61,4	149,6	2,454	2,9	-	0,035	Vorversuch	-	-
2	E1423B	61,5	149,6	2,476	2,1	149	0,035	0,900	10085	3615
3	E1423C	61,1	149,6	2,443	3,4	67	0,035	0,450	10845	84504
4	E1424A	61,0	149,6	2,463	2,6	94	0,035	0,600	10609	32374
5	E1424B	61,1	149,6	2,441	3,4	47	0,035	0,300	9836	1552984
6	E1424C	61,3	149,7	2,455	2,9	277	0,035	1,300	7871	548
7	E1425A	61,1	149,6	2,466	2,5	59	0,035	0,400	10666	236251
8	E1425B	61,1	149,7	2,470	2,3	128	0,035	0,750	9790	7241
9	E1425C	61,0	149,6	2,467	2,4	91	0,035	0,650	11855	17771
10	E1426A	61,4	149,6	2,438	3,6	254	0,035	1,300	8716	705
11	E1426B	61,3	149,6	2,447	3,2	53	0,035	0,400	12006	247252
12[2]	E1426C	61,5	149,6	2,442	3,4	-	0,035	0,750	-	-

[2] Lesefehler im LaMa-System

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

9.1.1.2 Angaben zum AC 22 trag 50/70, T1, G4

- Rohdichte: 2,528 [g/cm³]
- CIT-CY Prüftemperatur: +10°C
- CIT-CY Belastungsfrequenz:10 Hz

Tabelle 9-2: Angaben zum AC 22 trag 50/70, T1, G4

Nr.	P.K. bezeich-nung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	Hohl-raum-gehalt [V%]	Elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el,\,anf}$ [‰]	Unter-spannung σ_u [MPa]	Ober-spannung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul |E*| [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]
1	E1427A	149,6	61,6	2,444	3,3	49	0,035	500	16672	43754
2	E1427B	149,6	61,3	2,426	4,0	52	0,035	500	15613	35158
3	E1427C	149,6	61,5	2,462	2,6	-	0,035	Vorversuch	-	-
4	E1428A	149,6	60,7	2,475	2,1	92	0,035	900	16343	6505
5	E1428B	149,6	60,5	2,454	2,9	145	0,035	1300	15027	1107
6	E1428C	149,6	60,8	2,462	2,6	28	0,035	300	16109	642509
7	E1429A	149,6	62,2	2,455	2,9	210	0,035	1700	13711	359
8	E1429B	149,6	61,7	2,463	2,6	105	0,035	900	14368	2752
9	E1429C	149,6	61,8	2,397	5,2	186	0,035	1300	11989	437
10	E1430A	149,6	61,6	2,448	3,2	215	0,035	1700	13538	392
11	E1430B	149,6	61,8	2,488	1,6	98	0,035	900	15315	5154
12	E1430C	149,6	61,2	2,435	3,7	69	0,035	600	14183	6753

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

9.1.1.3 Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+

- Rohdichte: 2,544 [g/cm³]
- CIT-CY Prüftemperatur: +10°C
- CIT-CY Belastungsfrequenz:10 Hz

Tabelle 9-3: Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller+

Nr.	P.K. bezeich-nung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	Hohl-raum-gehalt [V%]	Elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el, anf}$ [‰]	Unter-spannung σ_u [MPa]	Ober-spannung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul lE*l [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]
1	E1431A	149,6	60,5	2,476	2,3	56	0,035	300	8274	850514
2	E1431B	149,6	60,4	2,488	2,3	281	0,035	1300	7718	504
3	E1431C	149,6	60,6	2,491	2,3	-	0,035	Vorversuch	-	-
4	E1432A	149,6	60,7	2,490	2,1	114	0,035	600	8600	17721
5	E1432B	149,6	60,5	2,474	2,8	55	0,035	300	8331	747449
6	E1432C	149,6	60,2	2,474	2,8	124	0,035	750	10104	8535
7	E1433A	149,6	61,0	2,484	2,4	97	0,035	600	10038	25801
8[3]	E1433B	149,6	60,8	2,443	4,0	134	0,035	900	11188	2969
9[4]	E1433C	149,6	61,1	2,487	2,2	342	0,035	1300	6347	356
10	E1434A	149,6	60,5	2,470	2,9	82	0,035	450	8811	121016
11	E1434B	149,6	60,7	2,482	2,4	185	0,035	900	8304	2741
12	E1434C	149,6	60,8	2,485	2,3	82	0,035	450	8801	102751

[3] Nicht weiter berücksichtigt
[4] Nicht weiter berücksichtigt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

9.1.1.4 Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-

- Rohdichte: 2,560 [g/cm³]
- CIT-CY Prüftemperatur: +10°C
- CIT-CY Belastungsfrequenz:10 Hz

Tabelle 9-4: Angaben zum AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller-

