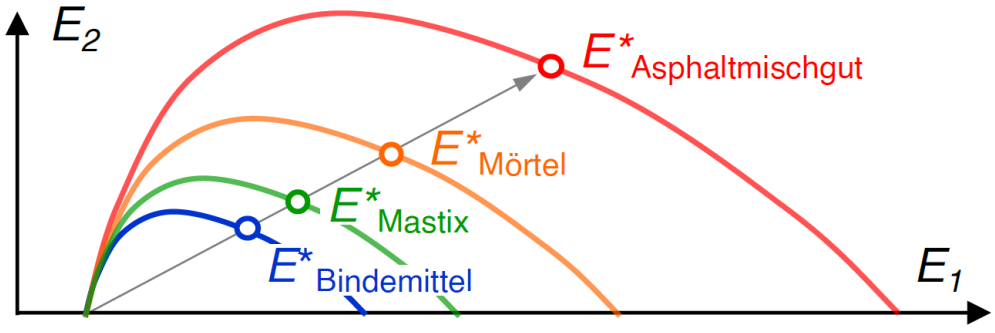
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Bundesamt für Strassen ASTRA
FFG Forschung wirkt.

Vereinfachung der prüftechnischen Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Asphalt
VEGAS

Forschungsprojekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2017 D-A-CH 2017



November 2019

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

FFG Forschung wirkt.

Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich

Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Mühlestrasse 2, Ittigen
3003 Bern
Schweiz

Für den Inhalt verantwortlich:
TU Braunschweig, Institut für Straßenwesen (ISBS)
Beethovenstraße 51b
38106 Braunschweig
Deutschland

Programmmanagement:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

FFG Forschung wirkt.

Vereinfachung der prüftechnischen Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Asphalt
VEGAS

Forschungsprojekt finanziert im Rahmen der

D-A-CH Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2017

D-A-CH 2017

AutorInnen:

Michael P. Wistuba

Johannes Büchner

Thilo Hilmer

Michael Steineder

Lukas Eberhardsteiner

Valentin Donev

Bernhard Hofko

Martin Arraigada

Christiane Raab

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich

Bundesamt für Strassen, Schweiz

Auftragnehmer:

Technische Universität Braunschweig
Institut für Straßenwesen (ISBS)
Beethovenstraße 51 b
38106 Braunschweig
Deutschland

Technische Universität Wien
Institut für Verkehrswissenschaften
Gusshausstraße 28/230/3
1040 Wien
Österreich

Empa – Abteilung Strassenbau/Abdichtung
Überlandstraße 129
8600 Dübendorf
Schweiz

INHALTSVERZEICHNIS

1 Hintergrund und ziel des Forschungsprojekts VEGAS 7
1.1 Gebrauchsverhalten von Asphalt 7
1.2 Veranlassung und Zweck 9
1.3 Vereinfachte Ansprache des Gebrauchsverhaltens 10
2 Vorgehensweise 13
3 Verwendete Materialien 15
3.1 Materialübersicht 15
3.2 Gesteinskörnungen 17
3.3 Bitumen 18
3.4 Asphaltmischgutkonzeption 19
3.5 Asphaltmastixkonzeption 21
4 Teilbericht A: **Ergebnisbericht der TU Braunschweig** 23
4.1 Untersuchungsmethodik 23
4.1.1 Anwendung von Äquimodultemperaturen 25
4.1.2 Prüfungen an Bitumen und Asphaltmastix 27
4.1.3 Prüfungen am Asphalt 33
4.1.4 Untersuchung der inneren Asphaltstruktur 37
4.2 Untersuchungsergebnisse 38
4.2.1 Steifigkeitsuntersuchungen an Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt . 38
4.2.2 Performance-Prüfungen an Bitumen und Asphaltmastix 44
4.2.3 Performance-Prüfungen an Asphaltprobekörpern 48
4.2.4 Kennwerte der inneren Asphaltstruktur 51
4.3 Auswertung 52
4.3.1 Steifigkeit 53
4.3.2 Widerstand gegen Kälterisse 56
4.3.3 Widerstand gegen Ermüdung 58
4.3.4 Widerstand gegen Verformung 59
4.3.5 Auswertung der inneren Asphaltstruktur 61
4.4 Zusammenfassung Teilbericht A 64
5 Teilbericht B: **Ergebnisbericht der TU Wien** 66
5.1 Untersuchungsmethodik 66
5.1.1 Performanceprüfungen an Bitumen und Mastix 67
5.1.2 Performanceprüfungen an Asphalt 70
5.2 Untersuchungsergebnisse 78
5.2.1 Performanceprüfungen an Bitumen und Mastix 78
5.2.2 Performanceprüfungen an Asphalt 82
5.3 Auswertung 90
5.4 Zusammenfassung Teilbericht B 101
6 Teilbericht C: **Ergebnisbericht der Empa** 103
6.1 Untersuchungsmethodik 103
6.1.1 Performanceprüfungen an Bitumen, Mastix und Mörtel 103
6.1.2 Performanceprüfungen an Asphalt 106
6.2 Untersuchungsergebnisse 115

6.2.1 Performanceprüfungen an Bitumen, Mastix und Mörtel 115
6.2.2 Performanceprüfungen an Asphalt 118
6.3 Auswertung 125
6.3.1 Kälteprüfungen 125
6.3.2 Ermüdungsprüfungen und Großversuche MMLS3 127
6.4 Zusammenfassung Teilbericht C 127
7 Gesamtzusammenfassung 130

1 HINTERGRUND UND ZIEL DES FORSCHUNGSPROJEKTS VEGAS

1.1 Gebrauchsverhalten von Asphalt

Unter Gebrauchsverhalten (Performance) von Asphalt versteht man das Materialverhalten von Asphaltbefestigungen im eingebauten Zustand unter den spontanen Einwirkungen aus Verkehrslast und Witterung sowie unter den langfristigen Klimaeinflüssen (Wistuba & Schrader, 2019). Die Erreichung einer guten Asphaltperformance ist das Ziel eines technisch und wirtschaftlich effizienten Straßenbaus (Wistuba, 2019).

Über gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen (Performance-Prüfungen) an verdichteten Asphaltproben kann das zu erwartende Gebrauchsverhalten abgeschätzt und so die Eignung einer bestimmten Asphaltart bzw. -sorte als Schicht im Straßenoberbau nachgewiesen werden. Mit der Einführung der Normenserie EN 13108 ist es seit 2008 möglich, gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethoden für die Konformitätsbewertung im Rahmen der Erstprüfung (bzw. Typprüfung) von Asphalt anzuwenden. Mit den Performance-Prüfungen werden die primären Gebrauchseigenschaften mit statischen und zyklischen Prüfungen an verdichteten Asphaltprobekörpern im Labor untersucht und so das zu erwartende Gebrauchsverhalten des Asphalts abgeschätzt.

Dabei wird das Gebrauchsverhalten von Asphalt üblicherweise anhand folgender primärer Gebrauchseigenschaften bewertet: Kälteverhalten, Steifigkeit, Widerstand gegen Ermüdung und Widerstand gegen bleibende Verformung (Begriffsbestimmung vgl. (EN 13108-1, 2016)). Die für die Prüfung dieser Gebrauchseigenschaften zulässigen Prüfmethoden sind in der Europäischen Normenreihe EN 12697 (2012) aufgeführt. Das sind Kriech- und Zugfestigkeitsprüfungen im Tieftemperaturbereich (Widerstand gegen Kälterissbildung) sowie zyklische Prüfungen im Bereich des linearelastischen Materialverhaltens (Steifigkeit) und im Bereich des nichtlinearen Materialverhaltens (Ermüdungswiderstand, Verformungswiderstand). Bei allen Prüfmethoden wird unter kontrollierten Prüfbedingungen ein Asphaltprobekörper mit definierten Abmessungen beansprucht und die last-, temperatur- und zeitabhängige Veränderung des Verhaltens im Asphaltprobekörper anhand der Primärwirkungen (Spannungen, Dehnungen) gemessen (Wistuba & Schrader, 2019).

Als Ergebnis dieser Performance-Prüfungen stehen physikalisch interpretierbare (fundamentale) Materialkenngrößen bzw. Materialgesetze zur Verfügung. Damit können neue Asphaltrezepturen hinsichtlich ihrer Performance bewertet werden um die die Eignung für den Gebrauchszweck nachzuweisen oder die zu erwartende Lebensdauer grob abzuschätzen.

Stand der Technik in Deutschland

Festhaltend am Erfahrungshintergrund hat Deutschland zunächst nur den empirischen Ansatz der EN 13108 national in Form der Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB, 2013) umgesetzt. Asphaltmischgut wird in Deutschland demnach hauptsächlich anhand von empirischen volumetrischen Kenngrößen, wie Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt und Hohlraumgehalt und nicht nach den Eigenschaften im Gebrauch konzipiert. Von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) wurden dafür ausgewählte Prüfverfahren der Normenserie EN 12697 in Form von Technische Prüfvorschriften (TP) herausgegeben. Neben den empirischen Prüfverfahren sind darin auch gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren angegeben, die vor allem in der Forschung und für Gutachten Anwendung finden. Der Stempeleindringversuch und der Spurbildungsversuch sind dabei die einzigen Performance-Prüfungen, die in der TL Asphalt-StB für einige Asphaltarten erforderlich sind. Seit Jahren gibt es Bestrebungen, das Gebrauchsverhalten bei der Asphaltkonzeption stärker zu berücksichtigen. Der Einsatz beschränkt sich heute im Wesentlichen auf die Entwicklung von neuen Asphaltrezepturen und Schichtaufbauten, auf Schadensgutachten und auf Großprojekte (z. B. ÖPP-Projekte), an denen meist nur große Bauunternehmen tätig sind (Wistuba & Schrader, 2019).

Stand der Technik in Österreich

Neben dem empirischen Ansatz, der eine Konzeption von Asphaltmischgut in Abhängigkeit des verwendeten Bindemittels sowie von Korngrößenverteilung, Bindemittel- und Hohlraumgehalt erlaubt (ÖNORM-Serie B358x-1), wurde in Österreich eine parallele Normenserie (ÖNORM-Serie B 358x-2) als GVO Ansatz (gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz) eingeführt. Im Jahr 2013 wurden hierzu die bauvertragsorientierten Richtlinien RVS 08.16.06 (Anforderung an Asphaltschichten – GVO Ansatz) und RVS 08.97.06 (Anforderung an Asphaltmischgut – GVO Ansatz) für verbindlich erklärt. In diesen Richtlinien erfolgt eine Einteilung der GVO-Anforderungen an Deck-, hochstandfeste und bitumengebundene (österr. *bituminöse*) Tragschichten in Klassen, die Grenzwerte für die speziellen Anforderungen der jeweiligen Schichte enthalten. Die Prüfung dieser Eigenschaften erfolgt durch die oben beschriebenen Prüfungen des Tieftemperatur- (TSRST gemäß EN 12697-46), Steifigkeits- (4PBB gemäß EN 12697-26), Ermüdungs- (4PBB gemäß EN12697-24) und Verformungsverhaltens (TCCT gemäß EN 12697-25) und nach den Prüfbedingungen gemäß EN 13108-20. Die Klassifizierung richtet sich nach den EN 13108-xx.

Basierend auf den Anforderungen gemäß ÖNORM EN 13108 wurden in den nationalen Umsetzungsnormen ÖNORM 3580 für alle Asphalttypen Kategorien als Mindestanforderung an das Gebrauchsverhalten für Deckschichten aus Asphaltbeton (AC deck), Splittmastixasphalt (SMA), sowie Asphaltbetone für Binderschichten (AC binder) und Asphaltbetone für Tragschichten (AC trag) festgelegt.

Stand der Technik in der Schweiz

In der Schweiz wurden im Rahmen der Straßenbauforschung verschiedene Projekte zum Gebrauchsverhalten durchgeführt, welche letztlich in verschiedene normative Anhänge einflossen, gleichzeitig aber auch die Problematik klar aufzeigten, im Rahmen eines Mix Designs hergestellte Laborprüfkörper hinsichtlich Performance mit der Realität verknüpfen zu wollen (Poulikakos et al., 2015; Raab & Partl, 2016). Dies einerseits, weil die Prüfungen die wirklichen Verhältnisse (Verkehr und Klima) nur bedingt abzubilden vermögen und anderseits, weil die Prüfkörper selbst tatsächlich unter Feldbedingungen eingebaute Schichten nur eingeschränkt repräsentieren (Anisotropie, Inhomogenität, etc.). Aus diesem Grund wurde nach Möglichkeit darauf geachtet, Validierungen der Anforderungen und der verwendeten Performanceprüfungen mit dem beschleunigten Verkehrslastsimulatoren durchzuführen, wobei sowohl der Mobile Load Simulator MMLS3 (Li & Marasteanu, 2009) als auch der Full-Scale-Simulator MLS10 eingesetzt wurden (Arraigada et al., 2015, 2016a, 2016b; Partl et al., 2015). Hier entstand jüngst ein Abschlussbericht zum Einfluss kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung mit der Großversuchsanlage (Arraigada et al., 2017). Zudem war die Schweiz an umfangreichen Untersuchungen (im Rahmen von RILEM) zum Spurbildungstest mit großem Rad beteiligt (Perraton et al., 2011) und hat auch selbst dazu umfangreiche Forschung betrieben (Partl & Sokolov, 2009). Die in der Schweiz durchgeführten Performance-Tests berücksichtigten auch klimatische Aspekte, beispielsweise den Einfluss des Gebrauchsverhaltens unter Einwirkung von Wasser bei Spezialdeckschichten wie offenporigen Asphalten, welche hinsichtlich Lärmminderung von Interesse waren und sind (Partl et al., 2008; Perraton et al., 2011).

1.2 Veranlassung und Zweck

Performance-Prüfungen werden aufgrund des Erkenntnisgewinns zum Materialverhalten von Asphalt unter realitätsnahen Laborbedingungen in der Fachwelt oft für gut und richtig befunden (wenn es auch gewisse fachliche Vorbehalte beispielweise zur teilweise schlechten Wiederhol- und Vergleichspräzision gibt). Jedoch ist der Prüfaufwand aufgrund der Komplexität und des damit verbundenen Bedarfs an aufwändigen Prüfgeräten im Vergleich

zu einfachen volumetrischen Prüfungen (Sieblinie, Hohlraumgehalt, usw.) hoch und eignet sich deshalb kaum für Routineuntersuchungen (Wistuba & Schrader, 2019). Performance-Prüfungen werden in der Baupraxis in den D-A-CH-Ländern praktisch nicht angewandt.

Ziel des Forschungsprojekts VEGAS ist es, die gebrauchsverhaltensorientierten Prüfungen an Asphalten in eine praxistaugliche Prüfsystematik zu überführen. Es soll ein vereinfachtes GVO Prüfkonzept unter Anwendung von verschiedenen Prüfmethoden an Bitumen[1] und Asphaltmastix (Bitumen-Füller-Gemisch) entwickelt werden, um damit systematische Zusammenhänge zwischen dem Gebrauchsverhalten von Bitumen bzw. Asphaltmastix und Asphalt zu identifizieren.

Durch die vereinfachte Prüfsystematik soll die Voraussetzung geschaffen werden, die grundsätzliche Idee der gebrauchsverhaltensorientierten Ansprache von bitumengebundenen Straßenbaustoffen im Labor auch in der Baupraxis zu etablieren. Die Anwendungsmöglichkeiten für eine vereinfachte prüftechnische Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Asphalt in der Baupraxis wären vielfältig, u. a. (vgl. Wistuba & Schrader, 2019)

- eine rasche, aussagekräftige Wareneingangskontrolle;
- die Auswahl/Bestellung der bestgeeigneten Bindemittel;
- die Bewertung von lieferfrischen, gealterten, geblendeten Bindemitteln;
- der Ausschluss ungeeigneter Bindemittel und ungeeigneter Bindemittel-Füller-Kombinationen;
- die Optimierung der Asphaltmischgut-Rezeptur auch mit Asphaltgranulat (Bewertung von Rejuvenatoren; präzise Wahl von Art und Menge des Frischbindemittels);
- und die Bewertung alternativer Baustoffgemische (Eigen und Fremdfüller, Additive, Mehrfachrecycling).

1.3 Vereinfachte Ansprache des Gebrauchsverhaltens

Zur Entwicklung einer zuverlässigen Prüfsystematik wird von einer naheliegenden Vorstellung ausgegangen: Das Gebrauchsverhalten von Asphalt wird von der Bitumenqualität bzw. Mastixqualität maßgeblich gesteuert. Es wird also vermutet, dass ein zu den empirischen

[1] In diesem Bericht wird der Begriff „Bitumen“ stellvertretend für bitumenhaltige Bindemittel verwendet, also gleichermaßen für nichtmodifizierte Straßenbaubitumen und modifizierte bitumenhaltige Bindemittel.

Richtlinien konformer Asphalt, d. h. der alle empirischen Grenzwerte des Gebrauchsverhaltens hinsichtlich Mischgutzusammensetzung, Herstellung und Einbau erfüllt, strukturell einwandfrei intakt und makroskopisch ungeschädigt ist, wesentliche Gebrauchseigenschaften zeigt, die dominant durch das Bindemittel bzw. die Mastix gesteuert werden. Seine primären Gebrauchseigenschaften Steifigkeit, Festigkeit, Viskosität, Kriech- und Relaxationsverhalten, Risswiderstand, Verformungswiderstand, Ermüdungswiderstand sowie Alterungsverhalten sollen über Bitumen- bzw. Mastixkennwerte abgeschätzt werden können.

Der Einfluss von Bitumen und Füller auf die Asphaltperformance wurde bereits vielfach studiert (siehe u.a. Dragon, 2015; Kim et al., 2003; Olard et al., 2003; Poulikakos et al., 2006; Schrader, 2016, 2017).

Im Bereich des linear-visko-elastischen Materialverhaltens (LVE-Bereich) wurden direkte Zusammenhänge des mechanischen Materialverhaltens für Bitumen, Mastix, Mörtel und Asphaltmischgut identifiziert (Olard & Di Benedetto, 2003; Riccardi, 2017; Riccardi et al., 2018), welche in Abbildung 1 dargestellt sind. Danach kann nach der Ermittlung der Modellparameter im LVE-Bereich, die Steifigkeit des verdichteten Asphalts aus den Bitumeneigenschaften mit ausreichender Genauigkeit prognostiziert werden.

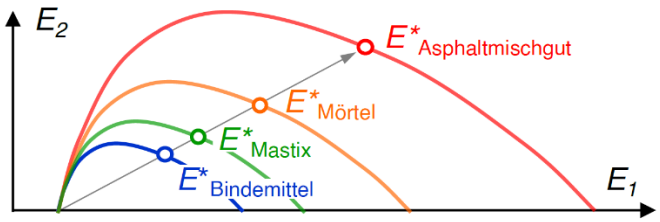


Abbildung 1. In Laborversuchen feststellbarer und modellhaft beschreibbarer Zusammenhang des mechanischen Materialverhaltens von Bindemittel, Mastix, Mörtel und Mischgut für einen Walzasphalt, basierend auf der Grundlage des 2S2P1D-Modells (2 springs, 2 parabolic dashpots, 1 dashpot) und des SHStS-Gesetzes (Shift-Homothety-Shift in time-Shift) (Wistuba, 2019).

Der LVE-Bereich für Asphalt gilt für kleine Deformationen und bei wenigen Lastwechseln, nach Di Benedetto (1990) für Dehnungen kleiner 10^{-4} und weniger als 10^{3} Lastwechsel. Bei einer mechanischen und/oder thermischen Beanspruchung außerhalb des LVE-Bereichs kommt es zu nichtlinearem Materialverhalten und Materialschädigung in Form von Rissbildung, Ermüdung oder Verformung. Performance-Prüfungen an Asphalt erfolgen - ausgenommen die Ermittlung Steifigkeit - außerhalb des LVE-Bereichs, wobei dieser entweder verlassen wird durch eine hohe mechanische und/oder thermische Beanspruchung (z. B.

zur Analyse der Rissbildung oder des Verformungswiderstands) oder durch eine hohe Anzahl an Belastungszyklen (z. B. zur Analyse der Ermüdung) (Wistuba, 2019).

Teilweise konnten in der Vergangenheit Korrelationen zwischen der Performance von Bitumen bzw. Mastix und Asphalt bei einer Beanspruchung außerhalb des LVE-Bereichs identifiziert werden (z. B. Johnson et al., 2009; Liao et al., 2012; Pérez-Jiménez et al., 2008; Shen et al., 2010; Soenen et al., 2004). Die Untersuchungen beschränkten sich jedoch auf einen begrenzten Bereich der Gebrauchstemperatur und hatten einen geringen Untersuchungsumfang. Ausständig sind bislang Untersuchungen über den gesamten Gebrauchstemperaturbereich und die Identifikation von signifikanten Korrelationen zwischen dem Gebrauchsverhalten von Asphalt und dem Gebrauchsverhalten des zugehörigen Bitumens bzw. der zugehörigen Mastix.

Das Forschungsprojekt VEGAS zielt auf die Erarbeitung solcher Korrelationen ab. Somit sind eindeutige korrelierende Materialeigenschaften auf Asphalt- und Bitumenebene zu identifizieren. Weil bitumenhaltige Baustoffe aufgrund ihrer ausgeprägten elasto-viskosen Eigenschaften ein stark temperaturabhängiges Materialverhalten zeigen, muss die Suche nach solchen Korrelationen in unterschiedlichen Temperaturbereichen erfolgen. Im Forschungsprojekt VEGAS werden drei Temperaturbereiche unterschieden, in denen die Materialeigenschaften mit jeweils unterschiedlichen Prüfverfahren sowohl auf Asphaltebene, als auch auf Bitumen- und Mastixebene angesprochen werden. Der Tieftemperaturbereich reicht von -40 bis 0°C, der Mitteltemperaturbereich von -10 bis 40°C und der Hochtemperaturbereich von 30 bis 90°C. Diese Temperaturbereiche sind auch maßgebend zur Bestimmung der wesentlichen Gebrauchseigenschaften von Asphalt mittels Performance-Prüfungen. Die Ansprache von Asphalt kann daher in diesen drei Temperaturbereichen mit bekannten Performance-Prüfungen erfolgen. Abweichend dazu gibt es bislang zur Ansprache der Performance von Bitumen und Mastix im Tief- und Mitteltemperaturbereich keine bekannten Prüfverfahren. Im Hochtemperaturbereich kann das Dynamische Scherrheometer eingesetzt werden. Das Dynamische Scherrheometer (DSR) wurde als Prüfgerät zur gebrauchsverhaltensorientierten Ansprache von Bitumen im Rahmen von SHRP eingeführt (Strategic Highway Research Program; Anderson et al., 1994). Im DSR können Materialproben zwischen zwei parallelen Platten (Durchmesser 4, 8, 20 oder 25 mm) mit unterschiedlichen Belastungsarten (rotierend oder oszillierend) auf Scherung belastet werden, um so die rheologischen Eigenschaften zu bestimmen. Das DSR ermöglicht eine große Variabilität der Prüfparameter (Belastungsart, Belastungshöhe, Temperatur, Frequenz,

etc.) und bietet dadurch eine umfangreiche Datenquelle mit komplexen Interpretationsmöglichkeiten.

Es wurden bislang verschiedene Anstrengungen unternommen, um geeignete Prüfverfahren für Bitumen im DSR zu etablieren. So entstanden zwar verschiedene Prüfsystematiken im Hochtemperaturbereich, allgemein anerkannte Prüfmethoden im Tieftemperaturbereich und für Mastixproben gibt es heute aber nicht.

Im Laufe der letzten ca. 5 Jahre wurde bei allen Projektpartnern anhand von sorgfältigen systematischen Studien und Serienprüfungen an ausreichend vielen Materialproben die Grundlage und ein Erfahrungshintergrund geschaffen, um auch im Mittel- und Tieftemperaturbereich Bitumen- und Mastixproben mit ausreichender Genauigkeit und mit zuverlässiger Prozesssicherheit im DSR prüfen zu können. Diese neuen Prüfmethoden sind für Mastixuntersuchungen gut einsetzbar und eignen sich gut zur Ansprache aller entscheidenden Materialeigenschaften (Tieftemperaturbeständigkeit, Steifigkeit, Ermüdungsbeständigkeit und Verformungsbeständigkeit) in den jeweils ausschlaggebenden Temperaturbereichen. Somit wird das DSR im Forschungsprojekt VEGAS in den drei unterschiedenen Bereichen der Gebrauchstemperatur eingesetzt.

2 VORGEHENSWEISE

Im Forschungsprojekt VEGAS sollen vereinfachte Performance-Prüfungen an Bitumen bzw. Mastix entwickelt werden als baupraktischer Ersatz für aufwändige Performance-Prüfungen an Asphalt. Dazu wird das DSR als einheitliches Prüfgerät für alle Temperaturbereiche eingesetzt (siehe oben). Es kommen unterschiedliche, zum Teil standardisierte aber auch neu entwickelte Prüfverfahren der VEGAS-Projektpartner zum Einsatz.

Zur Prüfung von Asphalt werden basierend auf der Normenserie EN 12697 Performance-Prüfungen zu den vier ausschlaggebenden Materialeigenschaften (Tieftemperaturbeständigkeit, Steifigkeit, Ermüdungsbeständigkeit und Verformungsbeständigkeit) durchgeführt. Diese umfassen zur Prüfung des Verformungswiderstands im Hochtemperaturbereich den Dynamischen Stempeleindringversuch (DSEV), die Triaxialprüfung (TCCT, triaxial cyclic compression test) und den Spurrinnentest. Zur Prüfung von Steifigkeit (im LVE-Bereich) bzw. des Ermüdungswiderstands werden eingesetzt die Zug-Druck-Wechsel-Prüfung (ZDW), der 4-Punkt-Biege-Versuch (4PB), der Spaltzug-Schwellversuch (SSV) und der Mobile Load Simulator (MLS). Der Widerstand gegen Rissbildung wird geprüft mittels Zugversuch bei

Kälte (TSRST, thermal stress restrained specimen test), Abkühlversuch (UTST, uniaxial thermal stress test) und der Semi-Circular-Bending-Test (SCB).

Zur Prüfung von Bitumen und Mastix werden fast ausschließlich Prüfungen am DSR eingesetzt. Begleitend werden im Tieftemperaturbereich der Fracture Toughness Test (FTT) und der Doppel-Torsion-Test (DTT) durchgeführt, um das Bruchverhalten zu studieren.

Eine Auflistung der entsprechenden Prüfungen zeigt Tabelle 1, zusammen mit den Hinweisen, welcher VEGAS-Projektpartner für die Durchführung der Einzelversuche verantwortlich ist.

Tabelle 1: Übersicht der ausgewählten Performance-Prüfungen an Bitumen bzw. Mastix und an Asphalt

Performance-Eigenschaft		Performance-Prüfungen an		
		Bitumen	**Mastix**	**Asphalt**
Temperatur ↓	**Verformungswiderstand (Kriechen)**	MSCRT im DSR[1] Kriechprüfung im DSR[1]	Kriechprüfung im DSR[1]	Dynamischer Stempeleindringversuch (DSEV)[1] Triaxialprüfung (TCCT)[2] Spurrinnentester[3]
	Steifigkeit	T-f-Sweep im DSR[1]	T-f-Sweep im DSR[1] T-Sweep DSR[2]	Zug-Druck-Wechsel-Prüfung (ZDW)[1] 4-Punkt-Biegung (4PB)[2] Spaltzug-Schwellversuch (SSV)[3]
	Ermüdungswiderstand	-	Beschleunigte Ermüdungsprüfung (AFT) im DSR[1] Ermüdungsprüfung an der Hyperboloid-Probe im DSR[2]	Zug-Druck-Wechsel-Prüfung (ZDW)[1] 4-Punkt-Biegung (4PB)[2] Spaltzug-Schwellversuch (SSV)[3] MMLS3[3]
	Widerstand gegen Kälterissbildung (Relaxation)	Fracture Toughness Test (FTT)[3]	Relaxationsprüfung im DSR[1] Fracture Toughness Test (FTT)[3] Doppel-Torsion-Test (DTT)[3]	Zugversuch (TSRST)[1] Abkühlversuch (UTST)[1] Semi-Circular-Bending-Test (SCB)[3]

[1]durchgeführt an der TU Braunschweig, [2]durchgeführt an der TU Wien, [3]durchgeführt an der Empa

Die aus diesen Prüfungen erhaltenen Ergebnisse an Asphalt werden mit den ermittelten Materialeigenschaften des jeweils korrespondierenden Bitumens bzw. der jeweils korrespondierenden Mastix korreliert. Anschließend erfolgt eine Modellierung der Ergebnisse mithilfe des Mehrskalenmodells (Lackner et al., 2004) und des 2S2P1D-Modells (Olard & Di Benedetto, 2003).

Ergänzend wird der Einfluss der inneren Asphaltstruktur (Kornverteilung, Kornorientierung, Kontaktpunkte/-flächen u. ä.) auf die Asphaltperformance über bildanalytische Charakterisierungen mithilfe von 2D Scans untersucht.

Auf Grundlage der Erkenntnisse erfolgt abschließend die Zusammenstellung und Beschreibung der vereinfachten Prüfsystematik, mit der die Asphaltperformance für baupraktische Fragestellungen mit ausreichender Genauigkeit angegeben werden kann.

3 VERWENDETE MATERIALIEN

3.1 Materialübersicht

Im Forschungsprojekt VEGAS kommen unterschiedliche Gesteinskörnungen, Füller und Bitumen (zur Herstellung von Mastix bzw. Asphalt) von unterschiedlichen Herstellern gemäß Tabelle 2 zum Einsatz.

Die Gesteinskörnungen repräsentieren landestypische Gesteine aus Deutschland, Österreich und der Schweiz, zu deren Eigenschaften bei den VEGAS-Projektpartnern ein langjähriger Erfahrungshintergrund vorliegt.

Die ausgewählten 10 Bitumen entsprechen marktüblichen Straßenbaubitumen und Polymermodifizierten Bitumen (PmB) für den Asphaltstraßenbau in den D-A-CH-Ländern und stammen von branchenbekannten Herstellern (Total, OMV, Shell,. Nynas).

Tabelle 2: Im Forschungsprojekt VEGAS eingesetzte Materialien

<table>
<tr><th>Produkt</th><th>Variante 1</th><th>Variante 2</th><th>Variante 3</th><th>Variante 4</th></tr>
<tr><td>grobe und feine Gesteinskörnungen</td><td>Gabbro (D)</td><td>Porphyr (A)</td><td>Silikat (CH)</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Füller</td><td>Kalkstein (D)</td><td>Kalkstein (A)</td><td>Kalkstein (CH)</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Bitumen 50/70</td><td rowspan="2">Hersteller A</td><td rowspan="2">Hersteller B</td><td rowspan="2">Hersteller C</td><td rowspan="2">Hersteller D</td></tr>
<tr><td>PmB 25/55-55 A</td></tr>
<tr><td>Bitumen 70/100</td><td>-</td><td rowspan="2">Hersteller B</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>PmB 45/80-65 A</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
</table>

Die Materialien werden für die Untersuchungen im Forschungsprojekt VEGAS zu 18 verschiedene Varianten gemäß Tabelle 3 kombiniert. Für jede Materialkombination wird eine Variantenbezeichnung aus 3 Zahlen festgelegt, nach folgendem Schema:

- Die erste Zahl entspricht der Bitumensorte:
  - 1 … für 50/70;
  - 2 … für 25/55-55;
  - 3 … für 70/100;
  - 4 … für 45/80-65.
- Die zweite Zahl benennt den Bitumenhersteller:
  - 1 … für Hersteller A;
  - 2 … für Hersteller B;
  - 3 … für Hersteller C;
  - 4 … für Hersteller D;
- Die dritte Zahl steht für die Landesherkunft des Gesteins:
  - 1 … für Deutschland;
  - 2 … für Österreich;
  - 3 … für die Schweiz.

Die Bezeichnung der 10 unterschiedlichen Bitumen erfolgt nach dem identischen Schema.

Tabelle 3: Im Forschungsprojekt VEGAS eingesetzte Materialvarianten

Material-variante	Bitumen			Gestein	Mastix-Bez.	Asphalt-Bez.
	Sorte	Hersteller	Bez.			
1	50/70	A	B11	**Gabbro** Fremdfüller: Kalkstein Provenienz Deutschland	M111	A111
2		B	B12		M121	A121
3		C	B13		M131	A131
4		D	B14		M141	A141
5	25/55-55	A	B21		M211	A211
6		B	B22		M221	A221
7		C	B23		M231	A231
8		D	B24		M241	A241
9	70/100	A	B32		M321	A321
10	45/80-65		B42		M421	A421
11	50/70		B12	**Porphyr** Fremdfüller: Kalkstein Provenienz Österreich	M122	A122
12	25/55-55		B22		M222	A222
13	70/100		B32		M322	A322
14	45/80-65		B42		M422	A422
15	50/70		B12	**Silikat** Fremdfüller: Kalkstein Provenienz Schweiz	M123	A123
16	25/55-55		B22		M223	A223
17	70/100		B32		M323	A323
18	45/80-65		B42		M423	A423

3.2 Gesteinskörnungen

Die Charakterisierung der Gesteinskörnungen erfolgt anhand von europäisch standardisierten Prüfungen. Für die einzelnen Fraktionen an Gabbro, Porphyr und Silikat werden die Rohdichte nach EN 1097-6 (2013) und Korngrößenverteilung nach EN 933-1 (2012) bestimmt. Für die Kalksteinfüller aus den drei D-A-CH Ländern werden die Rohdichte nach EN 1097-6 (2008) und die Korngrößenverteilung nach EN ISO 17892-4 (2016) bestimmt. In Tabelle 4 sind die Rohdichten der Gesteinsfraktionen angegeben.

Tabelle 4: Rohdichten der Gesteinsfraktionen

Provenienz: Deutschland		Provenienz: Österreich		Provenienz Schweiz	
Fraktion	**Rohdichte [g/cm³]**	**Fraktion**	**Rohdichte [g/cm³]**	**Fraktion**	**Rohdichte [g/cm³]**
Gabbro 8/11	2,819	Porphyr 8/11	2,883	Silikat 8/11	2,692
Gabbro 5/8	2,873	Porphyr 4/8	2,881	Silikat 4/8	2,694
Gabbro 2/5	2,868	Porphyr 2/4	2,879	Silikat 2/4	2,692
Gabbro 0/2	2,906	Porphyr 0/2	2,858	Silikat 0/2	2,672
Kalksteinfüller	2,750	Kalksteinfüller	2,726	Kalksteinfüller	2,766

Zusätzlich wurden für die aus der Fraktion 0/2 extrahierten Eigenfüller (<0,063) und für die Kalksteinfüller die jeweiligen spezifischen Oberflächen mit dem BET-Verfahren nach DIN ISO 9277 (2014) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst

Tabelle 5: Spezifische Oberfläche der Eigenfüller und Fremdfüller

Provenienz: Deutschland		Provenienz: Österreich		Provenienz Schweiz	
Fraktion	**Oberfläche [m²/g]**	**Fraktion**	**Oberfläche [m²/g]**	**Fraktion**	**Oberfläche [m²/g]**
Gabbro 0/2 (<0,063mm)	5,815	Porphyr 0/2 (<0,063mm)	3,402	Silikat 0/2 (<0,063mm)	3,216
Kalksteinfüller (<0,063mm)	7,131	Kalksteinfüller (<0,063mm)	1,388	Kalksteinfüller (<0,063mm)	1,986

3.3 Bitumen

Für die 10 verwendeten Bitumen werden jeweils der Erweichungspunkt (EWP) nach EN 1427 (2015) und die Nadeleindringtiefe (Nadelpenetration PEN) nach EN 1426 (2015) bestimmt. Außerdem wird das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) nach DIN 52050 (2018) am Frischbitumen durchgeführt. Zur Simulation der Kurzzeitalterung werden die Bitumen mittels Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) nach EN 12607-1 (2014) gealtert und die konventionellen Kennwerte erneut ermittelt. Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Ergebnisse von Erweichungspunkt, Nadelpenetration und BTSV

Bitumenvariante	Frisch				RTFOT-gealtert	
	EWP [°C]	PEN [1/10 mm]	T_{BTSV} [°C]	δ_{BTSV} [°]	EWP [°C]	PEN [1/10 mm]
B11	51,3	64	50,9	77,0	57,9	37
B12	48,8	64	49,3	81,4	54,3	40
B13	47,9	67	48,7	83,9	53,2	39
B14	49,7	56	51,6	81,3	54,9	37
B21	58,0	46	56,0	70,1	64,5	31
B22	79,8	43	59,0	58,9	76,8	34
B23	60,7	39	58,0	67,0	70,3	25
B24	58,5	40	55,5	72,9	61,2	35
B32	47,3	85	47,7	81,2	52,4	52
B42	87,0	58	55,3	58,4	78,2	42

Zur weiteren Charakterisierung wird der T-Sweep im DSR nach AL DSR-Prüfung (T-Sweep) (2014) sowohl am Frischbitumen als auch am RTFOT-gealterten Bitumen durchgeführt und die Temperaturkennwerte $T_{G^*/\sin\delta=1kPa}$ bzw. $T_{G^*/\sin\delta=2,2kPa}$ ermittelt. Zur Simulation der Langzeitalterung werden die zuvor RTFOT-gealterten Bitumen mittels Pressure Aging Vessel (PAV) nach EN 14769 (2012) gealtert und nach AL BBR-Prüfung (2017) im Biegebalkenrheometer (BBR) geprüft. Aus den Kennwerten, die in Tabelle 7 zusammengefasst sind, werden abschließend die Performance-Grades (PG) der Bitumen gemäß AAHSTO M320 (2017) abgeleitet

Tabelle 7: Ergebnisse von T-Sweep, BBR und PG Grade

Bitumenvariante	Frisch	RTFOT-gealtert	RTFOT+PAV-gealtert		PG-Grade
	T-Sweep	T-Sweep	BBR		
	$T_{G^*/\sin\delta=1kPa}$ [°C]	$T_{G^*/\sin\delta=2,2kPa}$ [°C]	$T_{S=300}$ [°C]	$T_{m=0,3}$ [°]	
B11	77,0	72,4	-17,1	-16,3	64-22
B12	81,4	67,8	-15,8	-13,8	70-22
B13	83,9	64,7	-12	-10,4	64-16
B14	81,3	69,6	-14,4	-16,2	64-22
B21	70,1	79,7	-16,2	-14,6	76-22
B22	58,9	85,8	-21,0	-13,3	82-16
B23	67,0	82,5	-15,2	-10,2	76-16
B24	72,9	76,2	-16,2	-16,2	76-22
B32	81,2	64,1	-17,8	-16,2	58-22
B42	58,4	81,8	-22,2	-17	82-22

3.4 Asphaltmischgutkonzeption

Auf Grundlage der Materialcharakterisierung werden für die drei unterschiedlichen Gesteinskörnungen aus den D-A-CH-Ländern jeweils eine Rezeptur für ein Asphaltmischgut

der Sorte AC 11 D S nach deutschem Regelwerk TL Asphalt-StB (2013) konzipiert. Es handelt sich dabei um ein Walzasphaltmischgut aus Asphaltbeton (AC, asphalt concrete) mit einem nominalen Größtkorndurchmesser von 11 mm, vorgesehen für Asphaltdeckschichten (D) unter höchster Verkehrsbeanspruchung (S).

Alle Rezepturen werden so optimiert, dass möglichst identische Sieblinien und Hohlraumgehalte resultieren. Angestrebt wird nach TL Asphalt-StB ein Hohlraumgehalt von 3,5 Vol.-%, der in der zulässigen Spannweite von 2,5 bis 3,5 Vol.-% nach TL Asphalt-StB liegt. Um den Aufwand bei der Herstellung vom Asphaltmischgut im Labor zu reduzieren, werden die Gabbro-Gesteinsfraktionen ungewaschen und ungesiebt verwendet, was eine Zugabe von 1 M.-% Fremdfüller (Kalksteinfüller) erfordert. Für die Rezepturen mit Porphyr und Silikat werden daher der enthaltene Eigenfüller der Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/11 auf einem 1,0 mm-Sieb ausgewaschen, um den Anteil von zugegebenem Fremdfüller (Kalksteinfüller) auf 8 bzw. 4 M.-% erhöhen zu können.

Tabelle 8: Gesteinsabhängige Mischgutrezeptur

Provenienz: Deutschland		**Provenienz: Österreich**		**Provenienz Schweiz**	
Fraktion	**Anteil [M.-%]**	**Fraktion**	**Anteil [M.-%]**	**Fraktion**	**Anteil [M.-%]**
Gabbro 8/11	20	Porphyr 8/11	18	Silikat 8/11	20
Gabbro 5/8	15	Porphyr 4/8	31	Silikat 4/8	30
Gabbro 2/5	26	Porphyr 2/4	8	Silikat 2/4	10
Gabbro 0/2	38	Porphyr 0/2	35	Silikat 0/2	36
Kalksteinfüller	1	Kalksteinfüller	8	Kalksteinfüller	4
Summe	100	Summe	100	Summe	100
Bindemittelgehalt	5,9	Bindemittelgehalt	5,9	Bindemittelgehalt	5,9

In Abbildung 2 sind die resultierenden Soll-Sieblinien der drei Rezepturen gegenübergestellt. In der Abbildung sind außerdem die Grenzen des entsprechenden deutschen Regelwerks TL Asphalt-StB (2013) für ein normgerechtes Asphaltmischgut der Sorte AC 11 D S eingetragen.

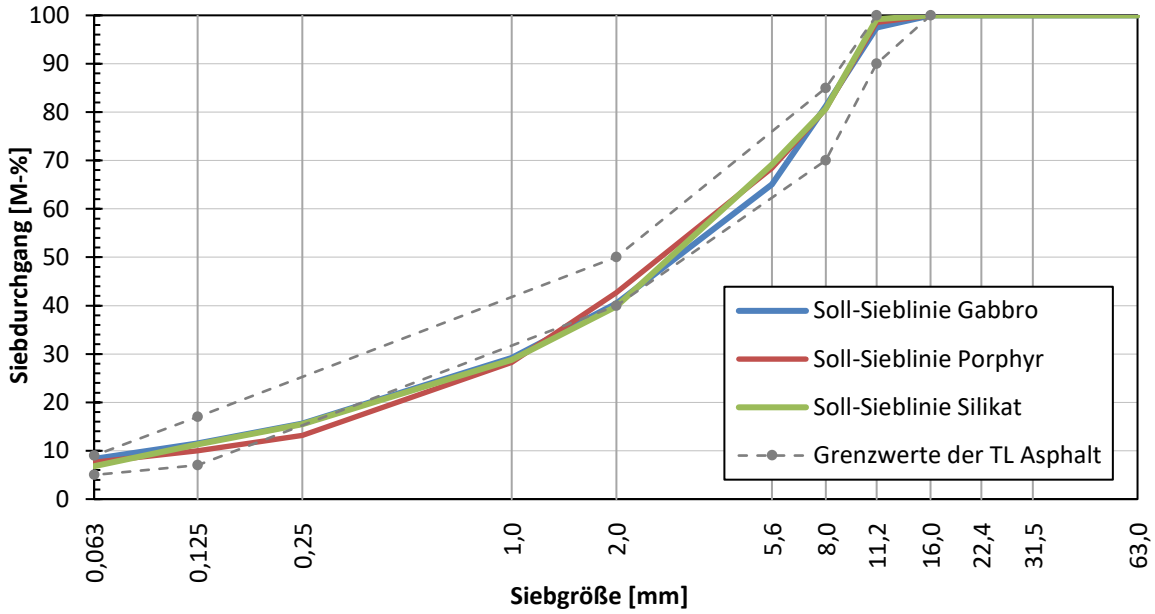


Abbildung 2. Korngrößenverteilungen der Asphaltmischgut-Rezepturen mit unterschiedlichen Gesteinen.

Um bei allen drei VEGAS-Projektpartnern einheitliche Bedingungen bei der Asphaltherstellung zu gewährleisten, wird gemäß EN 12697-35 (2016) eine einheitliche Mischtemperatur von 160°C festgelegt sowie gemäß TP Asphalt-StB, Teil 33 (2007) eine Verdichtungstemperatur von 135°C für die unmodifizierten Straßenbaubitumen der Sorten 50/70 und 70/100, sowie eine Verdichtungstemperatur von 145°C für die Polymermodifizierten Bitumen der Sorten 25/55-55 und 45/80-65.

3.5 Asphaltmastixkonzeption

Ausgehend von den Asphaltmischgutrezepturen wird der Anteil und die Zusammensetzung des Füllers (mineralische Anteile < 0,063mm) im Mischgut definiert. Der Füller setzt sich aus dem Eigenfüller aus den verschiedenen Fraktionen der Gesteinskörnung (Gabbro, Porphyr bzw. Silikat) sowie dem hinzugegebenen Fremdfüller aus Kalkstein zusammen. Im Zusammenhang mit dem einheitlichen Bindemittelgehalt von 5,9 M.-% ergeben sich dadurch spezifische Asphaltmastixkompositionen, welche in Tabelle 9 zusammengefasst sind.

Tabelle 9: Gesteinsabhängige Asphaltmastixkonzeption

Material	Provenienz: Deutschland	Provenienz: Österreich	Provenienz Schweiz
	Anteil [M.-%]	Anteil [M.-%]	Anteil [M.-%]
Eigenfüller (< 0,063mm)	51,34	12,25	35,82
Fremdfüller (<0,063 mm)	5,69	42,62	16,23
Bindemittel	42,97	45,13	47,95
Summe	100	100	100
Füller-Bitumen-Verhältnis	1,33	1,22	1,09

Auf Grundlage der spezifischen Zusammensetzung wird die Asphaltmastix aus den Einzelkomponenten für alle weiteren Untersuchungen im Labor zusammengemischt.
Die Herstellung der Asphaltmastix erfolgt dabei nach einem einheitlichen Vorgehen, bestehend aus 4 Einzelschritten:

1. Eigenfüller und Fremdfüller werden für mindestens 5 Minuten per Hand vermischt.
2. Das Füllergemisch wird auf die Mischtemperatur von 160°C für mindestens 3 Stunden temperiert.
3. Das Bitumen wird auf die Mischtemperatur von 160°C temperiert.
4. Füller und Bitumen werden nach und nach miteinander vermischt und für mindestens 6 Minuten bei der Mischtemperatur von 160°C händisch homogenisiert.

4 TEILBERICHT A: ERGEBNISBERICHT DER TU BRAUNSCHWEIG

4.1 Untersuchungsmethodik

Am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig werden die in Tabelle 1 genannten Prüfungen an Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt durchgeführt. Die Prüfungen können grundsätzlich in Prüfungen innerhalb und außerhalb des Bereichs linear-visko-elastischen Materialverhaltens (LVE-Bereichs) eingeteilt werden.

(a) Prüfung im LVE-Bereich

Bei der Prüfung im LVE-Bereich werden ausreichend kleine Beanspruchungen auf die Probe aufgebracht, sodass eine Zerstörung der Materialstruktur vermieden wird und physikalische/rheologische Parameter (E-Modul, Schermodul, Phasenwinkel, etc.) mit ausreichender Präzision ermittelt werden können. Zur Bestimmung dieser Parameter kommen für Bitumen, Mastix und Asphalt jeweils Temperatur-Frequenz-Sweeps („Steifigkeitsprüfungen“, Kapitel 4.1.2.1 und 4.1.3.1) zum Einsatz, mit denen die physikalischen Eigenschaften zielsicher über einen weiten Bereich an Temperaturen und Frequenzen bestimmt werden können. Aufgrund des linear-visko-elastischen Materialverhaltens im LVE-Bereich können die Messdaten anschließend zur Modellierung mit dem 2S2P1D-Modell verwendet werden, um Korrelationen zwischen Bitumen, Mastix und Asphalt (siehe Abbildung 1) im rheologischen Modell zu überprüfen und zu validieren.

(b) Prüfung außerhalb des LVE-Bereichs

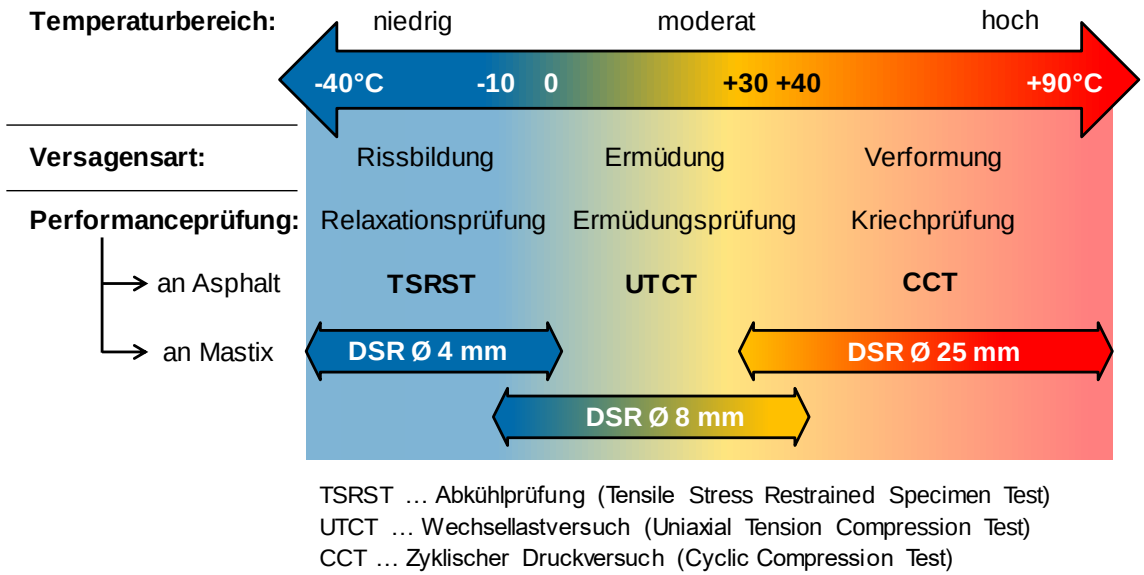
Für die Prüfung des Materialverhaltens außerhalb des LVE-Bereichs, wo nichtlineares, struktur-viskoses Verhalten und/oder Materialschädigung nicht ausgeschlossen werden kann, wird entweder eine deutlich größere Beanspruchung als im LVE-Bereich auf die Probe aufgebracht, oder eine ähnlich große Beanspruchung wie im LVE-Bereich, aber mit deutlich mehr Belastungszyklen, sodass mit Materialermüdung und einem Absinken des Materialmoduls zu rechnen ist. Die jeweiligen Bedingungen für Prüfungen außerhalb des LVE-Bereichs sind auf die relevanten Materialeigenschaften in den jeweiligen Bereichen der Gebrauchstemperatur abgestimmt (vgl. Abbildung 3).

Im unteren Bereich der Gebrauchstemperatur werden das Tieftemperaturverhalten und der Widerstand gegen kälteinduzierte Rissbildung in Form von Relaxationsprüfungen (Kapitel 4.1.2.1 und 4.1.3.2) untersucht. Je höher das Relaxationsvermögen einer Probe ist, desto nachgiebiger ist sie, um abkühlungsbedingte (kryogene) Spannungen umso rascher selbsttätig wieder abzubauen, und umso geringer ist die Gefahr einer Rissbildung.

Im Bereich der mittleren Gebrauchstemperatur wird das Dauerschwingverhalten der Probe in Form von Ermüdungsprüfungen (Kapitel 4.1.2.3 und 4.1.3.3) untersucht. Je mehr Lastwechsel die Probe ertragen kann, d. h. je länger der durch die Belastungswiederholungen bedingte Abfall des Materialmoduls auf ein unzulässiges Ausmaß hinausgeschoben ist, umso resistenter ist das Material gegenüber Dauerschwingbeanspruchung.

Im Bereich der oberen Gebrauchstemperaturen wird das Verformungsverhalten über zyklische Kriechprüfungen (Kapitel 4.1.2.4 und 4.1.3.4) angesprochen. Dabei dient die Kriechrate, das ist das Verhältnis der durchschnittlichen plastischen Verformung je Lastwechsel während der quasi-stationären Zunahme der Dehnung während der Kriechprüfung (Phase II der Kriechkurve), als maßgebender Kennwert für das Verformungsverhalten. Je höher die Kriechrate ist, umso geringer ist der Widerstand des Materials gegen plastische Verformung und Spurrinnenbildung.

Zur Prüfung der Materialeigenschaften in den jeweiligen Temperaturbereichen kommen unterschiedliche Prüfverfahren zur Anwendung. Alle Prüfungen von Bitumen- und Mastixproben erfolgen im DSR unter Verwendung unterschiedlicher Prüfgeometrien (Abbildung 3). Die unterschiedlichen Durchmesser der Prüfgeometrien sind aufgrund der temperaturabhängigen Materialeigenschaften und der Gerätegrenzen notwendig (Büchner et al., 2019).



TSRST … Abkühlprüfung (Tensile Stress Restrained Specimen Test)
UTCT … Wechsellastversuch (Uniaxial Tension Compression Test)
CCT … Zyklischer Druckversuch (Cyclic Compression Test)

Abbildung 3. Laborprüfungen zur Ansprache der Gebrauchseigenschaften von Asphalt und Mastix in unterschiedlichen Temperaturbereichen (Wistuba et al., 2019).

Die Asphaltprobekörper für die Abkühlversuche und die Ermüdungsprüfungen werden prismenförmig auch für die Untersuchung der inneren Asphaltstruktur mittels 2D-Scans verwendet (siehe Kapitel 4.1.4).

4.1.1 Anwendung von Äquimodultemperaturen

Üblicherweise sind für normgemäße Prüfungen an bitumenhaltigen Baustoffen Prüftemperaturen definiert. Weil aber das temperaturabhängige Verhalten von bitumenhaltigen Materialien von der temperaturabhängigen Viskosität des Bindemittels bestimmt wird, führt dies dazu, dass die für verschiedene Mischungsvarianten bei gleicher Prüftemperatur erhaltenen Prüfergebnisse nur bedingt zueinander bewertet werden können. Dies hat beispielsweise bei Verformungsprüfungen zur Folge, dass weichere Materialien immer schlechter bewertet werden als härtere. Aus diesem Grund wurde an der TU Braunschweig vor einigen Jahren das Konzept der Äquimodultemperatur eingeführt. Die temperaturabhängigen Kennwerte von verschiedenen Mischungsvarianten werden nicht bei gleichen Prüftemperaturen verglichen, sondern bei jener Temperatur, bei der beide Mischungsvarianten die gleiche Viskosität im betrachteten Temperaturbereich zeigen. Die Viskosität ist durch den Materialmodul definiert. Durch Anwendung der Äquimodultemperaturen können Materialien hinsichtlich ihres Gebrauchsverhaltens im jeweils betrachteten Temperaturbereich aussagekräftig miteinander verglichen werden, da der temperaturabhängige Einfluss der Steifigkeit „ausgeblendet“ ist.

Die Systematik von Äquimodultemperaturen wurde im Rahmen von Ermüdungsprüfungen im DSR bereits früher von Autoren verwendet (z. B. Clyne & Marasteanu, 2004; Johnson et al., 2009; Peebles & Mehta, 2013; Planche, 2004; Soenen & Eckmann, 2000). Die grundlegende Idee des Variantenvergleichs bei äquivalenter Temperatur spiegelt sich auch bei anderen bekannten Prüfverfahren wider, wie z. B. beim Erweichungspunkt Ring und Kugel ($T_{R\&B}$), beim Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (T_{BTSV}) oder bei Auswertungen von Prüfungen mit dem Biegebalkenrheometer ($T_{S=300MPa}$). Auch mit der Überarbeitung der EN 14023 („Spezifikation von Polymermodifizierten Bitumen“) werden Äquimodultemperaturen zur Materialcharakterisierung eingeführt.

Für die Prüfungen an den 10 unterschiedlichen Bitumen aus Tabelle 2 werden materialspezifische Äquimodultemperaturen festgelegt. Alle nachfolgenden Prüfungen mit dem entsprechenden Bitumen auf Bitumen-, Mastix- und Asphaltebene werden bei den so definier-

ten Äquimodultemperaturen durchgeführt. Somit sind die Bitumen im gleichen rheologischen Zustand und können hinsichtlich ihres Gebrauchsverhaltens miteinander verglichen werden.

Im Bereich der unteren Gebrauchstemperatur wird ein Schermodul von G* = 400 MPa als Referenz gewählt, wodurch als Prüftemperaturen die Äquimodultemperaturen in einem Bereich von -12,7 bis -21,3°C zu liegen kommen.

Im mittleren Bereich der Gebrauchstemperatur wurde – in Anlehnung an frühere Erkenntnisse an der TU Braunschweig, siehe Schrader (2016) – ein Schermodul von G* = 15 MPa (bei 10 Hz) als Referenz gewählt, weil in diesem Temperaturbereich eine reine Ansprache der Ermüdungseigenschaften gewährleistet ist.

Im oberen Temperaturbereich wird – in Anlehnung an frühere Erkenntnisse an der TU Braunschweig, siehe Alisov (2017)– ein Schermodul von G* = 15 kPa (bei 1,59 Hz) als äquivalente Referenz gewählt. Dieser Wert entspricht auch den Annahmen im Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) nach DIN 52050 (2018).

Die jeweiligen Äquimodultemperaturen werden anhand der T-f-Sweeps im Rahmen der Steifigkeitsprüfungen (siehe Kapitel 4.1.2.1) durch exponentielle Interpolation zwischen den zwei relevanten benachbarten Werten abgeleitet.

Tabelle 10: Materialabhängige Äquimodultemperaturen für die Performance-Prüfungen in den jeweiligen Temperaturbereichen (Variantenbezeichnung entsprechend Tabelle 3; G*…Schermodul)

Bitumenvariante	Kälteprüfungen	Ermüdungsprüfungen	Verformungsprüfungen
	$T_{G^*(Bitumen)=400MPa}$ (1,59 Hz)[°C]	$T_{G^*(Bitumen)=15MPa}$ (10 Hz) [°C]	$T_{G^*(Bitumen)=15kPa}$ (1,59 Hz) [°C]
B11	-17,2	14,2	50,9
B12	-18,1	14,7	49,3
B13	-12,7	17,6	48,7
B14	-13,7	16,8	51,6
B21	-17,5	15,8	56,0
B22	-21,3	15,4	59,0
B23	-15,4	18,0	58,0
B24	-15,3	16,8	55,5
B32	-16,4	14,5	47,7
B42	-20,1	14,5	55,3

4.1.2 Prüfungen an Bitumen und Asphaltmastix

Die Prüfungen an Bitumen und Asphaltmastix werden vollständig am DSR durchgeführt. Je nach Temperaturbereich und Prüfung werden geeignete Randbedingungen (Prüfgeometrie, Temperatur, Belastungsart, Belastungshöhe, etc.) gewählt. Zu den gewählten Randbedingungen liegt an der TU Braunschweig ein entsprechender Erfahrungshintergrund vor, sodass von einer ausreichenden Aussagekraft und Präzision der Prüfungen ausgegangen werden kann.

Insgesamt werden 10 unterschiedliche Bitumen gemäß Tabelle 2 und 18 unterschiedliche Mastixvarianten gemäß Tabelle 3 mit den nachfolgenden Prüfverfahren geprüft.

4.1.2.1 Steifigkeitsprüfungen an Bitumen und Asphaltmastix

Über Temperatur-Frequenz-Sweeps (T-f-Sweeps) im DSR wird die Steifigkeit über den gesamten Bereich der Gebrauchstemperaturen von -30°C bis 90°C ermittelt. Die Temperatur wird jeweils in Inkrementen von 10°C in den Temperaturbereichen erhöht. Die Prüffrequenz der Oszillationsbeanspruchung variiert zwischen 0,1 und 10 Hz. Aus zuvor durchgeführten Amplitudensweeps werden geeignete Belastungen innerhalb des LVE-Bereichs für jeden Temperaturbereich gewählt, sodass eine zerstörungsfreie Prüfung gewährleistet ist.

Für die Bitumenuntersuchungen kommt im Bereich von -30°C bis 0°C die 4 mm Platte-Platte-Geometrie (Plattenabstand 3,1 ± 0,15), im Bereich von -10°C bis 40°C die 8 mm Platte-Platte-Geometrie (Plattenabstand 2 mm) und im Bereich von 30°C bis 90°C die 25 mm Platte-Platte-Geometrie (Plattenabstand 1 mm) zur Anwendung.

Aufgrund der höheren Steifigkeit wird für die Asphaltmastix die 4 mm Platte-Platte-Geometrie von -30°C bis 20°C, die 8 mm Platte-Platte-Geometrie von 10°C bis 60°C und die 25 mm Platte-Platte-Geometrie von 50°C bis 90°C verwendet.

Die T-f-Sweeps werden für alle 10 Bitumenvarianten und alle 18 Asphaltmastixvarianten im gesamten Temperaturbereich mit zwei Wiederholungsprüfungen durchgeführt, was eine Anzahl von 168 Einzelprüfungen ergibt.

Die resultierenden rheologischen Kenngrößen (komplexer Schermodul, Speichermodul, Verlustmodul, Phasenwinkel) werden anschließend zur Erstellung von Black-Diagrammen, Cole-Cole-Diagrammen und Masterkurven verwendet.

Die Masterkurve wird mit den Verschiebungsfaktoren auf Grundlage der Williams, Landel und Ferry (WLF) Gleichung (Gl. 1) erstellt (Williams et al., 1955).

$$\log(a_T, T_{ref}) = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \qquad \text{Gl. 1}$$

Anschließend werden die Daten mithilfe des Christensen-Andersen-Marasteanu (CAM) Modells (Gl. 2 und Gl. 3) abgebildet (vgl. Kim, 2009; Little et al., 2018; Zeng et al., 2001).

$$G^* = G^*_0 \frac{G^*_\infty - G^*_0}{[1 + (f_c/f')^k]^{m_e/k}} \qquad \text{Gl. 2}$$

$$\delta = 90l - (90l - \delta_m)\left\{1 + \left[\frac{\log(f_d/f')}{R_d}\right]^2\right\}^{-m_d/2} \qquad \text{Gl. 3}$$

Weiterhin erfolgt eine Modellierung der Ergebnisse mit dem 2S2P1D (2 springs, 2 parabolic dashpots, 1dashpot) Modell (Gl. 4) nach Olard & Di Benedetto (2003).

$$G^*(i\,\omega\,\tau) = G_0 + \frac{G_\infty - G_0}{1 + \delta(i\,\omega\,\tau)^{-k} + (i\,\omega\,\tau)^{-h} + (i\,\omega\,\beta\,\tau)^{-1}} \qquad \text{Gl. 4}$$

Die Parameter des 2S2P1D-Modells können im Cole-Cole-Diagramm veranschaulicht werden (Abbildung 4). Mithilfe des 2S2P1lD-Modells können Korrelationen zwischen Bitumen, Mastix und Asphalt im LVE-Bereich identifiziert werden.

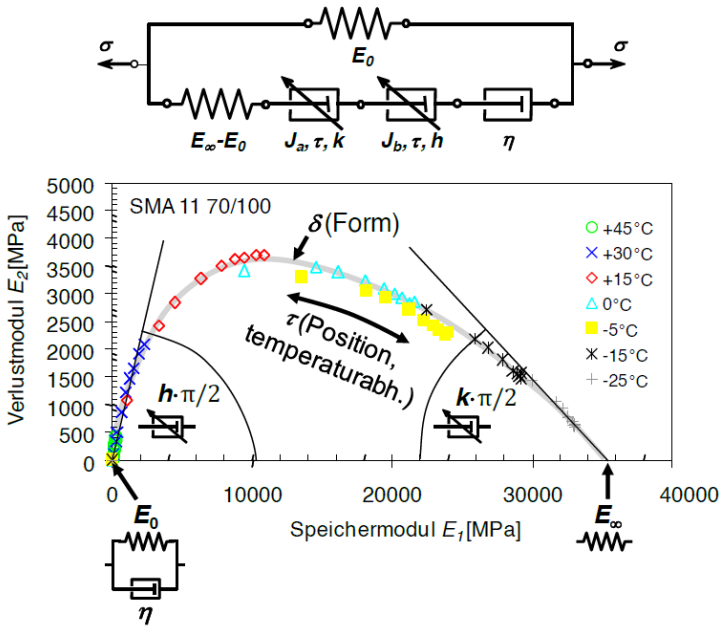


Abbildung 4. Bedeutung der Parameter des 2S2P1D-Models in der Cole-Cole-Darstellung (Wistuba, 2019).

4.1.2.2 Kälteprüfungen an Asphaltmastix

Im Bereich niedriger Gebrauchstemperaturen wird die parallele Plattengeometrie im DSR mit einem Durchmesser von 4 mm verwendet. Da zu dieser Geometrie bisher keine normierten Regelwerke existieren, wird ein an der TU Braunschweig entwickeltes Verfahren zum Probeneinbau verwendet (Büchner et al., 2019). Bei geeigneten Randbedingungen (Probenvorbereitung, Probeneinbau, Probenkonditionierung, Probenbeanspruchung) eignet sich die 4 mm Geometrie sowohl für Bitumen- als auch für Mastixuntersuchungen (Büchner et al., 2019).

Im Bereich niedriger Gebrauchstemperaturen ist der Widerstand gegen Kälterissbildung ein entscheidendes Kriterium für die Dauerhaftigkeit einer Asphaltbefestigung. Kälterisse entstehen aufgrund des thermischen Schrumpfens bei mangelhaftem Relaxationsvermögen. Gemäß Kapitel 4.1.1 erfolgt die Prüfung bei jener Temperatur, bei der das entsprechende Bitumen einen komplexen Schermodul von G* = 400 MPa aufweist. Während der Relaxationsprüfung wird eine konstante Scherdeformation auf die Bitumenprobe im DSR (Ø 4 mm, h = 3,1 ± 0,15 mm) aufgebracht. Dies kann gerätetechnisch nicht spontan erfolgen. Die Scherdeformation wird stattdessen innerhalb von 30 Sekunden linear auf 0,1% erhöht. Anschließend wird die Scherdeformation von 0,1% über eine Zeitdauer von 60 Minuten konstant gehalten und die Materialrelaxation als Abfall der Scherspannung aufgezeichnet.

In Abbildung 5 ist der Verlauf der Scherspannung und der Scherdeformation über den Verlauf der Relaxationsprüfung dargestellt. Alle Prüfungen an den 18 Asphaltmastixvarianten sind mit jeweils mindestens zwei Einzelergebnissen (insgesamt 36 Prüfungen) belegt.

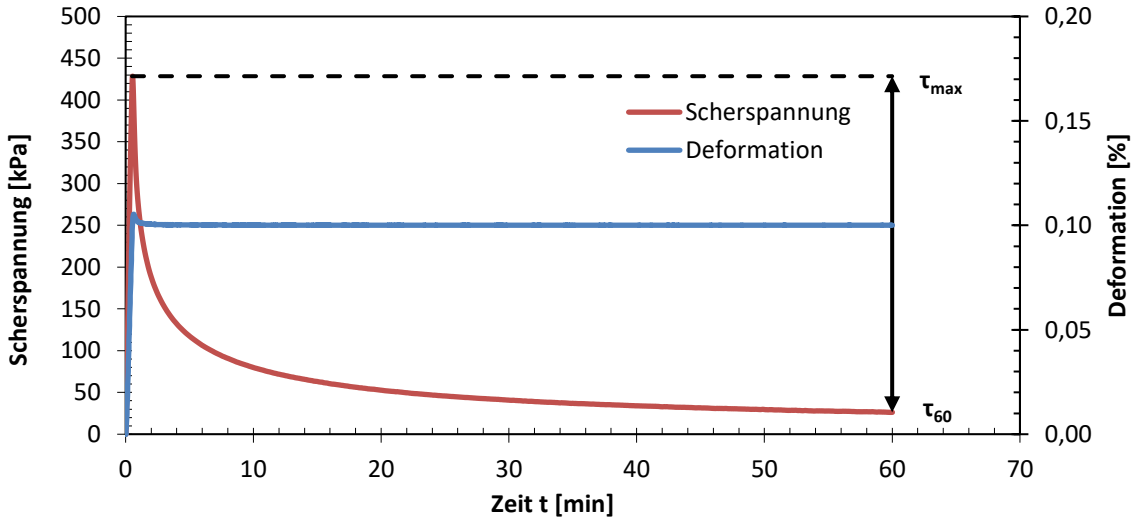


Abbildung 5. Beispielhafter Verlauf von Scherspannung τ und resultierender Scherdeformation während der Relaxationsprüfung von Asphaltmastix im DSR.

Zur Bestimmung der Relaxationsfähigkeit des Materials wird das Verhältnis der maximal erreichten Scherspannung während der Belastungsphase zur abgebauten (relaxierten) Scherspannung am Ende der Entlastungsphase (nach 60 Minuten Dauer) ermittelt (Gl. 5). Der so ermittelte Kennwert beschreibt die Scherspannungsrelaxation nach 60 Minuten und wird im Folgenden zur Charakterisierung des Kälteverhaltens der Asphaltmastix verwendet.

$$Scherspannungsrelaxation\ nach\ 60\ Minuten = \frac{\tau_{60}}{\tau_{max}} * 100 \qquad \textit{Gl. 5}$$

4.1.2.3 Ermüdungsprüfungen an Asphaltmastix

Die 18 Mastixvarianten werden im DSR in Ermüdungsprüfungen bei einer Äquimodultemperatur von $T_{G^*(Bitumen)=15MPa}$ (vgl. Kapitel 4.1.1) untersucht. Der Probendurchmesser beträgt 8 mm, die Probenhöhe 2 mm. Die Proben werden im Oszillationsmodus scherspannungsgesteuert mit einer Frequenz von 10 Hz bis zur Materialermüdung belastet.

Die Scherspannung wird stufenweise erhöht, weil im Fall einer konstanten Scherspannung die Prüfdauer sehr lange ist, und außerdem die Wiederholbarkeit des Versuchs üblicherweise gering ist. Eine stufenweise Erhöhung der Scherspannung führt zur beschleunigten Ermüdungsprüfung (accelerated fatigue test, AFT) nach Johnson (2010). In der Literatur ist die beschleunigte Ermüdungsprüfung aufgrund der Systematik auch unter dem Begriff Linear Amplitude Sweep (LAS) bekannt, und es existiert dazu eine AAHSTO Prüfnorm (AAHSTO TP 101-14, 2014).

Gemäß der beschleunigten Ermüdungsprüfung (AFT) wird die Scherspannung im Verlauf der Prüfung ausgehend von 150 kPa kontinuierlich alle 4.000 Lastwechsel um 50 kPa erhöht. Zusätzlich zur Prüfung bei einer Äquimodultemperatur von $T_{G^*(Bitumen)=15MPa}$ wird die beschleunigte Ermüdungsprüfung mit identischen Prüfparametern bei den Prüftemperaturen 10°C und 20°C durchgeführt, was je nach Material in Prüfdauern zwischen 1 und 2 Stunden resultiert. Wegen der mindestens 3-fachen Wiederholung je Variante ergeben sich insgesamt mindestens 180 Einzelprüfungen.

In Abbildung 6 ist beispielhaft der Verlauf des komplexen Schermoduls während einer beschleunigten Ermüdungsprüfung dargestellt. Der stufenweise Anstieg der Beanspruchung ist auch im intervallartig abnehmenden Schermodul deutlich zu erkennen.

Die Auswertung der Prüfergebnisse erfolgt mit dem Ermüdungskriterium nach Rowe, wobei zunächst die Energy Ratio berechnet wird (Rowe & Bouldin, 2000). Unter Anwendung einer polynomischen Regressionsfunktion 6. Grades für die Energy Ratio kann der Lastzyklus ermittelt werden, bei der die Energy Ratio ihr Maximum erreicht hat (siehe Abbildung 6).

Diese Lastwechselzahl stellt einen charakteristischen Kennwert für die Bewertung des Ermüdungsverhaltens der Asphaltmastix dar.

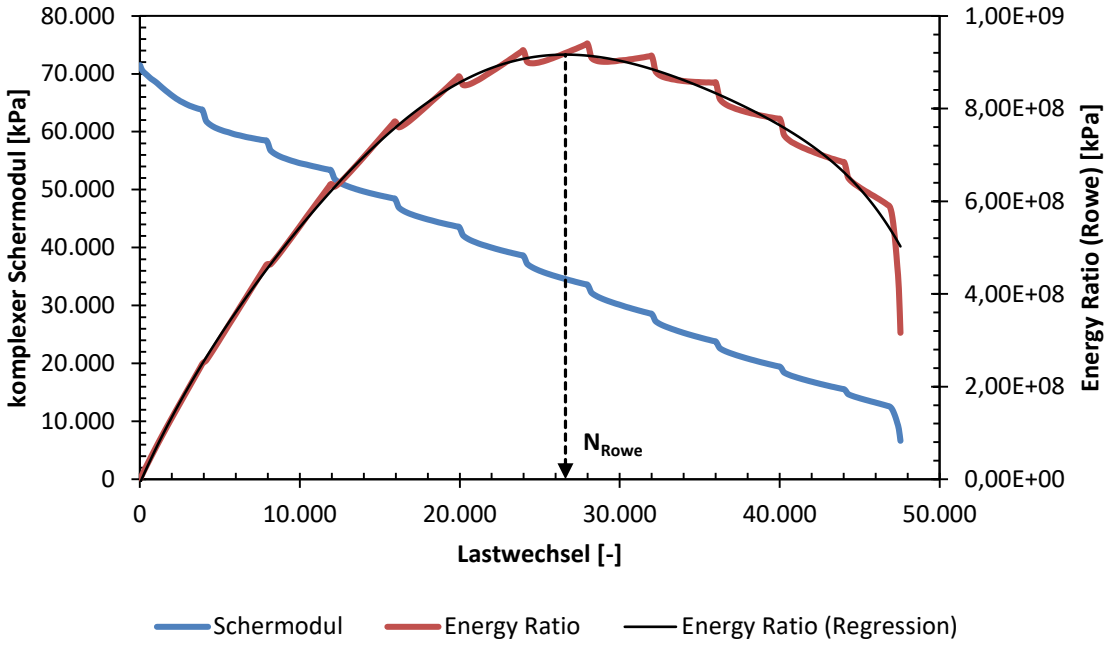


Abbildung 6. Beispielhafter Verlauf des komplexen Schermoduls während einer beschleunigten Ermüdungsprüfung und Auswertung anhand der Energy Ratio nach Rowe.

4.1.2.4 Verformungsprüfungen an Bitumen und Asphaltmastix

Zur Ermittlung der Verformungseigenschaften der 10 Bitumen wird der Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCRT) im DSR mit einer Prüfgeometrie mit einem Durchmesser von 25 mm gemäß EN 16659 (2015) angewendet. Die Bitumenprobe wird hierbei für 1 Sekunde mit einer konstanten Scherspannung von 0,1 kPa be- und anschließend in einer lastfreien Kriecherholungsphase für 9 Sekunden entlastet. Dieser Zyklus wird für eine vollständige Messung zehnfach wiederholt. In jedem Einzelzyklus wird das Verhältnis der visko-elastischen Scherdehnung zur maximalen Scherdehnung (Rückformung) sowie die Nachgiebigkeit als Verhältnis der bleibenden Scherdehnung zur angelegten Scherspannung ermittelt (Abbildung 7). Als Ergebnis des MSCRT werden die Rückformung und die Nachgiebigkeit angegeben.

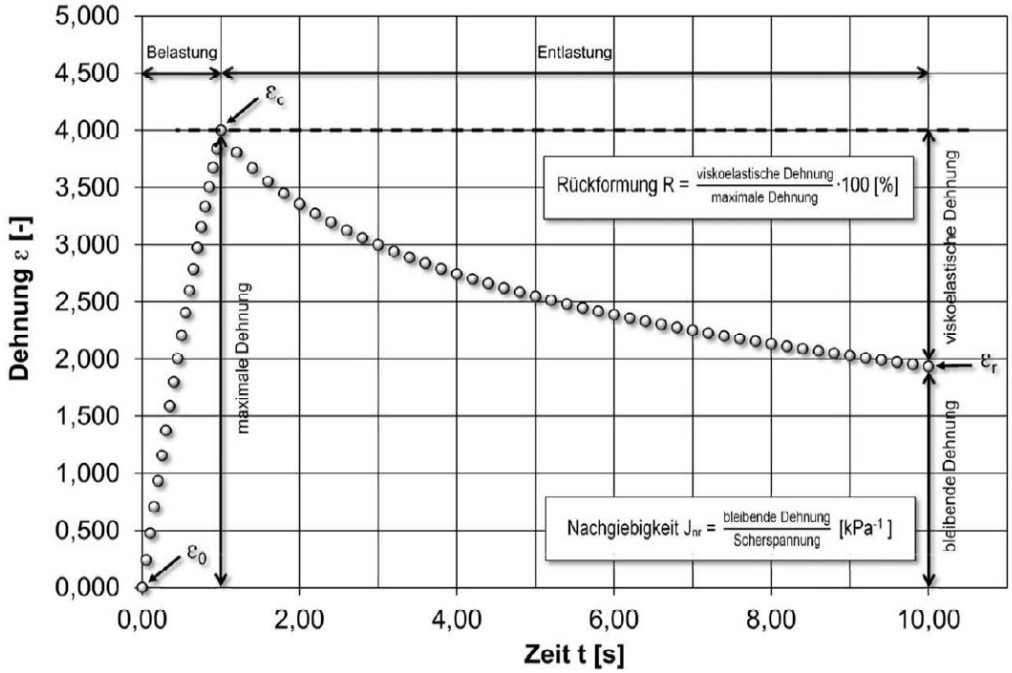


Abbildung 7. Beispiel für das Kriecherholungsverhalten während eines Prüfzyklus (AL DSR-Prüfung (MSCRT), 2016).

Auf Grundlage des MSCRT wurde eine Prüfsystematik zur Untersuchung des Langzeitkriechverhaltens entwickelt, welche sowohl für unmodifizierte und modifizierte Bitumen als auch für Asphaltmastix anwendbar ist. Dafür wird identisch zum MSCRT die 25 mm Platte-Platte Geometrie mit einem Plattenabstand von 1 mm gewählt. Als Prüftemperatur wird eine Äquimodultemperatur von $T_{G^*=15kPa}$ verwendet (vgl. Kapitel 4.1.1).

Das grundsätzliche Belastungsprinzip mit einer Kriechphase und einer anschließenden Erholungsphase bleibt unverändert. Jedoch wir nur noch ein einzelner Belastungszyklus verwendet und die Dauer der einzelnen Phasen erhöht, was im Wesentlichen dem Single-Stress-Creep-Recovery-Test (SSCRT) nach (Santagata et al., 2014) entspricht.

Die Bitumen werden in der Kriechphase 60 Sekunden lang mit einer Scherspannung von 0,1 kPa im Kriechmodus des DSR beansprucht, bevor eine Erholungsphase von 14 Minuten folgt.

Für die Prüfung von Asphaltmastix wird eine identische Scherspannung von 0,1 kPa bei einer Belastungszeit von 5 Stunden und einer Erholungsphase von 5 Stunden gewählt. Durch die Verlängerung der einzelnen Phasen kann ein stationärer Materialzustand (kon-

stantes Fließen) in der Kriechphase sowie die nahezu vollständig Rückformung in der Entlastungsphase erfolgen. In Abbildung 8 ist beispielhaft der Verlauf der Deformation während der Kriecherholungsprüfungen von Bitumen und Mastix im DSR dargestellt.

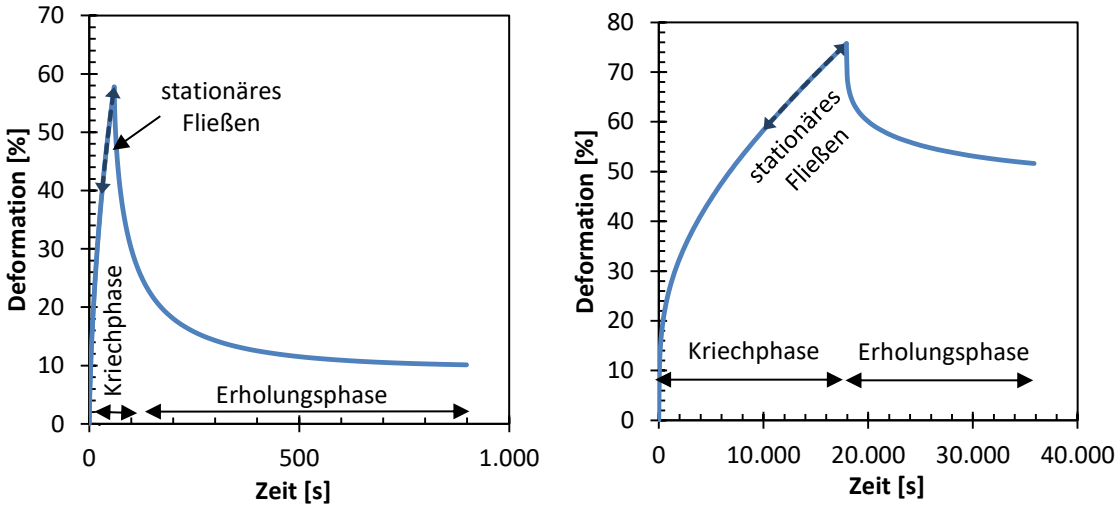


Abbildung 8. Beispielhafter Verlauf der Deformation während Kriech- und Erholungsprüfungen von Bitumen (links) und Mastix (rechts) im DSR.

Im Bereich des stationären Fließens gilt die charakteristische Kriechrate als aussagekräftiger Kennwert für das Verformungsverhalten. Die Kriechrate wird nach Santagata et al. (2014) als Creep Compliance Rate (CCR) nach Gl. 6 berechnet und ist eine zeitunabhängige rheologische Materialeigenschaft, die physikalisch den Fließwiderstand des Materials charakterisiert.

$$\text{Creep Compliance Rate (CCR)} = \frac{\mathrm{d}\left(\frac{\gamma}{\tau_0}\right)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}t} \qquad \textit{Gl. 6}$$

Die neue Prüfsystematik (SSCRT) wird an allen 10 Bitumen- und allen 18 vorhandenen Mastixvarianten mit jeweils zwei Einzelprüfungen durchgeführt, was zu einer Gesamtanzahl von 56 Einzelprüfungen führt.

4.1.3 Prüfungen am Asphalt

Die 18 unterschiedlichen Asphaltmischgutvarianten (gemäß Kapitel 3.4) werden in ausreichender Menge im Labor mit Hilfe eines Labormischers hergestellt, dessen Mischwerkzeug jenem an einer Asphaltmischanlage ähnelt. Anschließend werden aus dem Asphaltmischgut mithilfe eines Walzsektor-Verdichtungsgerätes, das den Verdichtungsvorgang durch eine Walzenbandage simuliert, Asphaltplatten hergestellt, aus denen nach dem Auskühlen

und nach 2-wöchiger Lagerung bei konstanter Raumtemperatur zylindrische und prismenförmige Asphaltprobekörper geschnitten bzw. gebohrt werden. Die so entstandenen Asphaltprobekörper werden mit den nachfolgenden Prüfmethoden hinsichtlich ihres Gebrauchsverhaltens untersucht.

4.1.3.1 Steifigkeitsprüfungen am Asphalt

Die Steifigkeit von prismenförmigen, stabförmigen Asphaltprobekörpern mit quadratischem Querschnitt und mit den Abmessungen 50 x 50 x 160 mm wird mithilfe eines Frequenz-Sweeps im Zug-Druck-Wechsel-Versuch, welcher den Ermüdungsprüfungen (Kapitel 4.1.3.3) vorgeschaltet ist, ermittelt. Die Frequenz-Sweeps werden bei vier unterschiedlichen Prüftemperaturen (20, 10, 0 und -10°C) durchgeführt und die Probekörper bei jeder Prüftemperatur mit den Frequenzen 0,1; 0,3; 1; 3; 5 und 10 Hz beansprucht. Als weggeregelte Beanspruchung innerhalb des LVE-Bereichs wird eine Dehnung von 50 µm/m gewählt. Die Frequenz-Sweeps sind für alle 18 Asphaltvarianten dreifach belegt, was in einer Anzahl an 54 Einzelprüfungen resultiert.

Identisch zu dem Vorgehen auf Bitumen- und Mastixebene (Kapitel 4.1.2.1), werden die resultierenden physikalischen Kenngrößen (E-Modul, Speichermodul, Verlustmodul, Phasenwinkel) zur Erstellung von Black-Diagrammen, Cole-Cole-Diagrammen und Masterkurven verwendet. Weiterhin erfolgt die Modellierung der Ergebnisse mit dem CAM-Modell und dem 2S2P1D-Modell (siehe oben).

4.1.3.2 Kälteprüfungen am Asphalt

An prismenförmigen, stabförmigen Probekörpern mit quadratischem Querschnitt und mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm werden Zug- und Abkühlversuche gemäß EN 12697 (2012) durchgeführt.

Beim direkten Zugversuch (UTST) wird der Probekörper bei konstant gehaltener Temperatur (+20, +5, -10 und -25°C) mit einer zeitabhängigen Zugdehnung beansprucht. Das Ergebnis ist die Zugfestigkeit und die Ausfalldehnung beim Bruch des Probekörpers.

Beim Abkühlversuch (TSRST) wird die Länge des Probekörpers konstant gehalten, während die Temperatur mit der Zeit abgesenkt wird. Aufgrund des verhinderten thermischen Schrumpfens bauen sich Probekörper zunehmend kryogene Zugspannungen auf. Als Ergebnis des Abkühlversuchs erhält man die Ausfallspannung und die Ausfalltemperatur zum Zeitpunkt des Bruchs. Als Kennwert für das Relaxationsverhalten (und zur späteren Untersuchung möglicher Korrelationen) wird die kryogene Zugspannung aus dem Abkühlversuch

ermittelt, die zur Äquimodultemperatur $T_{G^*(Bitumen)=400MPa}$ korrespondiert (siehe rote Pfeile in Abbildung 9).

Über die temperaturabhängige kryogene Zugspannung und die Zugfestigkeit aus dem Zugversuch kann außerdem die Zugfestigkeitsreserve berechnet werden (vgl. Abbildung 9).

Für die 18 Asphaltvarianten liegen die Versuchsergebnisse aus insgesamt 54 Abkühlprüfungen und insgesamt 216 Zugversuchen vor.

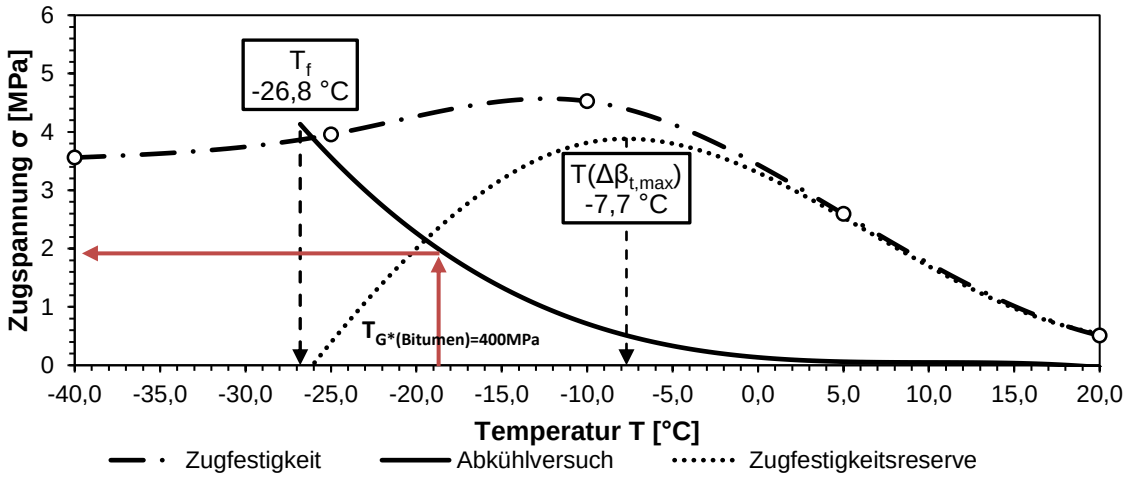


Abbildung 9. Beispielhafte Ergebnisse des Zug- und Abkühlversuchs.

4.1.3.3 Ermüdungsprüfungen am Asphalt

Zur Überprüfung der Ermüdungseigenschaften werden die 18 Asphaltvarianten mit einer Zug-Druck-Wechselprüfung nach Isailović & Wistuba (2018) überprüft. Die Zug-Druck-Wechselprüfung erfolgt an prismenförmigen, stabförmigen Probekörpern mit quadratischem Querschnitt und mit den Abmessungen 50 x 50 x 160 mm. Die Prüfung erfolgt kraftgeregelt unter stufenweiser Erhöhung der Spannungsamplitude, ausgehend von 0,35 MPa und alle 2.000 Lastwechsel um 0,15 MPa erhöhend. Als Frequenz werden 10 Hz und als Prüftemperaturen 20, 10, 0 und -10°C gewählt. Zusätzlich wird die Äquimodultemperatur $T_{G^*(Bitumen)=15MPa}$ (vgl. Kapitel 4.1.1) untersucht, was bei jeweils dreifacher Versuchsbelegung zu einer Gesamtanzahl von 270 Einzelprüfungen führt.

In Abbildung 10 ist beispielhaft der Verlauf des E-Moduls während der Ermüdungsprüfung dargestellt, sowie die Auswertung mit der Energy Ratio nach Rowe & Bouldin (2000). Aufgrund des stufenweisen Anstiegs der Belastungsamplitude sind teilweise kleine Ausreißer von dem Verlauf der Parameter zu erkennen. Deshalb wird zu Ermittlung des Maximums

der Energy Ratio eine Polynomregression 6. Ordnung verwendet. Die Anzahl der Lastwechsel beim Maximum der Energy Ratio werden zur Bewertung des Ermüdungswiderstands verwendet.

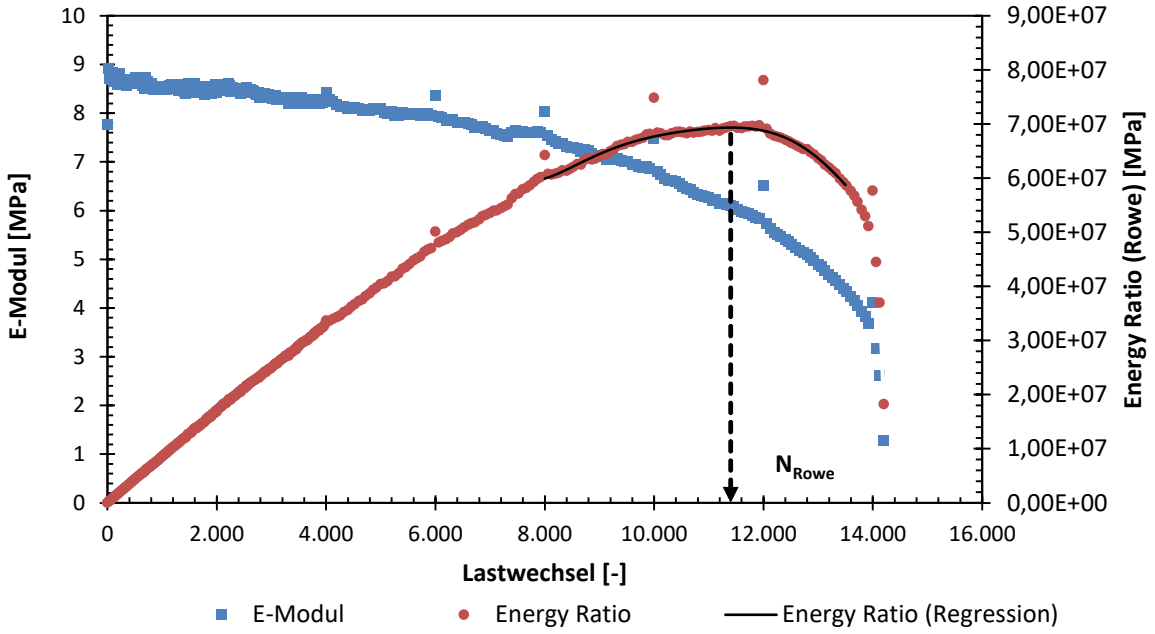


Abbildung 10. Beispielhafter Verlauf von Schermodul und Energy Ratio während der Ermüdungsprüfung im Zug-Druck-Wechselversuch.

4.1.3.4 Verformungsprüfungen am Asphalt

Zur Überprüfung der Verformungseigenschaften werden die 18 Asphaltvarianten mit dem modifizierten Stempeleindringversuch mit Stützring nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 geprüft. Beim Stempeleindringversuch werden zylindrische, gedrungene Probekörper mit einem Durchmesser von Ø 200 mm und einer Probenhöhe von 40 mm mit einem Stempel impulsförmig spannungsgeregelt belastet. Die Oberspannung beträgt 0,8 MPa, die Unterspannung 0,02 MPa. Die Dauer der Belastung beträgt 0,2 Sekunden, die Lastpause zwischen zwei halbsinusförmigen Impulsen beträgt 1,5 Sekunden. Als Prüftemperatur wird die Äquimodultemperatur $T_{G^*(Bitumen)=15kPa}$ (vgl. Kapitel 4.1.1) gewählt. In Abbildung 11 ist beispielhaft der Verlauf der Druckdehnung als Ergebnis der Impulsbelastung dargestellt.

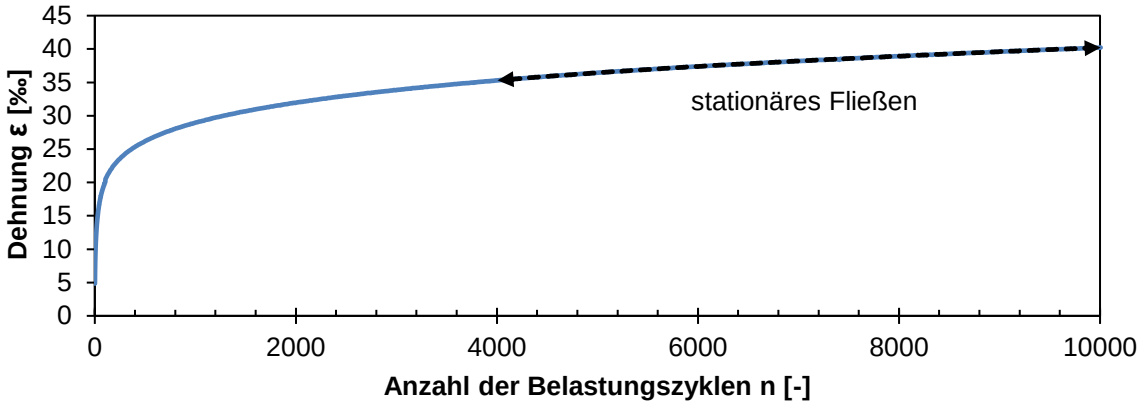


Abbildung 11. Beispielhafter Verlauf der Kriechkurve infolge der Akkumulation von plastischen Druckdehnungen während des Stempeleindringversuchs.

Ähnlich wie bei den Verformungsprüfungen des Bitumens und der Asphaltmastix stellt sich zum Ende der Kriechphase ein zeitunabhängiges quasi-stationäres Fließen ein. In diesem Bereich wird die mittlere Kriechrate als materialspezifischer Kennwert für das Verformungsverhalten ermittelt.

4.1.4 Untersuchung der inneren Asphaltstruktur

Im Zusammenhang mit den Asphaltuntersuchungen an 7 unterschiedlichen Asphaltvarianten (Zug- und Abkühlversuche sowie Zug-Druck-Wechselprüfungen) werden 289 prismenförmige Probekörper mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm zur zusätzlichen Untersuchung der inneren Asphaltstruktur herangezogen.

Von jedem Prisma wird jeweils eine Querschnittsfläche im Flachbettscanner eingescannt. Die digitalisierten Aufnahmen werden nun mittels Filterungen bearbeitet (Abbildung 12) und algorithmisch mit der Software iPas^2 nach Coenen (2011) ausgewertet. Als Ergebnis erhält man die Anzahl und Länge der Kontakte der Gesteinskörner, die Kontaktorientierung und die Vektormagnitude, sowie die Segregation, welche die Verteilung der unterschiedlichen Korngrößen im Querschnitt beschreibt (Grönniger, 2018).

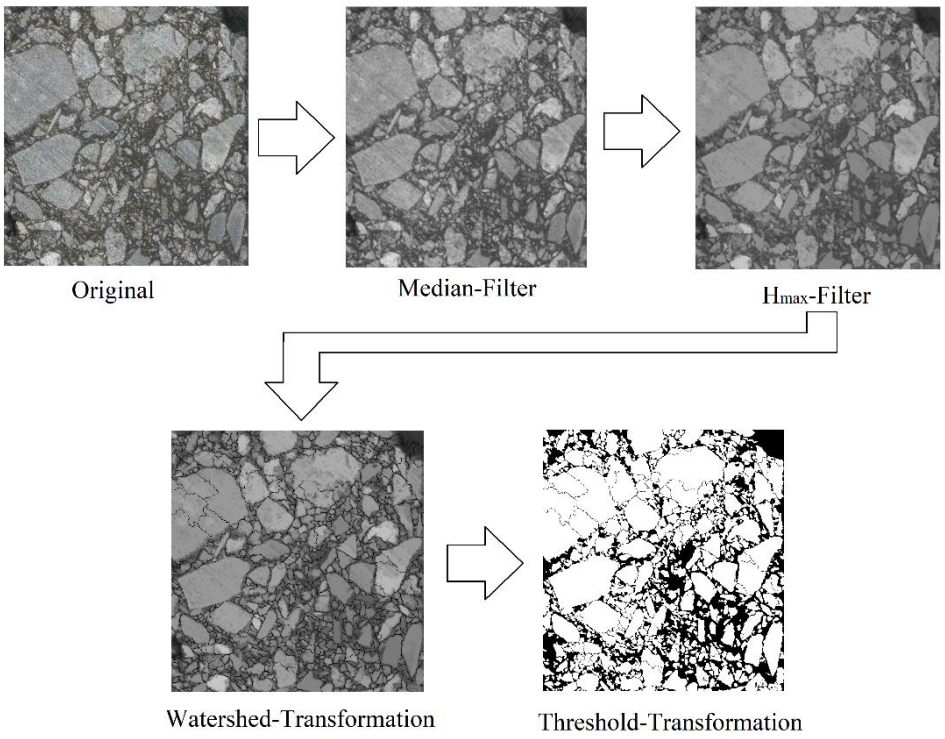


Abbildung 12. Filter für die Bildverarbeitung zur Ermittlung der inneren Asphaltstruktur (Weißflog, 2019).

Die unterschiedlichen Strukturparameter werden anschließend hinsichtlich des möglichen Einflusses der inneren Struktur eines Asphaltprobekörpers auf die Ergebnisse von Performance-Prüfungen ausgewertet. Dazu werden den Strukturparametern die Messwerte aus den Performance-Prüfungen an den der einzelnen Probekörpern gegenübergestellt und eventuelle Abhängigkeiten festgestellt.

4.2 Untersuchungsergebnisse

Zunächst sind die Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen im LVE-Bereich dargestellt, anschließend die Ergebnisse aus den Performance-Prüfungen außerhalb des LVE-Bereichs, getrennt nach Bitumen und Mastix sowie Asphalt. Abschließend sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur inneren Asphaltstruktur vorgestellt.

4.2.1 Steifigkeitsuntersuchungen an Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt

Als Ergebnis der T-f-Sweeps im DSR (Kapitel 4.1.2.1) erhält man die beiden rheologischen Kenngrößen komplexer Schermodul G* und zugehöriger Phasenwinkel δ über einen weiten

Temperatur- und Frequenzbereich, welche das gesamte Materialverhalten im LVE-Bereich charakterisieren. In Abbildung 13 sind beispielhaft die Ergebnisse für die Bitumenprobe B11 dargestellt. Analog zeigen sich die Ergebnisse für die Asphaltmastixvarianten. Für die Asphaltvarianten werden aus der Zug-Druck-Wechsel-Prüfung (Kapitel 4.1.3.1) mittels Frequenz-Sweep der komplexe E-Modul E* und der zugehörige Phasenwinkel δ in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz bestimmt.

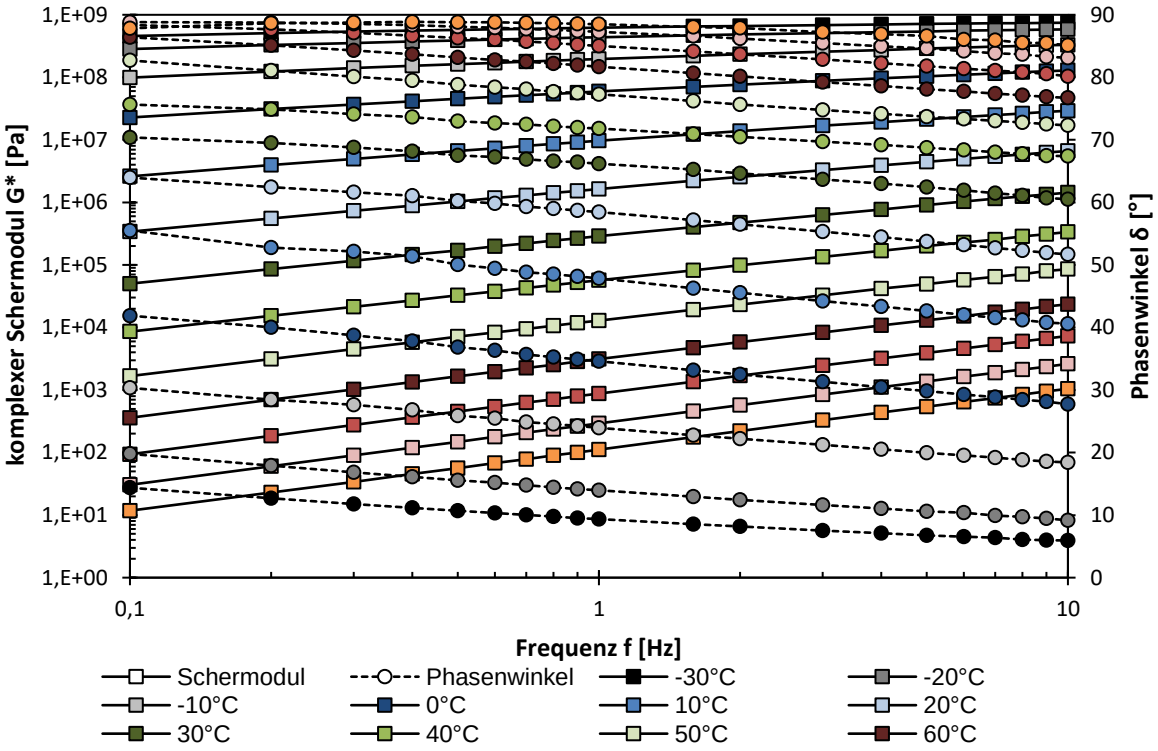


Abbildung 13. Beispiel für die Ergebnisse aus dem T-f-Sweep im DSR für die Bitumenvariante B11 (Straßenbaubitumen 50/70).

Zur übersichtlicheren Darstellung können wegen der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz (siehe Wistuba, 2019) die Ergebnisse mithilfe von Verschiebungsfaktoren, die mit der WLF-Gleichung bestimmt werden, ausgehend von der Referenztemperatur 20°C auf der x-Achse horizontal verschoben werden. Abbildung 14 zeigt die verschobenen Werte für den komplexen Schermodul G* und zugehörigen Phasenwinkel δ für das Bitumen B11 in Abhängigkeit von der reduzierten Frequenz. Der jeweilige Kurvenverlauf kann nun für alle Temperaturen und Frequenzen mit einer einzigen Materialfunktion – der Masterkurve – abgebildet werden. Die CAM-Modell-Regression gemäß Gl. 2 und Gl. 3 ist in Abbildung 14 ergänzt.

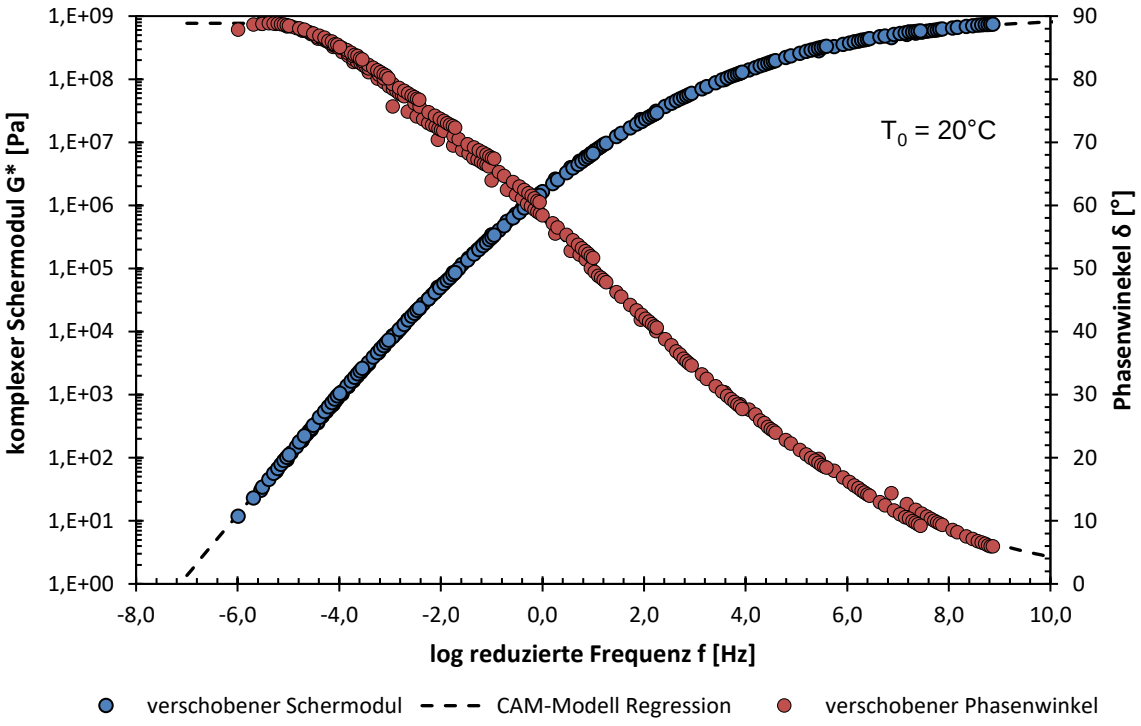


Abbildung 14. Beispiel für eine Masterkurve: Bitumenvariante B11 (Straßenbaubitumen 50/70) und CAM-Modell Regression.

Für jedes geprüfte Material (10 Bitumenvarianten, 18 Asphaltmastixvarianten und 18 Asphaltvarianten) werden die Parameter der WLF-Gleichung bestimmt, sowie die Materialparameter des CAM-Modells durch Regression ermittelt. Aus den resultierenden Parametern, welche in Tabelle 11 zusammengefasst sind, wird so für jedes Material die Masterkurve erstellt.

Zur besseren Vergleichbarkeit kann das Materialverhalten im Cole-Cole-Diagramm als auch im Black-Diagramm (siehe unten) mit dem 2S2P1D-Modell abgebildet werden. Die Modellfunktionen sind in Abbildung 15 und Abbildung 16 hinterlegt.

Tabelle 11: Parameter der WLF-Gleichung und des CAM-Modells für alle Bitumen-, Mastix und Asphaltvarianten gemäß Gl. 1, Gl. 2 und Gl. 3.

Variante	G^*_0	G^*_∞	f_c	k	m_e	δ_m	f_d	R_d	m_d	c_1	c_2
B11	0,00E+00	1,00E+09	62,063	0,174	1,000	88,85	1,01E-06	580,3	7987,8	20,8	182,1
B12	0,00E+00	1,00E+09	56,449	0,187	1,000	89,45	5,22E-06	605,4	11125,2	19,1	160,3
B13	0,00E+00	1,00E+09	18,497	0,195	1,000	89,40	9,15E-06	436,4	7248,3	27,8	223,7
B14	0,00E+00	1,00E+09	90,440	0,204	1,000	88,57	1,50E-05	608,2	11355,7	20,5	174,6
B21	0,00E+00	1,00E+09	16,082	0,149	1,000	81,55	5,25E-07	470,0	4646,6	26,0	204,3
B22	0,00E+00	2,00E+09	0,463	0,099	1,000	64,23	6,90E-07	775,9	9898,5	20,6	174,2
B23	0,00E+00	1,50E+09	0,823	0,121	1,000	69,89	2,39E-06	695,6	11654,8	26,3	216,4
B24	0,00E+00	1,00E+09	22,438	0,166	1,000	85,54	3,52E-07	371,2	2918,2	18,5	161,8
B32	0,00E+00	1,00E+09	105,095	0,188	1,000	89,56	8,71E-06	388,3	4487,9	25,8	211,1
B42	0,00E+00	3,00E+09	0,416	0,090	1,000	58,61	1,66E-04	578,3	7153,9	19,0	162,9
M111	0,00E+00	4,29E+09	9,059	0,154	1,040	87,53	1,76E-06	796,6	18003,2	27,6	229,5
M121	1,10E+00	3,63E+09	4,208	0,164	1,073	89,73	1,34E-06	707,0	14922,9	17,7	134,2
M131	2,86E+00	3,77E+09	4,470	0,176	1,070	88,59	7,86E-06	737,1	19642,6	42,0	301,9
M141	1,00E+00	3,84E+09	17,314	0,188	1,023	87,52	9,74E-06	765,2	19547,4	8,2	80,9
M211	1,00E+00	4,10E+09	244,469	0,146	0,712	57,61	2,15E-03	7,7	3,4	-	-
M221	1,42E+00	6,03E+09	18,575	0,115	0,797	57,38	2,21E-03	7,8	3,3	-	-
M231	1,20E-01	3,86E+09	11,438	0,148	0,829	62,09	2,13E-03	5,0	2,4	24,0	162,5
M241	2,00E-01	2,92E+09	27,643	0,183	0,888	63,64	5,85E-02	4,0	2,4	23,9	175,5
M321	1,15E+00	4,59E+09	15,772	0,158	1,081	88,95	7,19E-06	68,4	137,3	16,9	141,2
M421	2,18E+02	3,67E+09	2073,702	0,178	0,666	57,62	2,29E-04	604,1	10172,1	32,2	216,7
M122	3,39E-01	3,65E+09	9,470	0,162	1,074	88,97	3,93E-06	706,4	14637,9	57,2	346,2
M222	1,00E+00	4,22E+09	257,620	0,141	0,711	61,99	7,60E-06	1522,1	50313,8	6,7	68,7
M322	5,90E-01	4,36E+09	15,976	0,159	1,076	88,42	7,62E-06	725,3	15745,9	30,2	195,1
M422	1,32E+02	3,04E+09	2047,438	0,183	0,666	58,48	4,01E-04	818,5	20377,2	7,7	73,9
M123	3,74E-01	3,31E+09	8,520	0,161	1,086	87,52	9,74E-06	765,2	19547,4	10,9	88,5
M223	1,00E+00	2,84E+09	471,560	0,152	0,689	59,55	1,99E-04	797,5	19547,4	16,4	133,0
M323	7,19E-01	3,57E+09	17,347	0,157	1,094	88,94	6,54E-06	818,2	18824,7	22,6	115,3
M423	1,17E+02	2,48E+09	1796,803	0,173	0,668	58,28	3,23E-04	166,8	805,4	3,9	46,8
A111	2,08E+02	2,51E+10	0,320	0,195	0,764	39,21	1,80E-01	2,7	2,2	5,5	56,3
A121	1,01E+02	3,35E+10	1,809	0,218	0,642	42,06	1,06E-01	3,1	2,6	20,8	182,1
A131	2,00E+02	3,73E+10	0,001	0,180	1,329	40,92	6,14E-02	2,3	2,0	19,1	160,3
A141	1,00E+01	4,44E+10	0,000	0,163	1,680	44,67	1,85E-01	2,1	1,8	27,8	223,7
A211	2,30E+02	3,04E+10	0,002	0,175	1,220	41,17	1,40E-02	5,4	4,5	20,5	174,6
A221	2,00E+02	2,67E+10	0,002	0,128	0,796	30,58	7,22E-02	3,3	1,9	26,0	204,3
A231	1,30E+02	3,74E+10	0,001	0,147	0,954	32,72	6,48E-02	3,0	2,0	20,6	174,2
A241	2,21E+02	3,58E+10	0,205	0,206	0,811	41,28	1,11E-01	2,6	2,2	26,3	216,4
A321	2,40E+02	2,39E+10	12,382	0,226	0,574	43,005	2,79E-01	3,0	2,5	18,5	161,8
A421	2,00E+02	3,19E+10	0,001	0,123	0,906	32,329	1,80E-01	3,6	2,2	25,8	211,1
A122	3,00E+02	3,09E+10	0,001	0,169	1,503	43,896	9,68E-02	3,9	3,0	19,0	162,9
A222	2,00E+02	3,28E+10	0,001	0,128	0,887	32,413	6,97E-02	3,6	2,2	27,6	229,5
A322	3,49E+02	2,81E+10	1,520	0,198	0,716	44,035	1,00E-01	4,5	3,5	17,7	134,2
A422	1,00E+02	3,68E+10	0,001	0,119	0,919	34,161	1,05E-01	3,3	1,9	42,0	301,9
A123	1,06E+02	2,43E+10	10,370	0,250	0,579	43,539	2,17E-01	2,6	2,5	8,2	80,9
A223	1,20E+02	6,63E+10	0,002	0,076	0,489	30,342	1,51E-01	4,0	1,7	-	-
A323	1,80E+02	3,87E+10	0,001	0,157	1,574	47,618	4,74E-01	1,7	1,5	-	-
A423	3,25E+02	7,07E+10	0,001	0,104	0,879	35,058	3,76E-01	1,8	1,1	24,0	162,5

Eine weitere Möglichkeit zur zusammenfassenden Darstellung der Prüfergebnisse sind Black-Diagramme und Cole-Cole Diagramme.

Abbildung 15 zeigt beispielhaft das Cole-Cole-Diagramm für die Bitumenvarianten B11 und B22, während in Abbildung 16 das Black-Diagramm für beide Varianten dargestellt ist. Das Cole-Cole-Diagramm ist auf den Bereich tiefer Prüftemperatur fokussiert und zeigt schön den Punkt des Glasübergangs, den Maximalwert des Verlustmoduls. Im Bereich tiefer Prüftemperaturen verhalten sich die beiden Bitumen B11 und B22 rheologisch nahezu identisch.

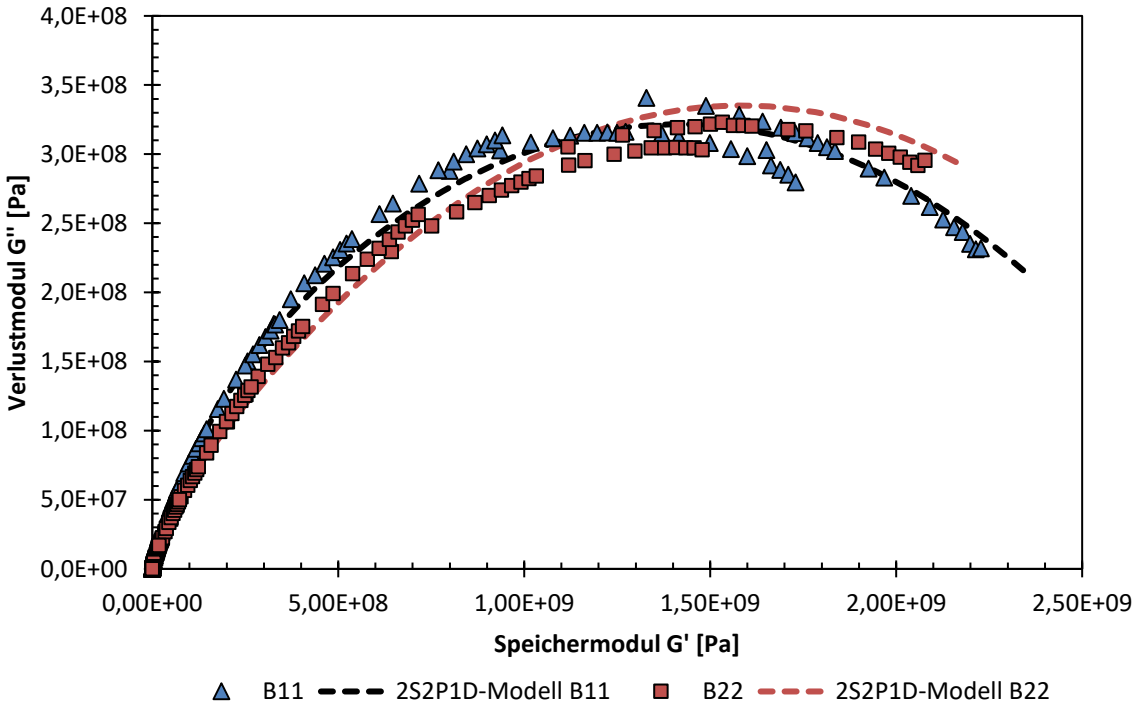


Abbildung 15. Beispiel für ein Cole-Cole-Diagramm: Bitumenvarianten B11 (Straßenbaubitumen 50/70) und B22 (PmB 25/55-55) sowie 2S2P1D-Modell-Regressionen.

Das Black-Diagramm (Abbildung 16) zeigt das rheologische Materialverhalten im oberen Temperaturbereich. Es offenbart deutlich das unterschiedliche Materialverhalten des Straßenbaubitumens B11 und des Polymermodifizierten Bitumens B22.

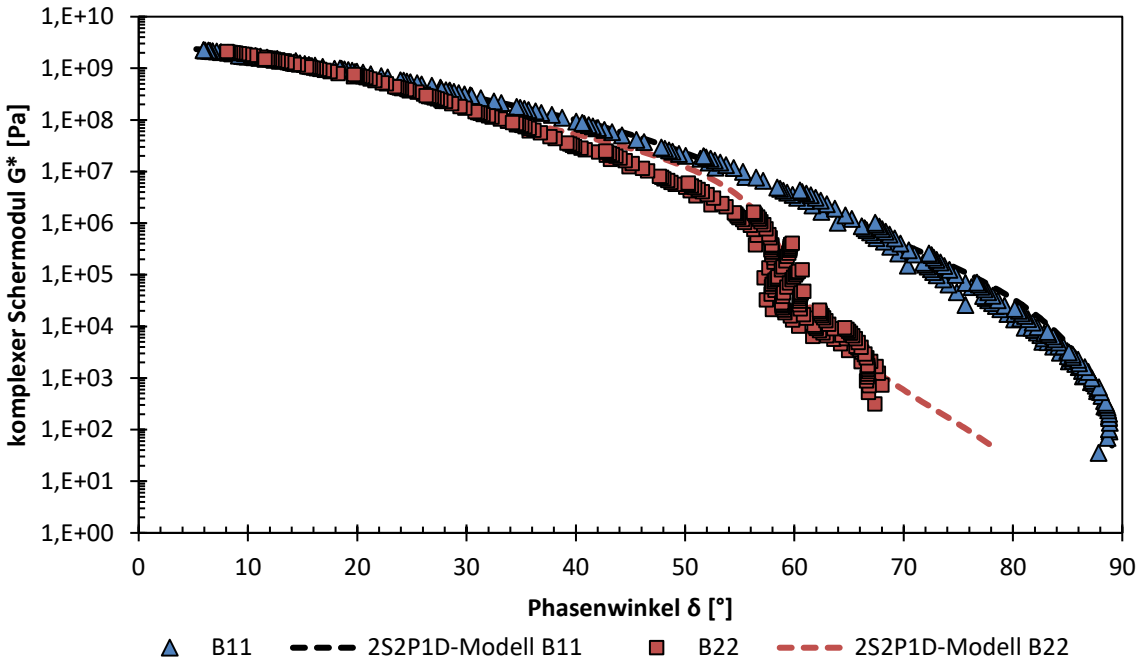


Abbildung 16. Beispiel für ein Black-Diagramm: Bitumenvarianten B11 (Straßenbaubitumen 50/70) und B22 (PmB 25/55-55) sowie 2S2P1D-Modell-Regressionen.

Die Modellparameter des 2S2P1D-Modells können für alle 10 Bitumenvarianten, 18 Asphaltmastixvarianten und 18 Asphaltvarianten ermittelt werden und sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: 2S2P1D-Modell-Parameter für alle Bitumen-, Asphaltmastix und Asphaltvarianten gemäß Gl. 4

Variante	τ	δ	k	h	β
B11	6,91E-06	4,28	0,26	0,62	235
M111	2,27E-05				300
A111	1,14E-02				32
B12	6,75E-06	3,40	0,25	0,57	251
M121	2,51E-05				251
A121	2,14E-02				15
B12	7,10E-06	3,49	0,21	0,56	244
M122	1,08E-05				274
A122	1,87E-03				17
B12	7,10E-06	3,20	0,26	0,56	251
M123	1,07E-05				247
A123	8,59E-03				76
B13	1,98E-05	2,61	0,21	0,53	232
M131	2,51E-05				276
A131	4,20E-02				10
B14	5,84E-06	3,16	0,26	0,55	228
M141	9,73E-06				463
A141	2,22E-02				54
B21	6,91E-06	3,91	0,23	0,57	625
M211	2,27E-05				1524
A211	1,14E-02				152
B22	4,02E-06	8,44	0,26	0,66	4900
M221	8,97E-05				59585
A221	2,03E-01				3
B22	4,02E-06	8,44	0,26	0,66	4900
M222	9,39E-05				53815
A222	7,65E-02				21
B22	1,72E-05	10,92	0,27	0,61	4900
M223	3,38E-05				4500
A223	9,39E-02				22
B23	3,39E-05	5,89	0,25	0,55	1212
M231	5,36E-05				1929
A231	8,09E-02				32
B24	2,83E-05	7,84	0,24	0,55	250
M241	5,88E-04				100
A241	2,03E-02				32
B32	3,78E-06	3,48	0,26	0,56	235
M321	5,48E-06				250
A321	8,29E-03				30
B32	3,78E-06	2,68	0,25	0,54	235
M322	3,12E-06				300
A322	2,89E-03				250
B32	3,78E-06	2,76	0,21	0,56	235
M323	4,13E-06				296
A323	2,89E-03				207
B42	1,50E-06	5,72	0,22	0,60	235
M421	9,02E-06				33457
A421	1,89E-02				33116
B42	6,96E-06	6,81	0,27	0,59	236
M422	8,72E-06				29409
A422	2,13E-02				824
B42	2,70E-06	6,69	0,24	0,59	131913
M423	8,83E-06				33457
A423	2,17E-02				33116

4.2.2 Performance-Prüfungen an Bitumen und Asphaltmastix

(a) Kälteprüfungen

Die Ergebnisse der in Kapitel 3.1.1.1 beschriebenen Relaxationsprüfungen zur Charakterisierung des Tieftemperaturverhaltens der Asphaltmastix liegen für alle 18 Asphaltmastixvarianten vor.

Abbildung 17 zeigt die im DSR ermittelte Spannungsrelaxation nach 60 Minuten. Je nach Asphaltmastixvariante variiert die Spannungsrelaxation zwischen ca. 82 und 92 %. Die geringe Spannweite der Einzelergebnisse zeigt die hohe Wiederholbarkeit der Relaxationsprüfung und bestätigt die Aussagekraft der Ergebnisse. Anhand der Spannungsrelaxation können die unterschiedlichen Materialvarianten hinsichtlich ihres Tieftemperaturverhaltens bewertet werden, wobei eine hohe Spannungsrelaxation als vorteilhaft gilt.

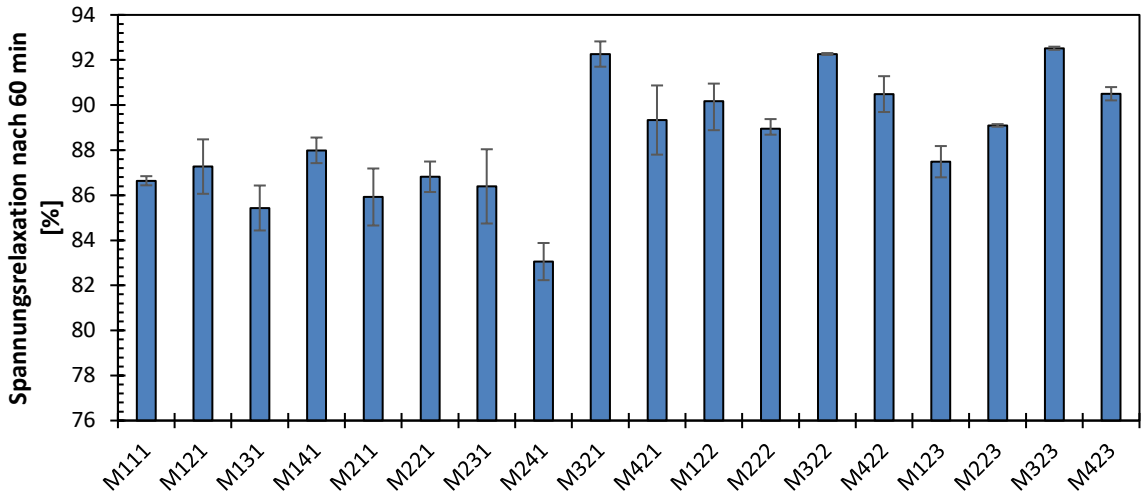


Abbildung 17. Ergebnisse der Relaxationsprüfungen an den Asphaltmastixvarianten im DSR mit der 4 mm Platte-Platte-Geometrie bei $T_{G^* = 15\ kPa}$. (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

(b) Ermüdungsprüfungen

Als Ergebnis der Ermüdungsprüfungen liegt mit dem jeweiligen Parameter N_{ROWE} die Anzahl an Lastwechseln bis zur Materialermüdung vor. Die entsprechende Kenngröße ist der Mittelwert aus jeweils mindestens 3 Einzelprüfungen. Die für alle Asphaltmastixvarianten bestimmten Mittelwerte mit ihren Standardabweichungen sind in Abbildung 18 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen eine Temperaturabhängigkeit: Mit zunehmender Prüftemperatur sinkt der Ermüdungswiderstand. Dies ist auf die in der Ermüdungsprüfung mit der Temperatur zunehmende Dehnung zurückzuführen.

Die Ergebnisse für die Asphaltmastixvarianten unterscheiden sich deutlich voneinander. Auch innerhalb einer Bitumensorte (vgl. z. B. M211, M221, M231 und M241) sind deutliche

Unterschiede zwischen den verschiedenen Herstellern erkennbar. Die Spannweiten der Einzelergebnisse sind akzeptabel, wodurch eine Differenzierung der unterschiedlichen Materialien möglich ist. Einmal mehr wird hier deutlich, dass die heute geltende Bindemittelklassifikation mittels Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel zu unpräzise ist, um Bindemittel rheologisch ausreichend genau zu differenzieren.

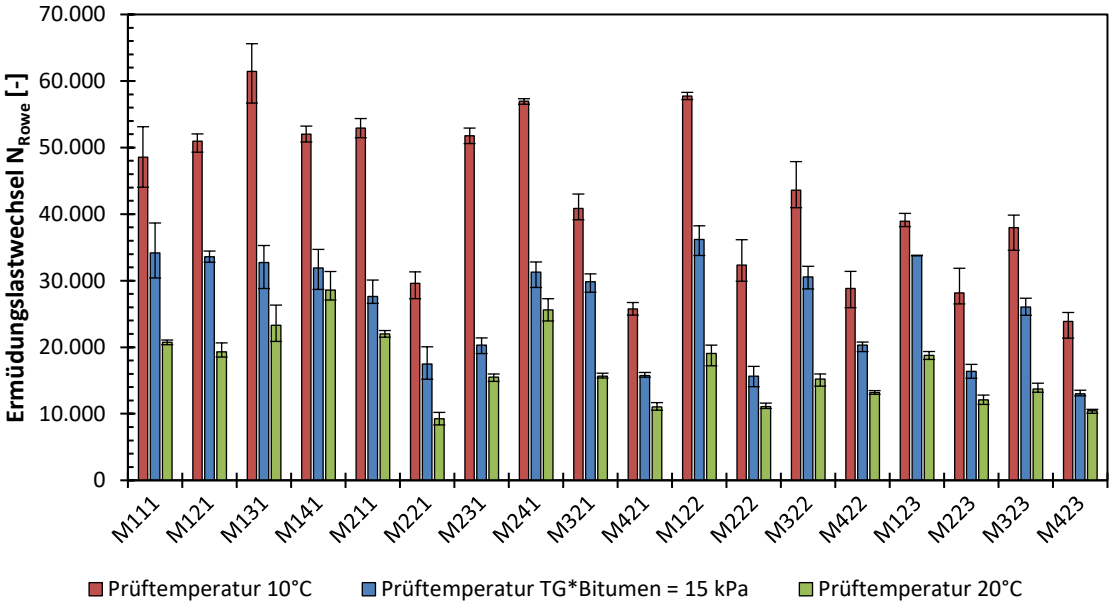


Abbildung 18. Ergebnisse der beschleunigten Ermüdungsprüfungen (AFT) an den Asphaltmastixvarianten: Ermüdungslastwechsel N_{ROWE} (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

(c) Verformungsprüfungen

Aus den Ergebnissen der Kriechprüfungen (SSCR-Tests) an den Bitumenvarianten wird die jeweilige Kriechrate (CCR, Creep Compliance Rate) als Kennwert für den Verformungswiderstand abgeleitet. Die Kriechraten für alle Bitumenvarianten sind in Abbildung 19 dargestellt.

Die Kriechraten charakterisieren das Fließverhalten der Bitumen und ermöglichen eine deutliche Differenzierung der Bitumenarten und -sorten. Während die Straßenbaubitumen generell eine hohe Kriechrate aufweisen, zeigen die untersuchten Polymermodifizierten Bitumen deutlich geringere Kriechraten und damit einen höheren Fließwiderstand. Je höher modifiziert ein Bitumen ist, umso kleiner ist seine Kriechrate und damit auch der Widerstand gegen plastische Verformung.

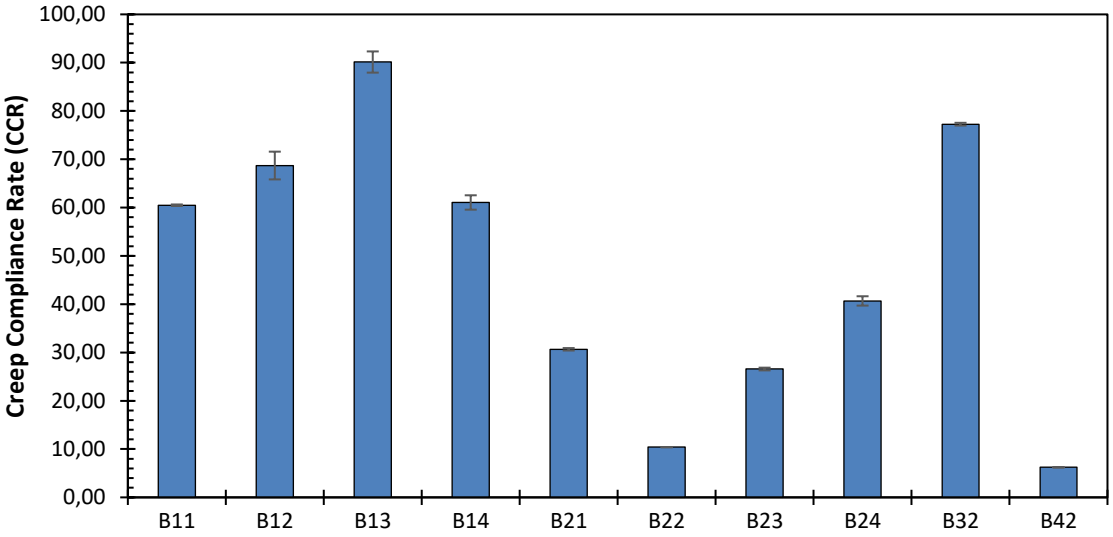


Abbildung 19. Ergebnisse der Kriechprüfungen (SSCR-Tests) an den Bitumenvarianten: Kriechraten (CCR, Creep Compliance Rate) bei $T_{G^* = 15\,kPa}$ (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

Abbildung 20 veranschaulicht die Ergebnisse der Kriechversuche an den 18 Asphaltmastixvarianten, dargestellt in logarithmischer Skalierung. Wie auch beim Bitumen ist eine deutliche Differenzierung der unterschiedlichen Asphaltmastixvarianten erkennbar, insbesondere im Fließverhalten der Asphaltmastixvarianten mit weichen Straßenbaubitumen (z. B. M321 mit Straßenbaubitumen 70/100) und jener mit hoch modifzierten Bitumen (z. B. M421 mit PmB 45/80-65). Die Variation des Füllers bei gleichbleibenden Bitumen führt zu ähnlichen Ergebnissen.

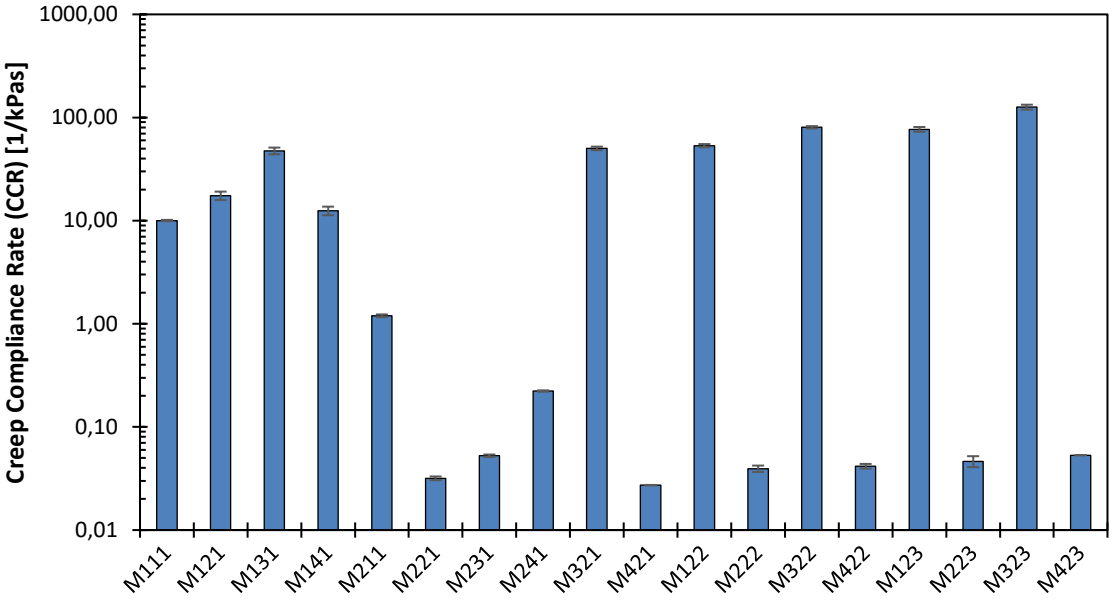


Abbildung 20. Ergebnisse der Kriechprüfungen (SSCR-Tests) an den Asphaltmastixvarianten: Kriechraten (CCR, Creep Compliance Rate) [1/kPas] bei $T_{G^* = 15\ kPa}$ (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

4.2.3 Performance-Prüfungen an Asphaltprobekörpern

(a) Kälteprüfungen

Im Tieftemperaturbereich liegen die Ergebnisse aus Zug- und Abkühlversuchen (siehe Kapitel 4.1.3.2) vor, repräsentiert durch die Kennwerte Bruchtemperatur und zugehörige Bruchspannung sowie den Verlauf der kryogenen Zugspannung aus dem Abkühlversuch sowie Zugfestigkeit mit zugehöriger Bruchdehnung aus dem Zugversuch.

Im Weiteren wird aus dem Abkühlversuch die jeweilige kryogene Zugspannung bei der Äquimodultemperatur von $T_{G^*(Bitumen) = 400\ MPa}$ (vgl. Kapitel 4.1.1) als Kennwert zur Charakterisierung des Tieftemperaturverhaltens herangezogen. Dieser Kennwert beschreibt den Asphalt hinsichtlich seines Relaxationsvermögens (siehe Kapitel 4.1). Die für alle 18 Asphaltvarianten ausgewerteten Spannungswerte sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Asphaltvarianten zeigen deutlich unterschiedliche kryogene Spannungen mit nur geringer Spannweite der Einzelergebnisse und können somit eindeutig voneinander differenziert werden.

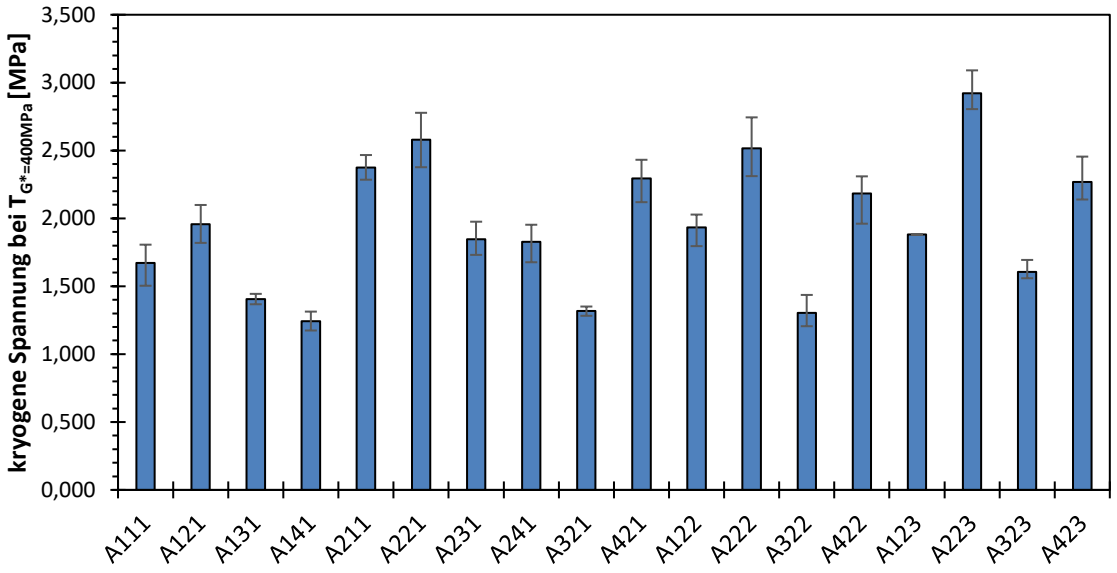


Abbildung 21. Ergebnisse der Abkühlversuche an den Asphaltvarianten: kryogene Spannungen bei $T_{G^* = 400\ MPa}$ [MPa] (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

(b) Ermüdungsprüfungen

In Abbildung 22 sind anhand der Lastwechselzahl nach Rowe die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen im Zug-Druck-Wechsel-Versuch dargestellt. Für alle 18 Asphaltvarianten sind die Mittelwerte aus einer dreifachen Wiederholung der Prüfung sowie die Spannweiten der Einzelergebnisse angegeben.

Bei allen Asphaltvarianten ist eine temperaturabhängige Reihung der jeweils erreichten Ermüdungslastwechsel feststellbar. Bei der Prüftemperatur von 10°C ergeben sich jeweils die größte und bei 20°C die geringste Anzahl an Ermüdungslastwechseln. Die verschiedenen Asphaltvarianten können aufgrund der Ergebnisse gut differenziert und hinsichtlich ihres Ermüdungswiderstands bewertet werden.

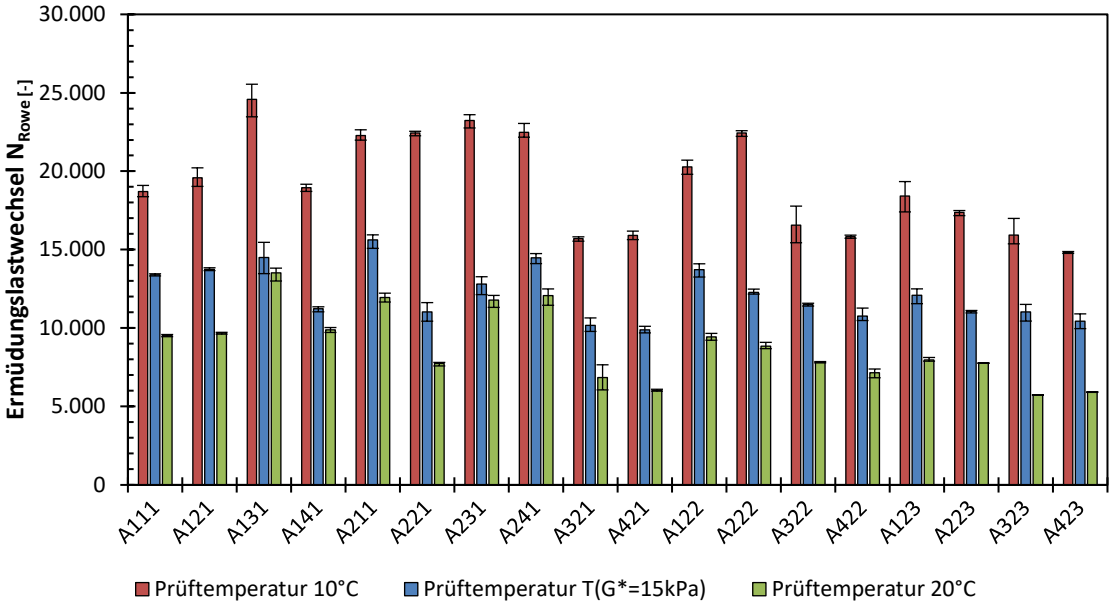


Abbildung 22. Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen bei den Prüftemperaturen 10°C, $T_{G^*(Bitumen) = 15\ kPa}$ und 20°C (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

(c) Verformungsprüfungen

Aus dem Dynamischen Stempeleindringversuch (DSEV) wird die Kriechrate im Bereich des stationären Fließens über die lineare Änderung der Dehnung in Abhängigkeit von der Anzahl an Lastwechseln angegeben. Die Prüfergebnisse für alle Asphaltvarianten sind in Abbildung 23 dargestellt. Sie differenzieren deutlich die Asphaltvarianten. Während mit Straßenbaubitumen hergestellten Asphaltvarianten deutlich höhere Kriechraten aufweisen, sind die Kriechraten für die mit Polymermodifizierten Bitumen hergestellten Asphaltvarianten deutlich geringer. Weil eine geringe Kriechrate mit einem hohen Verformungswiderstand einhergeht, sind die mit Polymermodifizierten Bitumen hergestellten Asphaltvarianten als verformungsresistenter zu bewerten. Die Variation der eingesetzten Gesteine ergibt keine signifikante Veränderung der Kriechrate.

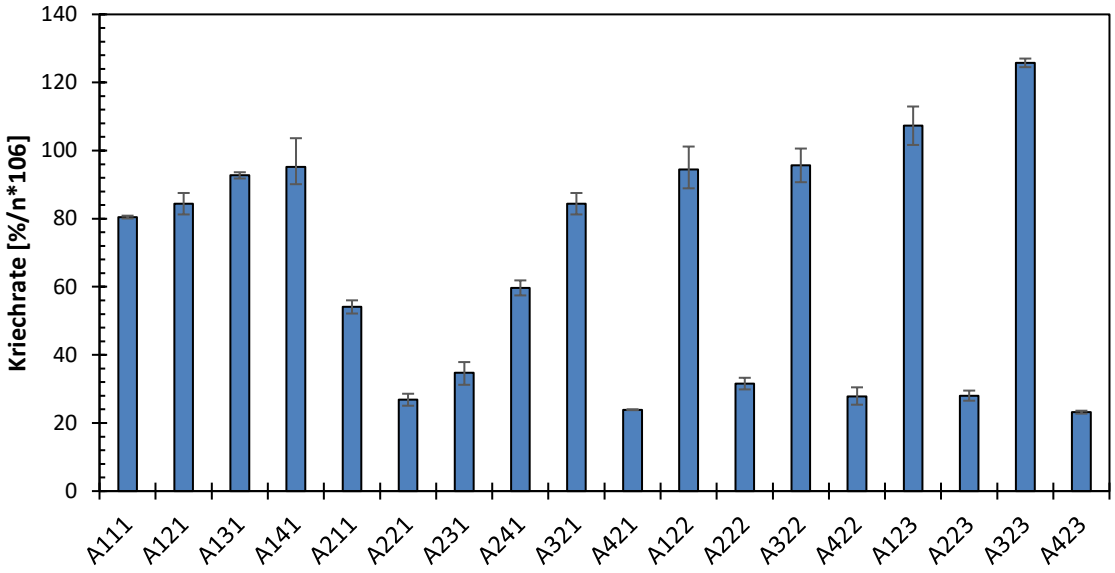


Abbildung 23. Ergebnisse der Dynamischen Stempeleindringversuche (mit Stützring) an den Asphaltvarianten: Kriechrate bei $T_{G^*(Bitumen)} = 15\ kPa$ (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

4.2.4 Kennwerte der inneren Asphaltstruktur

Für die Asphaltvarianten liegen die Kennwerte der inneren Asphaltstruktur vor: Anzahl der Kontaktpunkte im Gesteinsskelett, Kontaktlänge, Kornorientierung, Vektormagnitude und Internal Structure Index.

In Abbildung 24 sind beispielhaft für die Asphaltvariante A111 die Anzahl der Kontaktpunkte für 42 Probekörper mit identischer Mischgutzusammensetzung dargestellt. Die Anzahl der Kontaktpunkte schwankt zwischen 144 und 400. Diese starke Schwankung ist auch bei den anderen untersuchten Asphaltvarianten festzustellen, deren Mittelwerte und Spannweiten in Abbildung 25 dargestellt sind. Ähnliche Ergebnisse werden auch für die anderen Strukturparameter erhalten.

Zusammenfassend ist anhand der Auswertungen der Kennwerte der inneren Struktur festzuhalten, dass für ein und dieselbe Mischgutzusammensetzung die innere Struktur von Probekörper zu Probekörper stark schwankt und bei der Probekörperherstellung keine homogene Struktur erzielt wird.

Im Kapitel 4.3.5 werden die individuellen Strukturparameter einzelner Probekörper den entsprechenden Prüfergebnissen der Performance-Prüfungen gegenübergestellt, um so einen eventuellen Einfluss von beispielsweise hoher oder niedriger Anzahl an Kontaktpunkten auf

die Gebrauchseigenschaften zu ermitteln. Allerdings ist diesbezüglich anzumerken, dass frühere, ähnliche Versuche von Grönniger (2018) nicht erfolgreich waren.

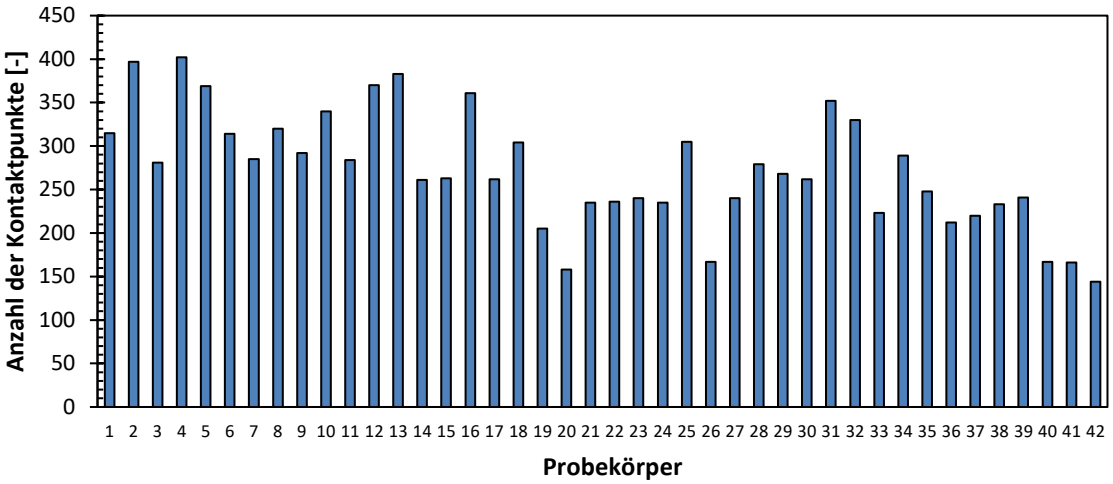


Abbildung 24. Anzahl der Kontaktpunkte für 42 Probekörper der Asphaltvariante A111.

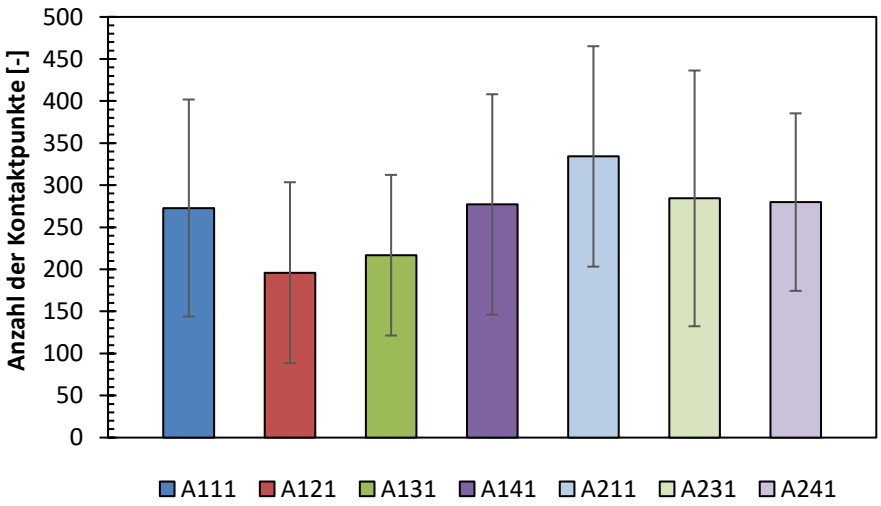


Abbildung 25. Mittelwerte und Spannweiten der Anzahl an Kontaktpunkten für 7 unterschiedliche Asphaltvarianten (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

4.3 Auswertung

Die Auswertung sämtlicher Ergebnisse aus den Performance-Prüfungen an den Bitumen-, Asphaltmastix- und Asphaltvarianten erfolgt auf Grundlage von statistischen Korrelationen der jeweils vergleichbaren Kennwerte des Gebrauchsverhaltens in den drei Temperaturbereichen, also Steifigkeit, Widerstand gegen Kälterisse, Widerstand gegen Ermüdung und Widerstand gegen Verformung. Dies wird veranschaulicht durch Gegenüberstellung der

Kennwerte in Diagrammform. Mögliche Korrelationen werden durch Bestimmung der Korrelationsfunktion und unter Angabe des Bestimmtheitsmaßes R^2 angegeben.

4.3.1 Steifigkeit

In Abbildung 26 sind die Masterkurven für zwei Bitumen, die Masterkurven für die mit diesen Bitumen hergestellten Asphaltmastixvarianten und die Masterkurven für die mit diesen Asphaltmastixvarianten hergestellten Asphaltvarianten dargestellt. Der für die beiden Bitumen jeweils charakteristische Verlauf der Masterkurve ist auch bei den Masterkurven der Asphaltmastixvarianten und der Asphaltvarianten erkennbar. Das verwendete Bitumen hat offensichtlich einen entscheidenden Einfluss auf die Steifigkeit der daraus hergestellten Asphaltmastix- und Asphaltvarianten.

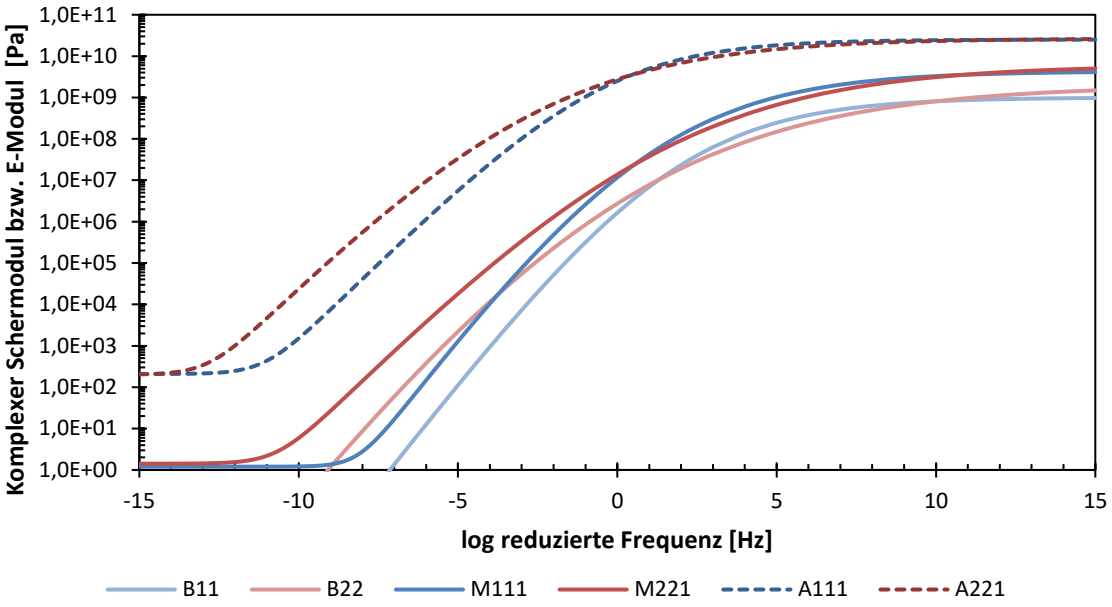


Abbildung 26. Vergleichende Darstellung der Masterkurven für die Steifigkeit von Bitumen-, Asphaltmastix- und Asphaltvarianten (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

In Abbildung 27 ist für die gleichen Materialien der Verlauf des Phasenwinkels dargestellt. Die beiden unterschiedlichen Bitumen zeigen hier aufgrund der Modifizierung ein sehr unterschiedliches Materialverhalten. Während die Bitumen und die daraus hergestellten Asphaltmastixvarianten ein ähnliches Verhalten zeigen, weichen die Phasenwinkel der Asphaltvarianten deutlich von Verlauf und Form ab.

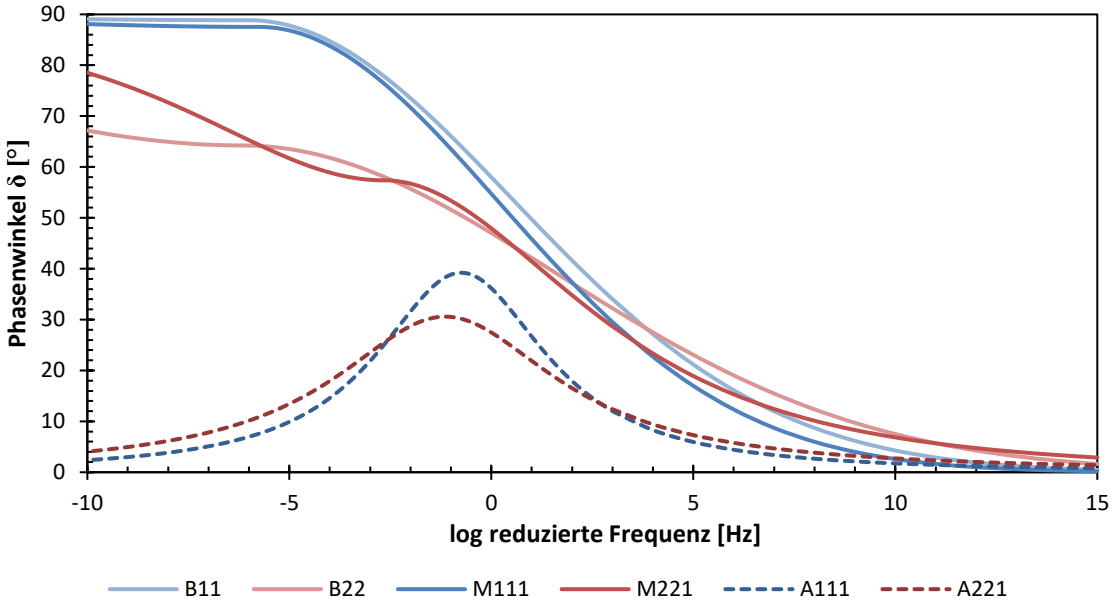


Abbildung 27. Vergleichende Darstellung der Masterkurven für den Phasenwinkel der Bitumen-, Asphaltmastix- und Asphaltvarianten (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

In Abbildung 28 sind die Cole-Cole-Diagramme für die Bitumen-, Asphaltmastix- und Asphaltvarianten dargestellt. Dafür werden die komplexen Schermodule G* mit der von Bitumen bekannten Querdehnzahl in Elastizitätsmodule (E-Modul) überführt. Die absoluten Kennwerte sind für die Materialien zwar unterschiedlich, jedoch ist eine identische Kurvenform erkennbar. Damit bestätigen sich die Ergebnisse aus früheren Veröffentlichungen, nach denen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt im LVE-Bereich existiert (vgl. Abbildung 1).

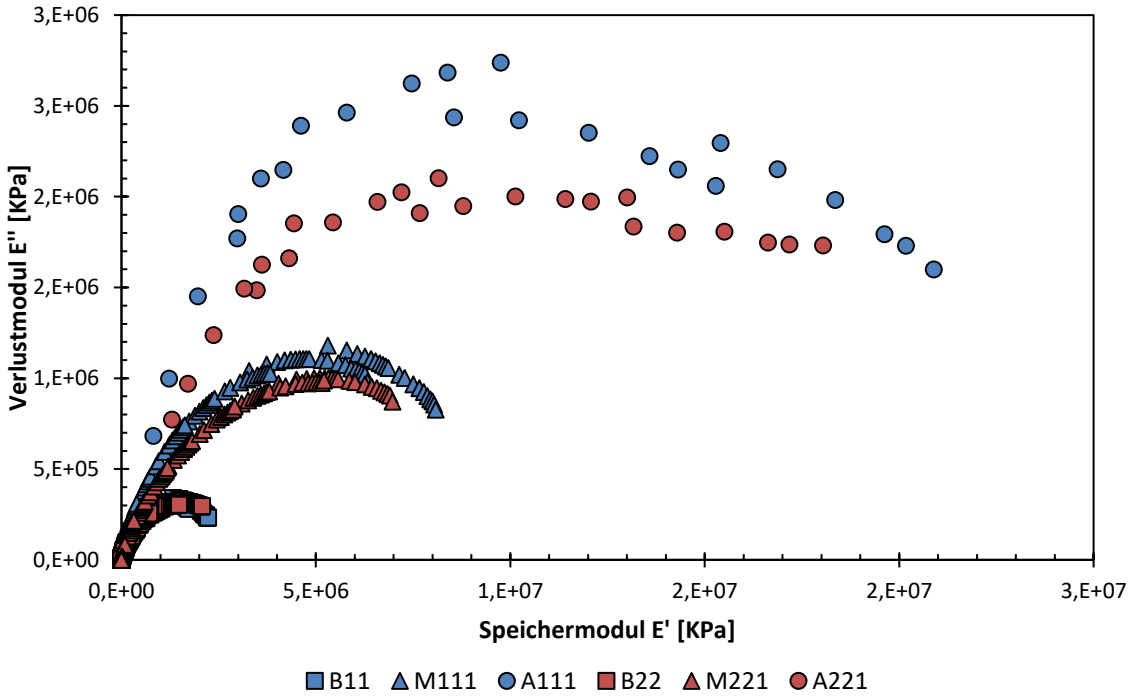


Abbildung 28. Vergleichende Darstellung der Cole-Cole-Diagramme für ausgewählte Varianten an Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

In Abbildung 29 sind die normalisierten Werte von Verlustmodul und Speichermodul für die betrachteten sechs Materialien dargestellt. Es zeigt sich bitumenabhängig ein identischer Kurvenverlauf für Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt.

Dieser Zusammenhang wird auch bei Modellierung mit dem 2S2P1D-Modell deutlich. In Tabelle 12 sind für korrespondierende Materialvarianten die Kennwerte der 2S2P1D-Modellparameter δ, k und h zusammengestellt. Die Kennwerte stimmen näherungsweise gut überein.

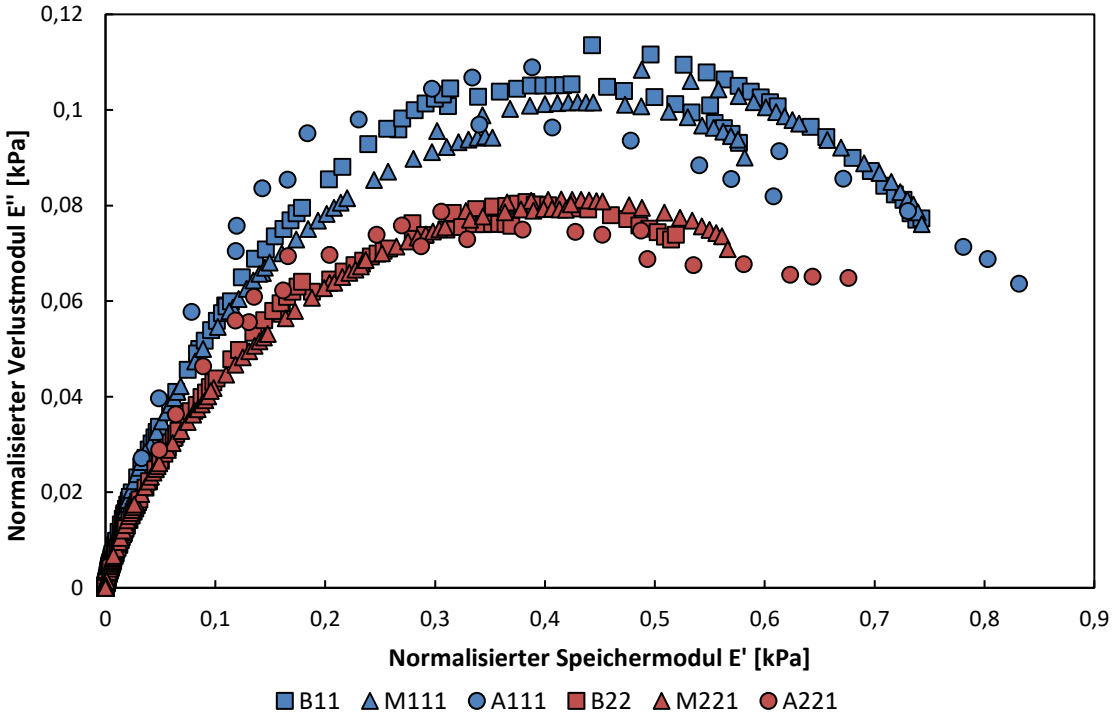


Abbildung 29. Vergleichende Darstellung von normalisierten Cole-Cole-Diagrammen für ausgewählte Varianten an Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

4.3.2 Widerstand gegen Kälterisse

Zu Bewertung des Kälteverhaltens werden für die Asphaltmastix der Kennwert der Spannungsrelaxation nach 60 Minuten (vgl. Kapitel 4.1.2.2) und für Asphalt die kryogene Spannung (vgl. Kapitel 4.1.3.2) herangezogen. Beide Kennwerte charakterisieren das Materialverhalten bei tiefen Temperaturen (Relaxationsverhalten) und adressieren den Widerstand gegen Kälterissbildung. Sie wurden bei der Äquimodultemperatur von $T_{G^*(Bitumen)=400mPa}$ ermittelt und können dadurch direkt miteinander verglichen werden.

In Abbildung 30 sind die Kennwerte gegenübergestellt. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte und Spannweiten der Kennwerte für alle 18 Materialvarianten. Im Hintergrund sind außerdem die Messwerte der 77 Einzelprüfungen eingezeichnet.

Mittels linearer Korrelation der Mittelwerte wird ein direkter Zusammenhang zwischen Asphaltmastix und Asphalt hergestellt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der Korrelation beträgt 0,86 und zeigt damit einen guten Zusammenhang zwischen den beiden Kennwerten.

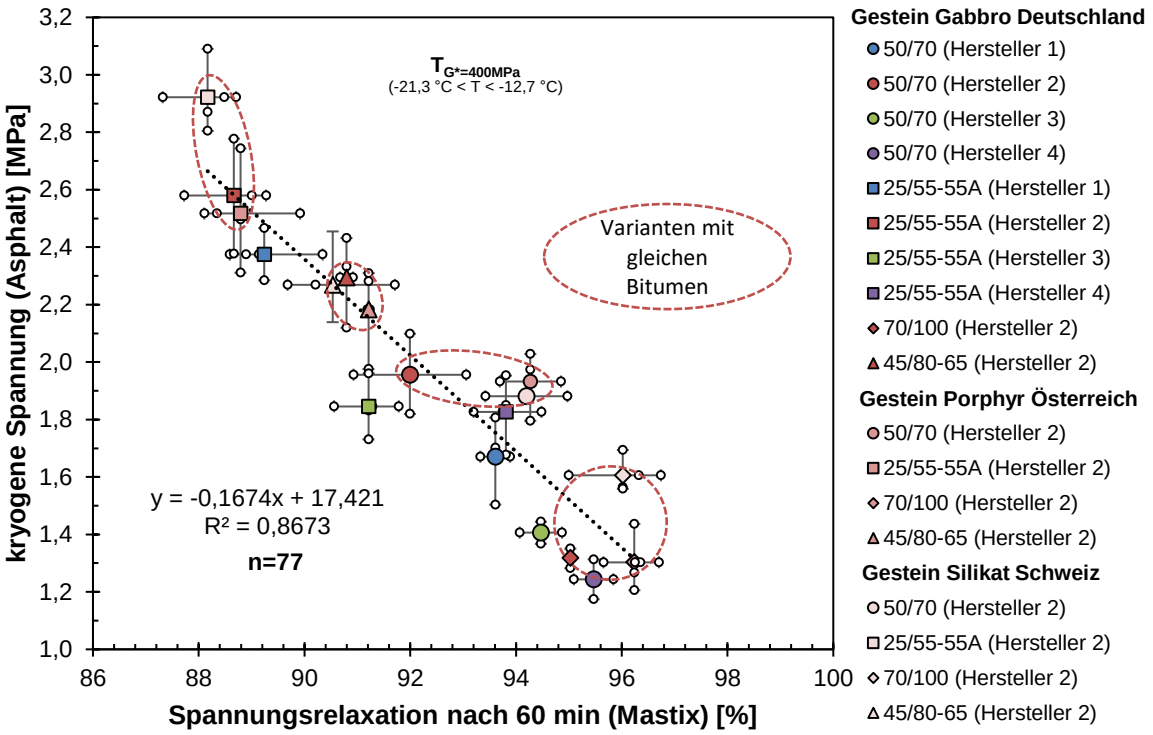


Abbildung 30. Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Kryogene Spannung von Asphalt und Spannungsrelaxation nach 60 Minuten von Asphaltmastix.

Abbildung 30 zeigt, dass Asphaltvarianten ihrerseits aber auch anhand ihrer Mastix hinsichtlich ihres Widerstands gegen Kälterisse klar differenziert werden können. Ein hoher Widerstand gegen Kälterisse ist sowohl anhand niedriger kryogener Spannungen beim Abkühlen des Asphaltprobekörpers erkennbar, als auch anhand einer hohen Spannungsrelaxation in der Relaxationsprüfung der zugehörigen Asphaltmastix. In Abbildung 30 sind die Varianten mit jeweils gleichem Ausgangsbitumen mit einem roten Kreis markiert. Es zeigt sich, dass das Bitumen dominant die Kälterissresistenz beeinflusst, während die Variation der mineralischen Bestandteile nur einen untergeordneten Einfluss auf das Kälteverhalten hat.

Die Relaxationsprüfung der Asphaltmastix im DSR ist somit ein vielversprechender Ansatz, um das Kälteverhalten von Asphalt zu prognostizieren. Nach Erweiterung der Ergebnisse um mehr Datensätze wäre auch die Einführung von Grenzwerten für die Asphaltmastix denkbar, die ein gutes Kälteverhalten des Asphalts sicherstellen.

4.3.3 Widerstand gegen Ermüdung

Aus den Ermüdungsprüfungen an den Asphaltmastix- und Asphaltvarianten liegen jeweils die Anzahlen an Lastwechsel N_{Rowe} bis zur Ermüdung (gemäß Ermüdungskriterium nach Rowe) bei unterschiedlichen Temperaturen vor (vgl. Kapitel 4.1.2.3 und 4.1.3.3). Ein großer Wert für den Parameter N_{Rowe} bedeutet einen hohen Ermüdungswiderstand.

Insgesamt gibt es für die 18 Materialvarianten 337 Einzelprüfungen zum Ermüdungsverhalten, deren Ergebnisse für die Asphaltmastixvarianten den Ergebnissen für die Asphaltvarianten in Abbildung 31 gegenübergestellt sind. Dargestellt sind die Mittelwerte und Spannweiten aus den Einzelergebnissen für jede Materialvariante. Die Prüfergebnisse können gemäß den eingezeichneten Bereichen den unterschiedlichen Prüftemperaturen zugeordnet werden. Es ergibt sich eine lineare Korrelation zwischen Asphaltmastix und Asphalt mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,74.

Außerhalb dieses linearen Zusammenhangs sind zwei roten Quadrate markiert, die bis auf Weiteres als Ausreißer eingestuft sind. In weiterführenden Untersuchungen zu diesen abweichenden Messpunkten soll geklärt werden, ob in diesem Fällen bei der Herstellung des Asphaltmischguts irrtümlich ein falsches Bitumen eingesetzt wurde.

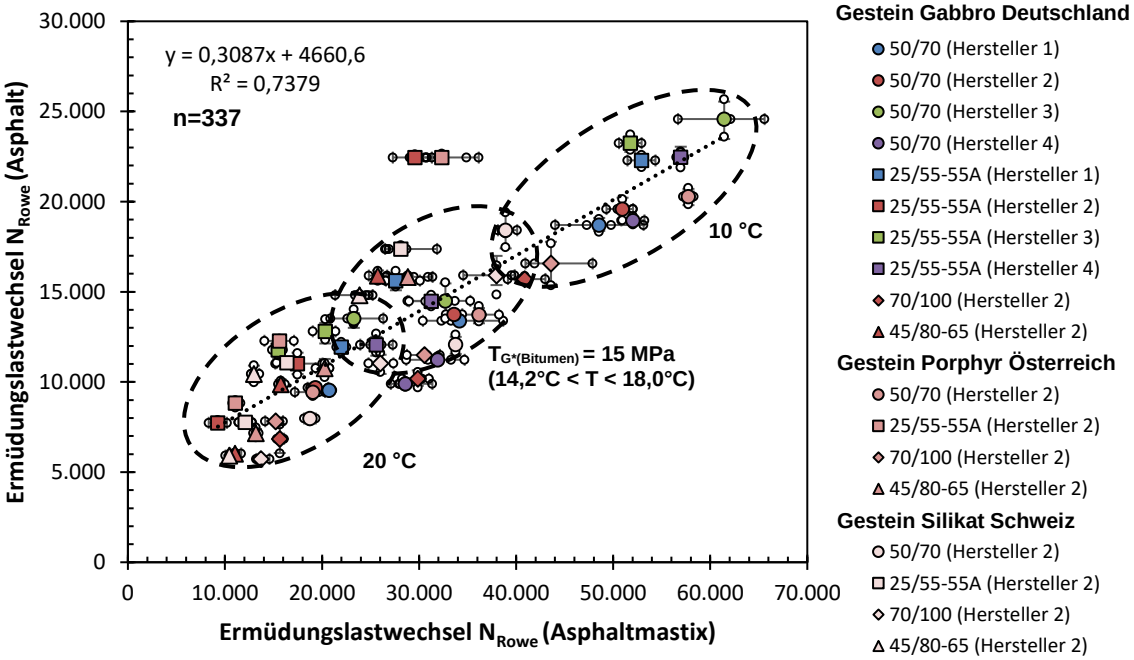


Abbildung 31. Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Ermüdungslastwechsel N_{ROWE} von Asphalt aus Zug-Druck-Wechsellast-Versuchen und Ermüdungslastwechsel N_{ROWE} von Asphaltmastix aus beschleunigten Ermüdungsprüfungen (AFT).

Sowohl für die Asphaltvarianten als auch für die Asphaltmastixvarianten ist eine eindeutige Temperaturabhängigkeit des Ermüdungsverhaltens festzustellen. Bei niedriger Prüftemperatur ist die Steifigkeit höher, wodurch die Dehnung kleiner ist und die Anzahl der ertragbaren Dehnungen zunimmt. Das Material wird in der Ermüdungsprüfung mit abnehmender Prüftemperatur resistenter. Daher zeigen die weicheren Bitumen (70/100 und 45/80-65) aufgrund der geringeren Steifigkeit einen geringeren Ermüdungswiderstand als die härteren Bitumen (50/70 und 25/55-55). Zwischen den Straßenbaubitumen und den Polymermodifizierten Bitumen ist hinsichtlich des Ermüdungswiderstands kein relevanter Unterschied zu erkennen. Bei der gewählten Prüfsystematik scheinen die Polymere die Lebensdauer der Materialien nicht zu beeinflussen. Auch der Einfluss der Gesteinsart ist untergeordnet (jeweils drei gleiche Symbole mit unterschiedlichen Rottönen liegen bei einer Prüftemperatur nah beieinander).

Die Ermüdungsprüfung der Asphaltmastix im DSR ist somit ein vielversprechender Ansatz, um das das Ermüdungsverhalten von Asphalt zu prognostizieren. Nach Erweiterung der Ergebnisse um mehr Datensätze wäre auch die Einführung von Grenzwerten für die Asphaltmastix denkbar, die ein gutes Ermüdungsverhalten des Asphalts sicherstellen.

4.3.4 Widerstand gegen Verformung

Aus den Kriechprüfungen zum Verformungsverhalten der Asphalt-, Asphaltmastix- und Bitumenvarianten liegen die Kriechraten (Creep Compliance Rate) bei $T_{G^*(Bitumen)\,=\,15\,kPa}$ im Bereich des stationären Fließens als Kennwert für den Verformungswiderstand vor (vgl. Kapitel 4.1.2.4 und 4.1.3.4). Eine kleine Kriechrate bedeutet einen hohen Widerstand gegen plastische Verformung.

In Abbildung 32 sind die Ergebnisse für die Bitumenvarianten den Ergebnissen für die Asphaltmastixvarianten in Form von Mittelwerten und Spannweiten der Einzelergebnisse gegenübergestellt. Bei einer einfach-logarithmischen Darstellung zeigt sich ein direkter Zusammenhang über eine exponentielle Funktion mit einem Bestimmtheitsmaß von R^2 von 0,86.

Die Straßenbaubitumen bzw. die mit Straßenbaubitumen hergestellten Asphaltmastixvarianten weisen deutlich höhere Kriechraten auf, als die Polymermodifizierten Bitumen bzw. die mit Polymermodifizierten Bitumen hergestellten Asphaltmastixvarianten, was auf die elastische Wirkung der Polymere zurückzuführen ist. Somit sind die unterschiedlichen Bitumenvarianten eindeutig zu differenzieren. Durch den Zusatz von Füller zur Bildung der

Asphaltmastix reduziert sich, insbesondere bei den Polymermodifizierten Bitumen, die jeweilige Kriechrate erheblich. Die Verwendung unterschiedlicher Füller zeigt keinen spezifischen Unterschied im Kriechverhalten (gleiche Symbole unterschiedlicher Rottöne weisen ähnliche Kennwerte auf).

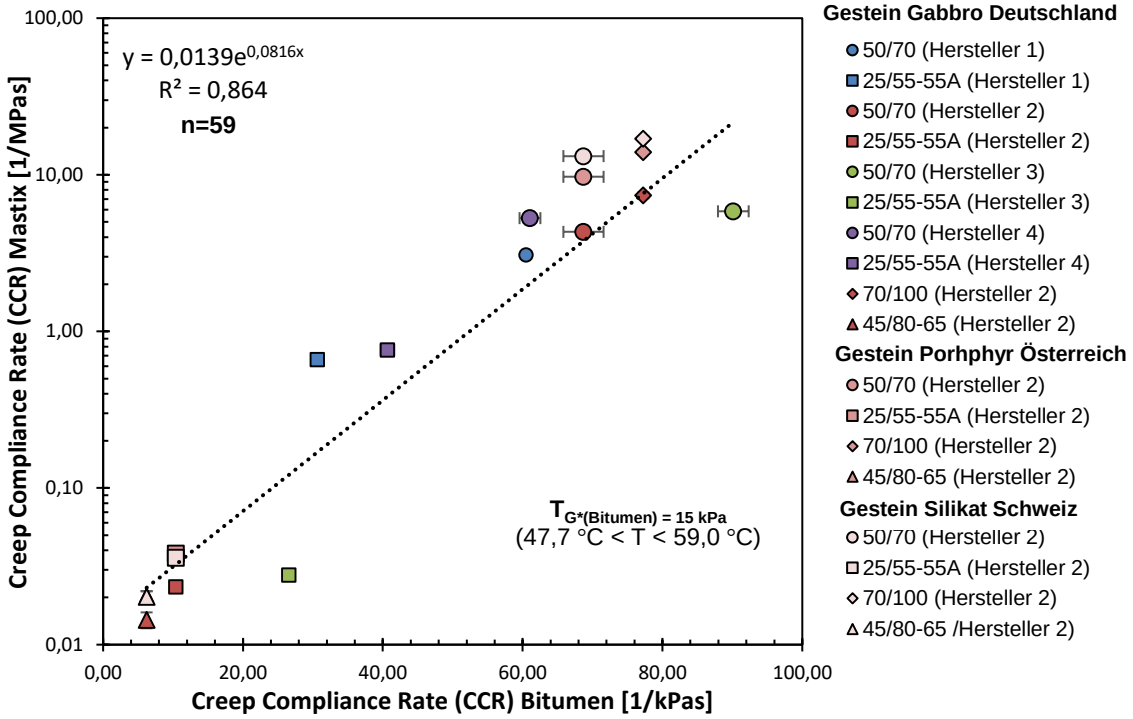


Abbildung 32. Korrelation von Bitumen- und Asphaltmastixvarianten: Kriechrate (CCR, Creep Compliance Rate) bei $T_{G^*(Bitumen) = 15\ kPa}$.

Die Kriechraten der Asphaltmastix- und der Asphaltvarianten sind in Abbildung 33 gegenübergestellt. Bei einfach logarithmischer Darstellung kann die Abhängigkeit der Kriechraten durch eine logarithmische Funktion mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,95 beschrieben werden. Analog zu Abbildung 32 zeigt sich auch hier, dass unterschiedliche Bitumen eindeutig differenziert werden und das Gestein einen untergeordneten Einfluss hat.

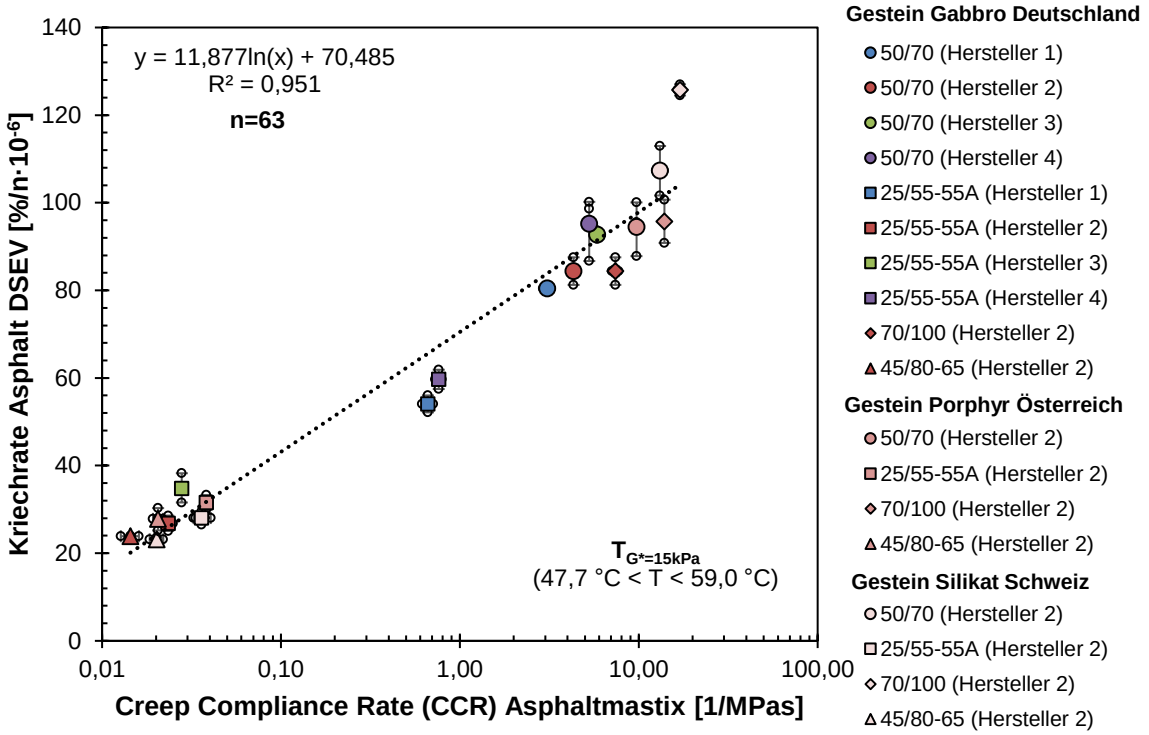


Abbildung 33. Korrelation von Asphaltmastix- und Asphaltvarianten: Kriechrate (CCR, Creep Compliance Rate) bei $T_{G^* = 15\ kPa}$.

Die Kriechprüfung der Asphaltmastix im DSR ist somit ein vielversprechender Ansatz, um das das Verformungsverhalten von Asphalt zu prognostizieren. Nach Erweiterung der Ergebnisse um mehr Datensätze wäre auch die Einführung von Grenzwerten für die Asphaltmastix denkbar, die ein gutes Verformungsverhalten des Asphalts sicherstellen.

4.3.5 Auswertung der inneren Asphaltstruktur

Zur Untersuchung des Einflusses von Strukturparametern auf die Performancekennwerte von Asphalt zeigt Abbildung 34 die Anzahlen an Kontaktpunkten in Abhängigkeit von den in Ermüdungsprüfungen bei 20 und 10°C ermittelten ertragbaren Lastwechselzahlen N_{Rowe} (vgl. Kapitel 4.1.3.3). Es ist festzustellen, dass die Ergebnisse stark streuen und die Kennwerte in keinem funktionalen Zusammenhang stehen (Bestimmtheitsmaße << 0,5).

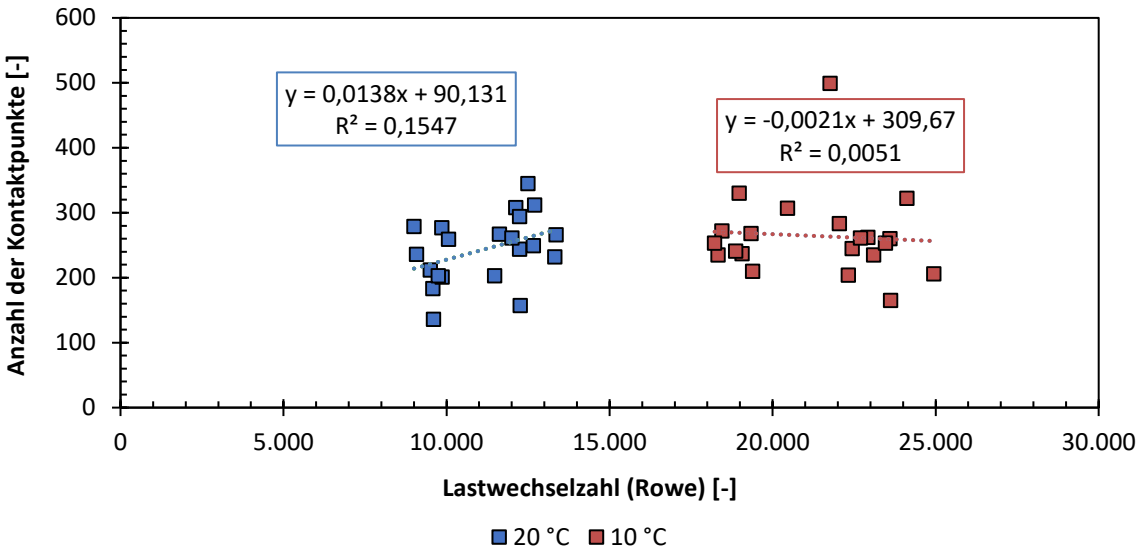


Abbildung 34: Lastwechselzahlen nach Rowe – ermittelt bei den Prüftemperaturen 10 und 20°C – als Funktion der Anzahlen an Kontaktpunkten in den zugehörigen Probekörpern.

Die weiteren untersuchten Strukturparameter (Kontaktlänge, Kornorientierung, Vektormagnitude und Internal Structure Index) zeigen ebenfalls keine Korrelationen mit den Ergebnissen aus den Ermüdungsprüfungen (unzureichende Bestimmtheitsmaße siehe Tabelle 13). Tabelle 13 enthält zusätzlich die Korrelationsanalyse der Strukturparameter mit der Bruchtemperatur aus dem Abkühlversuch (vgl. Kapitel 4.1.3.2). Auch in diesem Fall ist keine Abhängigkeit zu erkennen.

Tabelle 13: Analyse zu möglichen Korrelationen der Strukturparameter mit Ergebnissen aus Ermüdungsprüfungen und Abkühlversuchen

Strukturparameter	Bestimmtheitsmaß		
	Ermüdungswiderstand bei 20°C	Ermüdungswiderstand bei 10°C	Bruchtemperatur aus Abkühlversuch
Kontaktpunkte	0,1547	0,0051	0,2286
Kontaktlängen	0,1498	0,0061	0,0822
Kornorientierung	0,0156	0,0949	0,0081
Vektormagnitude	0,0007	0,1881	0,1308
Internal Structure Index	0,1618	0,0059	0,0770

Die Analyse der Zugversuche (vgl. Kapitel 4.1.3.3) zeigt ein ähnliches Ergebnis. Beispielhaft ist in Abbildung 35 die Abhängigkeit zwischen der Anzahl an Kontaktpunkten und der Zugfestigkeit bei Temperaturen von -25, -10, 5 und 20°C dargestellt. Wieder streuen die Ergebnisse stark und die Kennwerte stehen in keinem funktionalen Zusammenhang (Bestimmtheitsmaße << 0,5).

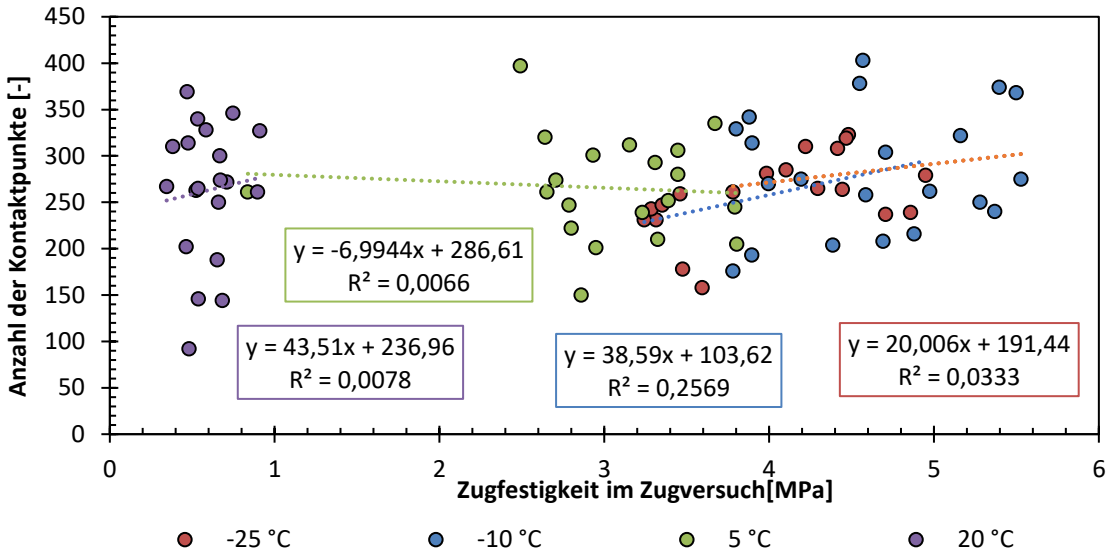


Abbildung 35: Zugfestigkeiten – ermittelt bei den Prüftemperaturen -25, -10, 5 und 20°C – als Funktion der Anzahlen an Kontaktpunkten in den zugehörigen Probekörpern.

Die weiteren untersuchten Strukturparameter (Kontaktlänge, Kornorientierung, Vektormagnitude und Internal Structure Index) zeigen ebenfalls keine Korrelationen mit den Ergebnissen aus den Zugversuchen (unzureichende Bestimmtheitsmaße siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Analyse zu möglichen Korrelationen der Strukturparameter mit Ergebnissen aus Zugversuchen

Strukturparameter	Bestimmtheitsmaß			
	Zugfestigkeit bei -25°C	Zugfestigkeit bei -10°C	Zugfestigkeit bei 5°C	Zugfestigkeit bei 20°C
Kontaktpunkte	0,257	0,033	0,007	0,008
Kontaktlängen	0,153	0,035	0,001	0,007
Kornorientierung	0,022	0,003	0,014	0,115
Vektormagnitude	0,011	0,100	0,006	0,013
Internal Structure Index	0,122	0,001	0,055	0,096

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die ermittelten Parameter zur Beschreibung der inneren Asphaltstruktur in keinem Zusammenhang mit den geprüften Performance-Eigenschaften stehen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die hier verwendeten Probekörper alle unter Laborbedingungen im kleinen Maßstab hergestellt wurden. Bei der Herstellung und Verdichtung von Asphalt im großen Maßstab unter realen Bedingungen an der Asphaltmischanlage und unter Walzverdichtung kann sich die resultierende innere Struktur von jener der Laborprobekörpern unterscheiden und daher auch einen Einfluss auf das Gebrauchsverhalten haben.

4.4 Zusammenfassung Teilbericht A

An der TU Braunschweig wurden Performance-Prüfungen zu den vier ausschlaggebenden Asphalteigenschaften (Tieftemperaturbeständigkeit, Steifigkeit, Ermüdungsbeständigkeit und Verformungsbeständigkeit) eingesetzt. Diese umfassten zur Prüfung des Verformungswiderstands im Hochtemperaturbereich den Dynamischen Stempeleindringversuch (DSEV), zur Prüfung von Steifigkeit (im LVE-Bereich) und des Ermüdungswiderstands die Zug-Druck-Wechsel-Prüfung (ZDW), und zur Prüfung des Widerstands gegen Kälterissbildung den Abkühlversuch (UTST, uniaxial thermal stress test).

Zur Ansprache der Performance von Bitumen und Mastix im Hochtemperaturbereich wird international das Dynamische Scherrheometer (DSR) erfolgreich eingesetzt, im Tief- und Mitteltemperaturbereich gibt es keine bekannten Prüfverfahren. Im Forschungsprojekt VEGAS wurde das DSR als einheitliches Prüfgerät für alle Temperaturbereiche verwendet und folgende DSR-Prüfungen an der TU Braunschweig eingesetzt:

- Zur Prüfung der Steifigkeit im LVE-Bereich (siehe unten) wurden über den gesamten Bereich der Gebrauchstemperaturen von -30°C bis 90°C Temperatur-Frequenz-Sweeps im Oszillationsmodus mit Platte-Platte-Geometrie durchgeführt (von -30°C bis 0°C: Probendurchmesser 4 mm, Plattenabstand 3,1±0,15 mm; von -10°C bis 40°C: Probendurchmesser 8 mm, Plattenabstand 2 mm; von 30°C bis 90°C: Probendurchmesser 25 mm, Plattenabstand 1 mm; Prüftemperatur stufenweise um je 10°C ansteigend, Prüffrequenz 0,1 bis 10 Hz).
- Zur Prüfung des Verformungswiderstands im Hochtemperaturbereich wurden Kriechprüfungen mit Platte-Platte-Geometrie durchgeführt (Probendurchmesser 25 mm, Plattenabstand 1 mm, Scherbelastung 0,1 kPa, Prüftemperatur $T_{G^*(Bitumen) = 15 kPa}$).
- Zur Prüfung des Ermüdungswiderstands im Mitteltemperaturbereich wurden Temperatur-Frequenz-Sweeps im Oszillationsmodus mit Platte-Platte-Geometrie durchgeführt (Probendurchmesser 8 mm, Plattenabstand 2 mm, Scherbelastung ansteigend von 150 kPa in Stufen zu 50 kPa nach jeweils 4000 Lastzyklen, Prüftemperaturen 10°C, 20°C und $T_{G^*(Bitumen) = 15 MPa}$).
- Zur Prüfung des Widerstands gegen Risse im Tieftemperaturbereich wurden Relaxationsprüfungen mit Platte-Platte-Geometrie durchgeführt (Probendurchmesser 4 mm, Plattenabstand 3,1±0.15 mm, Scherdeformation 0,1%, Prüfdauer 60 Minuten, Prüftemperatur $T_{G^*(Bitumen) = 400 MPa}$).

Für die neu entwickelten Prüfverfahren im DSR stehen detaillierte Arbeitsanleitungen als Anhang zu diesem Ergebnisbericht zur Verfügung.

Die Performance-Prüfungen können prinzipiell in Prüfungen innerhalb und außerhalb des Bereichs linear-visko-elastischen (LVE) Materialverhaltens unterteilt werden. Der LVE-Bereich für Asphalt gilt für kleine Deformationen und bei wenigen Lastwechseln, nach Di Benedetto (1990) für Dehnungen kleiner 10^{-4} und weniger als 10^{3} Lastwechsel.

Innerhalb des LVE-Bereichs wurden auf allen drei Untersuchungsebenen unter Anwendung von sehr kleinen Beanspruchungen Temperatur-Frequenz-Sweeps über einen weiten Temperatur- und Frequenzbereich zur Bestimmung der physikalischen bzw. rheologischen Materialkennwerte Schermodul bzw. E-Modul und Phasenwinkel angewendet (siehe oben). Aus den damit erzielten Ergebnissen können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Im Bereich des linear-visko-elastischen Materialverhaltens (LVE-Bereich) wurden die bereits von anderen Autoren festgestellten Zusammenhänge des mechanischen Materialverhaltens von Bitumen, Mastix und Asphaltmischgut bestätigt.
- Ergebnisse von Temperatur-Frequenz-Sweeps konnten durch Anwendung der WLF-Gleichung in Form von Masterkurven übersichtlich dargestellt und anhand der Modellparameter des CAM-Modells miteinander verglichen werden.
- Das Materialverhalten im LVE-Bereich kann für alle drei Betrachtungsebenen durch das 2S2P1D-Modell zuverlässig abgebildet werden. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den Modellparametern von korrespondierenden Bitumen-, Asphaltmastix- und Asphaltvarianten. Danach kann anhand der Ermittlung der Modellparameter im LVE-Bereich, die Steifigkeit des verdichteten Asphalts aus den Bitumeneigenschaften mit ausreichender Genauigkeit prognostiziert werden.
- Auch über die Prüfung der Asphaltmastix im DSR kann anhand von Temperatur-Frequenz-Sweeps das Steifigkeitsverhalten des daraus hergestellten Asphalts über Modellparameter prognostiziert werden. Temperatur-Frequenz-Sweeps im DSR bieten damit eine vielversprechende Möglichkeit zur raschen Bestimmung der Asphaltsteifigkeit und bei der Materialkonzeption.

Bei einer mechanischen und/oder thermischen Beanspruchung außerhalb des LVE-Bereichs kommt es zu nichtlinearem Materialverhalten und Materialschädigung in Form von Rissbildung, Ermüdung oder Verformung. Performance-Prüfungen an Asphalt erfolgen - ausgenommen die Ermittlung Steifigkeit - außerhalb des LVE-Bereichs, wobei dieser entweder verlassen wird durch eine hohe mechanische und/oder thermische Beanspruchung

(z. B. zur Analyse der Rissbildung oder des Verformungswiderstands) oder durch eine hohe Anzahl an Belastungszyklen (z. B. zur Analyse der Ermüdung).

Die Prüfungen außerhalb des LVE-Bereichs wurden temperaturspezifisch an die jeweils relevanten Versagenskriterien von Asphalt angepasst. Im unteren Temperaturbereich wurde das Relaxationsverhalten, im mittleren Temperaturbereich das Ermüdungsverhalten und im oberen Temperaturbereich das Kriechverhalten untersucht. Die Prüfungen wurden dabei bei Temperaturen definierter Steifigkeit (Äquimodultemperatur) durchgeführt. Folgende Erkenntnisse resultieren aus den Prüfungen außerhalb des LVE-Bereichs:

- Zwischen dem Materialverhalten der Asphaltmastix und dem Materialverhalten des Asphalts besteht für alle drei Temperaturbereiche basierend auf einer Vielzahl von Einzelprüfungen eine Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,7.
- Die unterschiedlichen Prüfungen ermöglichen eine eindeutige Differenzierung der unterschiedlichen Materialvarianten, wobei das verwendete Bitumen im Vergleich zu den mineralischen Bestandteilen einen deutlich größeren Einfluss auf das Messergebnis zeigt,
- Beim Relaxationsverhalten und Ermüdungsverhalten sind keine Unterschiede zwischen unmodifizierten und modifizierten Bitumen erkennbar. Beim Kriechverhalten zeigen die modifizierten Bitumen einen deutlich erhöhten Verformungswiderstand,
- Die Anwendung der Äquimodultemperaturen war zur Entwicklung und Validierung der unterschiedlichen Prüfverfahren hilfreich, erscheint aber langfristig aufgrund der aufwändigen Bestimmung über T-f-Sweep nicht zielführend.

Ergänzend wurde der Einfluss der inneren Asphaltstruktur (Kornverteilung, Kornorientierung, Kontaktpunkte/-flächen u. ä.) auf die Asphaltperformance über bildanalytische Charakterisierungen mithilfe von 2D Scans untersucht. Es konnte kein Einfluss der inneren Asphaltstruktur auf die Prüfergebnisse festgestellt werden.

5 TEILBERICHT B: ERGEBNISBERICHT DER TU WIEN

5.1 Untersuchungsmethodik

An der TU Wien wurden gemäß der Übersicht in Tabelle 1 Prüfungen auf der Asphaltmastixebene als auch auf der Asphaltebene unterschiedliche Prüfungen durchgeführt. Bei den Prüfungen handelt es sich überwiegend um gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen, die zum einen die Ermüdungsbeständigkeit und zum anderen die Verformungsbeständigkeit ansprechen.

Im Bereich des mittleren Gebrauchstemperaturbereiches werden Ermüdungsprüfungen durchgeführt. Für die Ermüdungsprüfungen auf Mastixebene kommt ein Time-Sweep-Test (Kapitel 5.1.1.1 und 5.2.1.1) zur Anwendung, bei dem ein hyperbolisch geformter Probekörper mit konstanter Schubspannung bei 10 °C und 30 Hz solange belastet wird, bis es zu einem Bruch im Probekörper kommt. Für den Versuch auf Asphaltebene kommt der Ermüdungsversuch am 4-Punkt Biegebalken (Kapitel 5.1.2.1und 5.2.2.1) gemäß EN 12697-24 (2015) zur Anwendung, bei der ein prismatischer Probekörper mit definierter Lastamplitude bei 20 °C und 30 Hz solange belastet wird, bis der Probekörper 50% der Anfangssteifigkeit erreicht hat. Als Ergebnis erhalten wir in beiden Fällen eine Wöhlerkurve für jede Mixtur, welche für weitere Untersuchungen herangezogen wird.
Im Bereich des oberen Gebrauchstemperaturbereiches werden Verformungsprüfungen durchgeführt. Für die Verformungsbeständigkeit auf Asphaltebene kommt der triaxiale Druck-Schwellversuch (Kapitel 5.1.2.3 und 5.2.2.3) gemäß EN 12697-25 (2016) zur Anwendung. Dabei wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper auf Prüftemperatur gebracht und zwischen zwei parallelen Lastplatten mit einem statischen Seitendruck zur Behinderung der Querdehnung belastet und mit einem zyklischen Axialdruck überlagert.

5.1.1 Performanceprüfungen an Bitumen und Mastix

5.1.1.1 Ermüdungsprüfungen

Die Ermüdungsprüfungen an der Mastix werden im DSR durchgeführt. Dafür werden mit Hilfe einer Negativ-Silikonform hyperboloide Mastixprobekörper (siehe Abbildung 36) direkt im DSR gegossen und auf +10°C abgekühlt. Dies entspricht auch der Prüftemperatur. Die Asphaltmastixprobe erreicht bei dieser Temperatur die notwendige Steifigkeit, die ein Kriechen des Probekörpers im Rheometer verhindert. Kriechen muss zwingend unterbunden werden, da der Probekörper sonst der Ermüdungsprüfung ausweicht. Die hyperboloide Form wird verwendet, um ein Versagen am Interface Prüfstempel und Probekörper zu unterbinden. Die Einschnürung stellt aufgrund der Spannungskonzentration in diesem Bereich eine Sollbruchstelle her (Hospodka et al., 2015).

Abbildung 36. Probekörperform für Mastixermüdungsversuch (Hospodka et al., 2015).

Um die Prüfdauer auf einem praxisgerechneten Niveau zu halten und um eine Korrelation mit den 4PB-Versuchen zu vereinfachen, wurde eine Prüffrequenz von 30 Hz gewählt. Die Schubspannung wurde so gewählt, dass sie im Bereich rund um den linear-viskoelastischen (LVE) Bereich und darüber liegt. Die Abbildung 37 zeigt den Verlauf einer Ermüdungskurve einer spannungsgesteuerten Prüfung bis zum Bruch des Probekörpers. Die Einschwingphase und Bildung der Mikrorisse finden auch beim 4PB statt, die Bildung der Makrorisse bis hin zum Materialversagen ist nur bei einer Ermüdungsprüfung mittels DSR vorhanden. Die Einschwingphase am Beginn der Ermüdungsprüfung ist dabei dominiert von Thixotropie. Thixotropie bezeichnet in der Rheologie eine Zeitabhängigkeit der Fließeigenschaften, bei der die Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung abnimmt und erst nach beendigter Beanspruchung wieder zunimmt. Es handelt sich damit also um einen reversiblen Effekt. Nach der sehr kurzen Einschwingphase erfolgt die Bildung der Mikrorisse durch wiederholte Beanspruchung. Diese Mikrorisse verbinden sich in der dritten Phase zusehends zu Makrorissen, die sich selbst wiederrum zu einer Bruchlinie verbinden. Der Probekörper ist damit ermüdet und kann keine Kräfte mehr übertragen. Das spiegelt sich sowohl in der Steifigkeit (komplexer Schubmodul) als auch im Phasenwinkel wider, welcher im Moment des Bruchs abrupt abfällt (Hospodka et al., 2015).

Während beim 4PB die Reduzierung der Steifigkeit auf 50% der Anfangssteifigkeit als Prüfkriterium herangezogen werden muss, kann beim DSR bis zum Materialversagen geprüft werden. Somit wurde festgelegt, dass beim Erreichen des maximalen Phasenwinkels das Versagen eintritt und somit als Prüfkriterium herangezogen wird. Der wesentliche Vorteil gegenüber dem häufig in der Literatur erwähnten LAS-Test (AAHSTO TP 101-14, 2014; Hintz et al., 2011) ist, dass das Ermüdungsverhalten nicht über mathematische Modellierungstechniken berechnet wird, sondern es zu einem tatsächlichen Ermüdungsbruch kommt und der Fehlereinfluss durch Modellierungsparameter nicht zu tragen kommt.

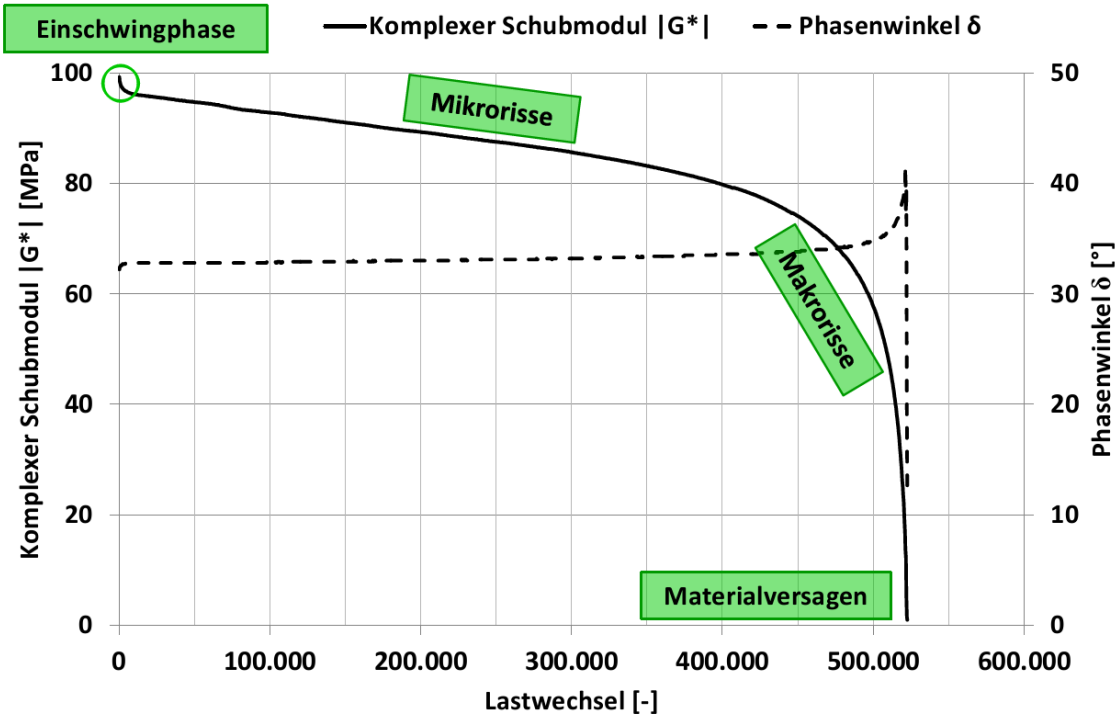


Abbildung 37. Messergebnisse eines Mastixermüdungsversuches (Hospodka et al., 2015).

Pro Mastixmischung werden jeweils 3 Prüfungen bei 3 verschiedenen Schubspannungen durchgeführt. Daraus ergeben sich 9 Prüfungen pro Mischung. Anhand dieser Prüfungen kann eine Wöhlerkurve erstellt werden, aus welcher zwei Prüfergebnisse abgelesen werden können. Zum einem kann die Schubspannung abgelesen werden, die notwendig ist, um eine Million Lastwechsel zu erreichen, bezeichnet mit τ_6. Zum anderen kann die Steigung der Wöhlergerade berechnet werden, die ebenfalls aussagekräftig für Ermüdungseigenschaften der Mastixprobe ist. In Abbildung 38 ist eine solche Wöhlerkurve mit den entsprechenden Prüfergebnissen dargestellt. Erkennbar ist zum einen die ausgezeichnete Wiederholbarkeit und zum anderen die Anwendbarkeit eines klassischen Ermüdungsgesetzes mit hoher Bestimmtheit (R^2).

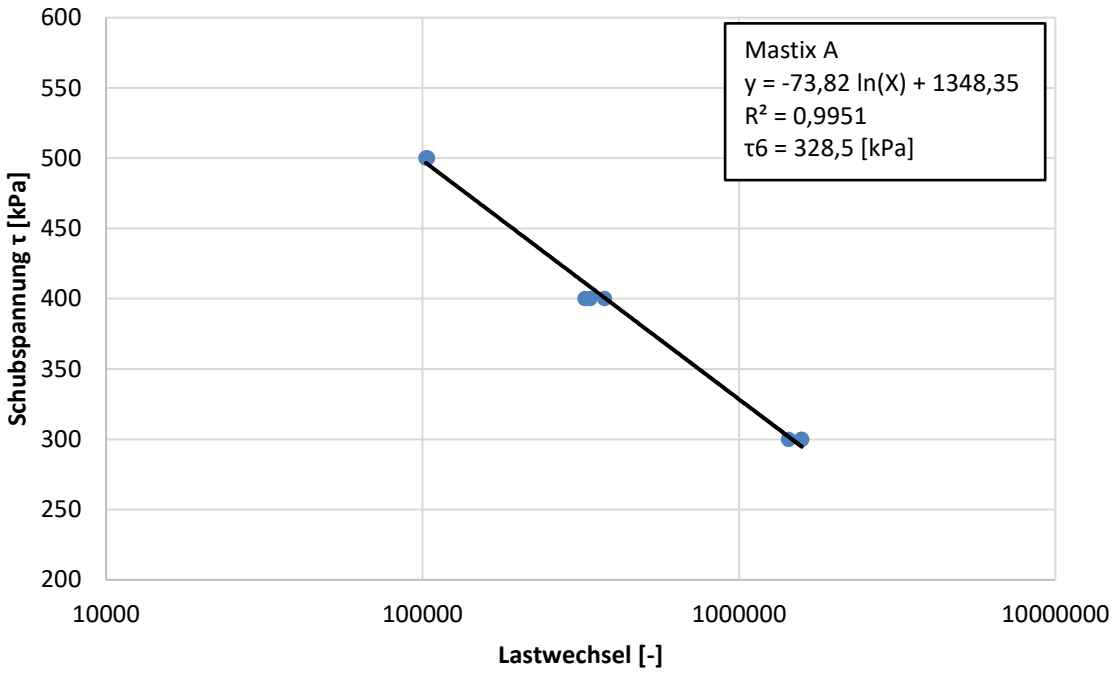


Abbildung 38. Wöhlerkurve einer Mastixprobe.

5.1.2 Performanceprüfungen an Asphalt

Zufolge der ausgewählten Materialen in Kapitel 3.1 und den Angaben in Kapitel 3.4 wurden Asphaltprobekörper mit der Mischgutsorte AC 11 D S im Labor hergestellt und den nachfolgenden gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen unterzogen.

5.1.2.1 Ermüdungsprüfungen

Die Europäische Norm legt die Verfahren zur Charakterisierung der Ermüdung von Asphalt durch verschiedene Prüfungen, einschließlich Biegeprüfungen und Prüfungen der direkten sowie der indirekten Zugfestigkeit, fest. Die Prüfungen werden an verdichtetem Asphalt unter sinusförmiger oder einer anderen kontrollierten Belastung unter Verwendung verschiedener Probekörpertypen und Auflagerungen vorgenommen. Das Verfahren dient gemäß EN 12697-24 (2015):

- zur Einstufung von Asphalt nach seiner Beständigkeit gegen Ermüdung;
- als Hinweis auf das relative Leistungsvermögen von Asphalt in der Fahrbahnbefestigung;
- dazu, Daten zur Abschätzung des Tragverhaltens in der Straße zu erhalten; und
- zur Beurteilung der Prüfdaten nach den für Asphalt geltenden Festlegungen.

Am IVWS der TU Wien wird die Ermüdungsbeständigkeit gemäß EN 12697-24 (2015), Anhang D ermittelt. Mit dem 4-Punkt-Biegebalken (4PB) werden einerseits die temperatur- und frequenzabhängige dynamische Steifigkeit eines Mischguts nach ON EN 12697-26 ermittelt und andererseits die Ermüdungsbeständigkeit nach ON EN 12697-24 untersucht. Eine schematische Abbildung des 4-PBB ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Maße der Probekörper betragen 60x60x500 mm. Der Abstand der äußeren Klemmen beträgt 480 mm, der Abstand der inneren Klemmen zueinander beträgt 160 mm.

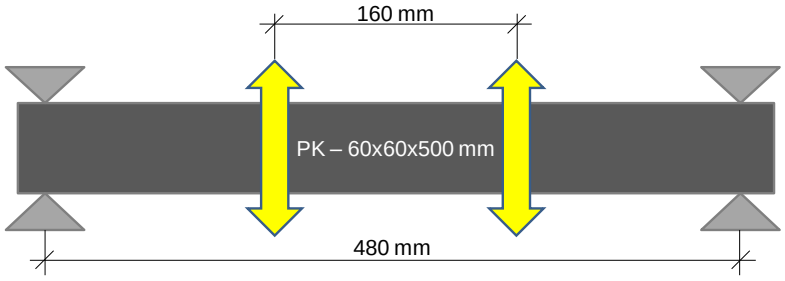


Abbildung 39. Schematische Darstellung 4PB.

Wesentliches Kriterium bei der Ermüdungsprüfung ist die Anzahl der Lastwechsel, bis der Probekörper den Zustand der Ermüdung erreicht hat. Dies ist der Fall, wenn der komplexe Steifigkeitsmodul sich auf die Hälfte des Ausgangswerts verringert hat. Der Ausgangswert der komplexen Steifigkeit wird nach 100 Lastwechsel als $S_{max,0}$ angegeben. Die Anzahl der Lastwechsel bei Erreichen der Ermüdung wird als $N_{f/50}$ bezeichnet. Die Prüfung wird bei +20°C und 30 Hz durchgeführt. In Abbildung 40 sind die Messergebnisse einer Einzelprüfung dargestellt. Die mit dem roten „X“ markierte Stelle ist jener Punkt, wo die Steifigkeit die Hälfte von $S_{max,0}$ erreicht hat und somit die Anzahl der Lastwechsel bei Erreichen der Ermüdung $N_{f/50}$ definiert wird. Es werden drei Dehnungsstufen ausgewählt, bei jeder Dehnungsstufe werden 6 Probekörper geprüft. Damit ergeben sich 18 Einzelprüfungen pro Mischgut. Die in der Dehnungsstufe angegeben Dehnung bezieht sich auf die maximale horizontale Dehnung an der Unterseite des Probekörpers. Die Dehnungsstufen werden in der Regel so gewählt, dass die Ermüdung nach 10^4 bis $2*10^6$ Lastwechsel auftritt.

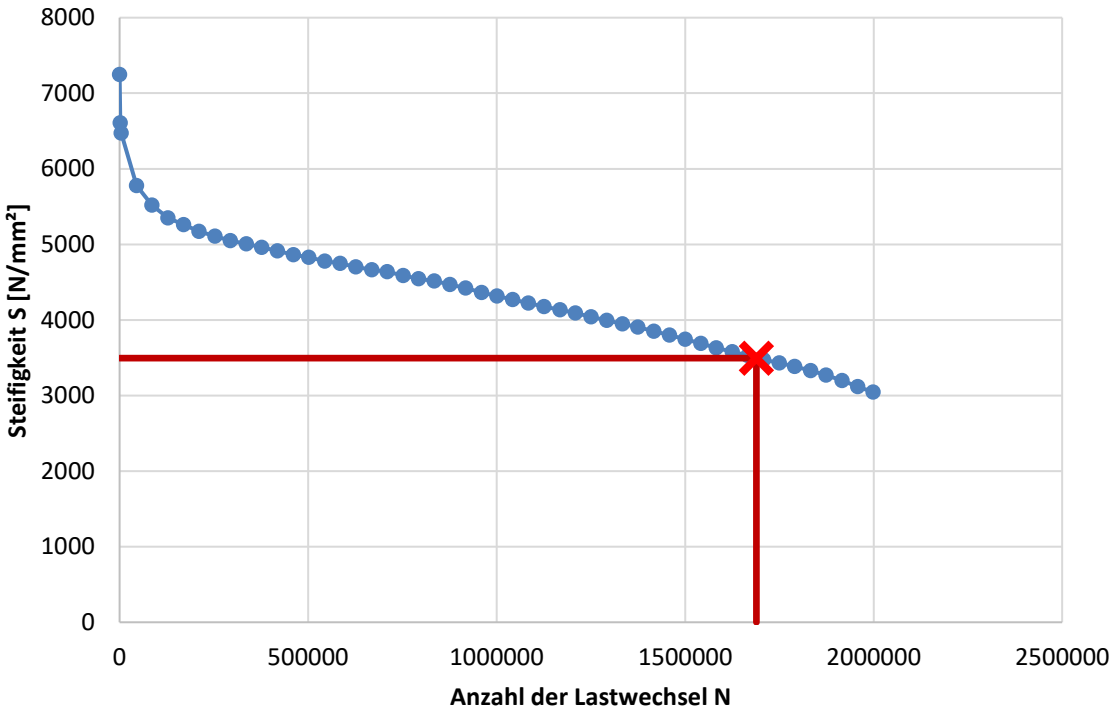


Abbildung 40: Einzelprüfungen eines Asphaltprobekörpers mit Ermüdungspunkt

Anhand der Ergebnisse dieser Prüfungen kann eine Wöhlerkurve erstellt werden, aus welcher der nach Norm angegebene Wert ε_6 abgelesen werden kann. Dieser Wert gibt jene Dehnungsamplitude an, die notwendig ist, um eine Million Lastwechsel zu erreichen, bis ein Probekörper gemäß des Versagenskriteriums den Zustand der Ermüdung erreicht. In Abbildung 41 ist eine solche Wöhlerkurve mit dem entsprechenden Prüfergebnis dargestellt. Im gegenständlichen Projekt wurden 14 verschiedene Asphaltmischungen getestet. Dies ergäbe einen Prüfumfang von 252 Einzelprüfungen. Deshalb musste aus ressourcentechnischen und projekttechnischen Gründen der Prüfumfang eingeschränkt werden. Demnach wurden zwei Asphaltmischungen vollständig geprüft. Bei allen weiteren Labormischungen wurde die Ermüdungsbeständigkeit durch 6 Einzelprüfungen pro Mischgut bestimmt. Im Falle einer zu großen Streuung wurden weitere Probekörper getestet, bis das Prüfergebnis eine aussagekräftige Genauigkeit erreichte. Insgesamt wurden für dieses Projekt 134 Probekörper getestet.

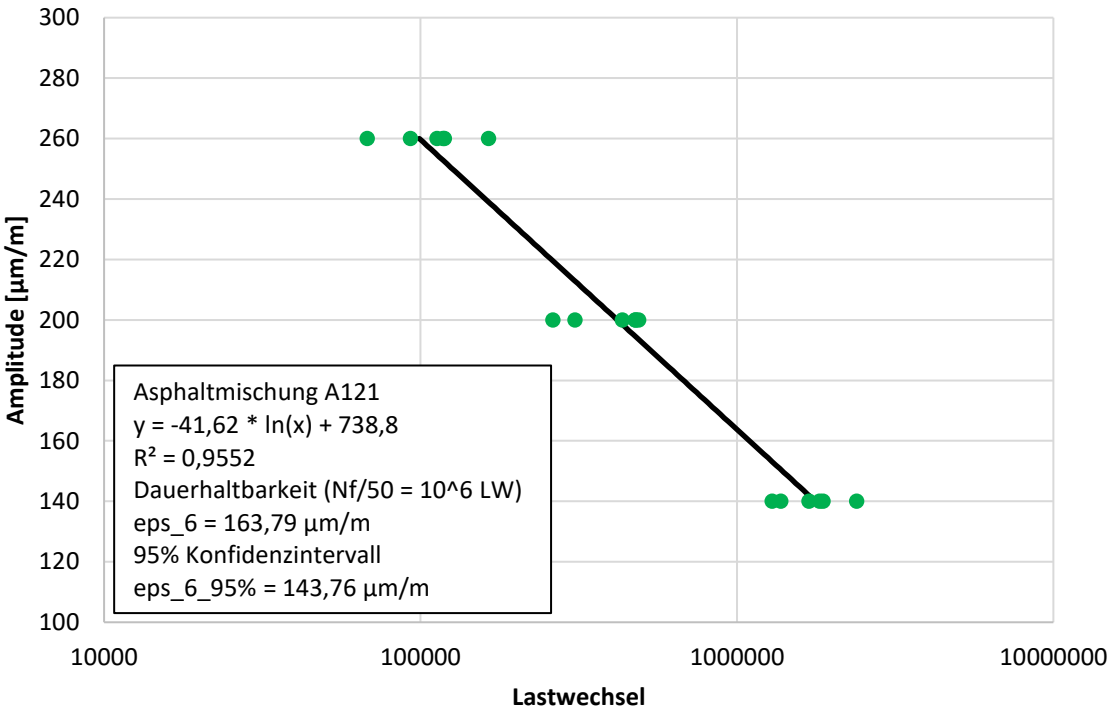


Abbildung 41. Wöhlerkurve der Asphaltmischung A121.

5.1.2.2 Steifigkeitsprüfungen

Im Rahmen der Steifigkeitsprüfungen nach EN 12697-26 (2012) wurde das Verfahren nach Anhang B (4-PB) angewendet. Dabei wird ein prismatischer Probekörper einer periodischen, dehnungsgesteuerten 4-PB-Prüfung mit freier Rotation und horizontaler Translation an allen Belastungs- und Reaktionspunkten unterzogen. Die Biegung wird durch die Bewegung der mittigen Lastpunkte in vertikaler Richtung senkrecht zur Längsachse des Probekörpers erreicht. Die vertikale Lage der beiden Endpunkte bleibt erhalten. Die ausgeübte periodische Verschiebung erfolgt symmetrisch zum Nullpunkt, ist sinusförmig, und die Verschiebungsamplitude muss als Funktion der Zeit konstant sein. Während der Prüfung wird die für die Verformung des Probekörpers erforderliche Kraft als Funktion der Zeit gemessen. Daraus wird der Steifigkeitsmodul des Mischguts berechnet. Als Ergebnis wird der Betrag der dynamischen Steifigkeit |E*| in MPa (siehe Abbildung 42), dessen elastischer (E1) und viskoser (E2) Anteil (siehe Abbildung 43) und der Phasenwinkel (δ) (siehe Abbildung 44) in Abhängigkeit der Frequenz angegeben. Das genaue Formelwerk zur Berechnung der Kennwerte ist in der gegenständlichen Norm nachzulesen. Um den Probekörper während der Steifigkeitsprüfung nicht zu schädigen, wird die horizontale Dehnung an der

Unterseite des Probekörpers mit 35 µm/m begrenzt. Die Prüftemperatur beträgt +20°C. Tabelle 15 zeigt die Prüffrequenzen, die während des Steifigkeitsversuchs durchlaufen werden.

Tabelle 15: Prüffrequenzen der Steifigkeitsprüfung am 4PB

Frequenz [Hz]	0,1	1,0	3,0	5,0	8,0	10,0	20,0	30,0	40,0

Die Steifigkeitsprüfungen erfolgen im Regelfall vor jeder Ermüdungsprüfung am 4-PB. Somit wurden ebenfalls 134 Probekörper auf ihr Steifigkeitsverhalten geprüft.

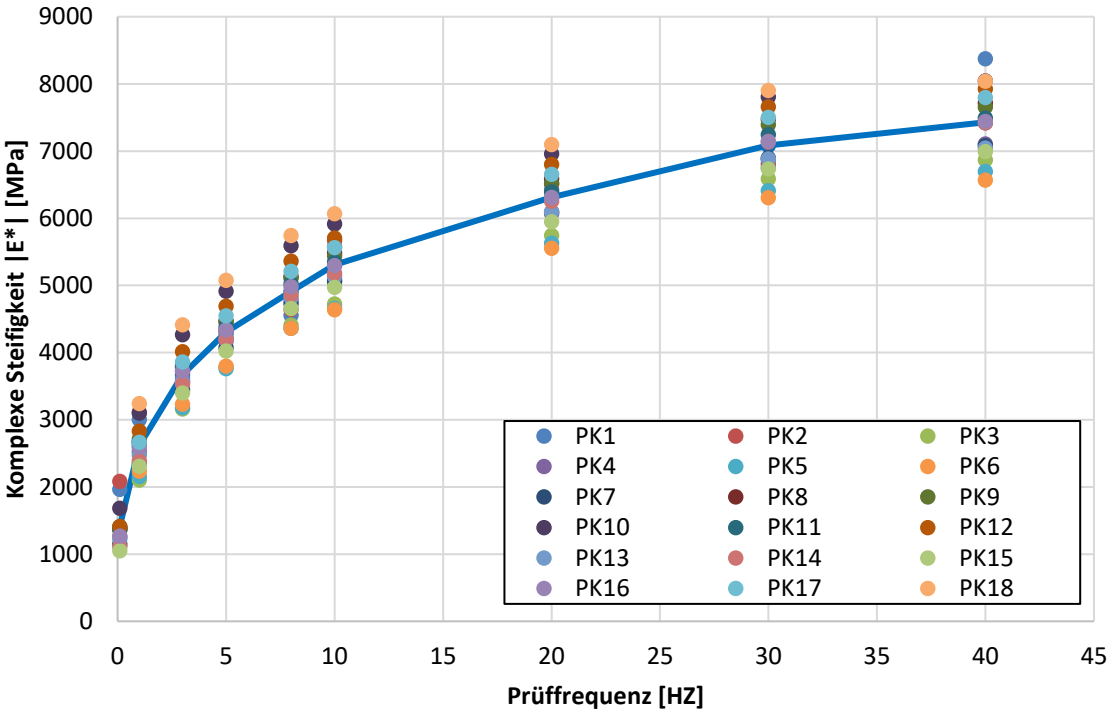


Abbildung 42. Ergebnis für |E*| der Steifigkeitsprüfung der Asphaltmischung A121.