Nr.	P.K. bezeich-nung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	Hohl-raum-gehalt [V%]	Elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el, anf}$ [‰]	Unter-spannung σ_u [MPa]	Ober-spannung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul |E*| [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]
1	E1435A	149,6	61,1	2,447	4,4	176	0,035	800	7566	2736
2[5]	E1435B	149,6	60,8	2,438	4,8	439	0,035	1400	5360	249
3	E1435C	149,6	61,0	2,467	3,6	111	0,035	600	8782	12504
4	E1436A	149,6	61,4	2,451	4,3	-	0,035	Vorversuch	-	-
5	E1436B	149,6	61,3	2,450	4,3	253	0,035	1000	6646	889
6	E1436C	149,6	61,2	2,444	4,5	89	0,035	400	7087	58425
7[6]	E1437A	149,6	61,1	2,418	5,6	158	0,035	800	8505	1662
8	E1437B	149,6	61,1	2,417	5,6	119	0,035	600	8400	13731
9	E1437C	149,6	61,5	2,469	3,6	42	0,035	250	9016	1058646
10	E1438A	149,6	61,2	2,455	4,1	232	0,035	1000	7295	1018
11	E1438B	149,6	61,1	2,441	4,7	59	0,035	300	7768	302220
12	E1438C	149,6	61,4	2,445	4,5	51	0,035	300	8829	499757

[5] Nicht weiter berücksichtigt
[6] Nicht weiter berücksichtigt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

9.1.1.5 Angaben zum AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4

- Rohdichte: 2,579 [g/cm³]
- CIT-CY Prüftemperatur: +10°C
- CIT-CY Belastungsfrequenz:10 Hz

Tabelle 9-5: Angaben zum AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4

Nr.	P.K. bezeich-nung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	Hohl-raum-gehalt [V%]	Elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el,\,anf}$ [‰]	Unter-spannung σ_u [MPa]	Ober-spannung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul |E*| [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]
1	E1448A	149,6	61,7	2,386	7,5	61	0,035	300	7402	102759
2	E1448B	149,6	61,8	2,397	7,1	140	0,035	600	7043	7116
3	E1448C	149,6	62,0	2,417	6,3	-	0,035	Vorversuch	-	-
4	E1449A	149,6	60,9	2,418	6,2	221	0,035	900	6807	1614
5	E1449B	149,6	60,7	2,418	6,2	84	0,035	400	7532	41135
6	E1449C	149,6	60,8	2,415	6,4	49	0,035	250	7405	506507
7	E1450A	149,6	60,9	2,420	6,2	185	0,035	750	6676	3395
8	E1450B	149,6	60,7	2,406	6,7	100	0,035	450	7160	25637
9	E1450C	149,6	61,1	2,424	6,0	221	0,035	900	6769	1262
10	E1451A	149,6	61,7	2,391	7,3	136	0,035	600	7172	6023
11	E1451B	149,6	62,1	2,433	5,7	55	0,035	300	8265	220011
12	E1451C	149,6	62,2	2,405	6,8	36	0,035	200	7749	1704006

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

9.1.1.6 Angaben zum AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4

- Rohdichte: 2,558 [g/cm³]
- CIT-CY Prüftemperatur: +10°C
- CIT-CY Belastungsfrequenz:10 Hz

Tabelle 9-6: Angaben zum AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4

Nr.	P.K. bezeich-nung	Durch-messer D [mm]	Höhe H [mm]	Raum-dichte ρ_b [g/cm³]	Hohl-raum-gehalt [V%]	Elastische Anfangs-dehnung $\varepsilon_{el,\,anf}$ [‰]	Unter-spannung σ_u [MPa]	Ober-spannung σ_o [MPa]	Steifig-keits-modul |E*| [MPa]	Last-wechsel-zahl N_{Makro} [-]
1	E1452A	149,6	91,6	2,436	4,8	189	0,035	900	7936	1701
2	E1452B	149,6	91,5	2,404	6,0	103	0,035	450	7061	31064
3	E1452C	149,6	91,2	2,417	5,5	59	0,035	300	7730	252158
4	E1453A	149,6	91,1	2,402	6,1	-	0,035	Vorversuch	-	-
5	E1453B	149,6	91,2	2,424	5,2	150	0,035	750	8199	4057
6	E1453C	149,6	91,3	2,423	5,3	109	0,035	600	8963	13705
7	E1454A	149,6	91,2	2,423	5,3	62	0,035	300	7461	207652
8	E1454B	149,6	91,3	2,436	4,8	120	0,035	600	8179	8746
9	E1454C	149,6	91,1	2,423	5,3	36	0,035	250	10384	462512
10	E1455A	149,6	91,0	2,408	5,9	204	0,035	900	7389	1401
11	E1455B	149,6	90,9	2,375	7,2	75	0,035	400	8428	44501
12	E1455C	149,6	90,5	2,397	6,3	70	0,035	400	9067	36875

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub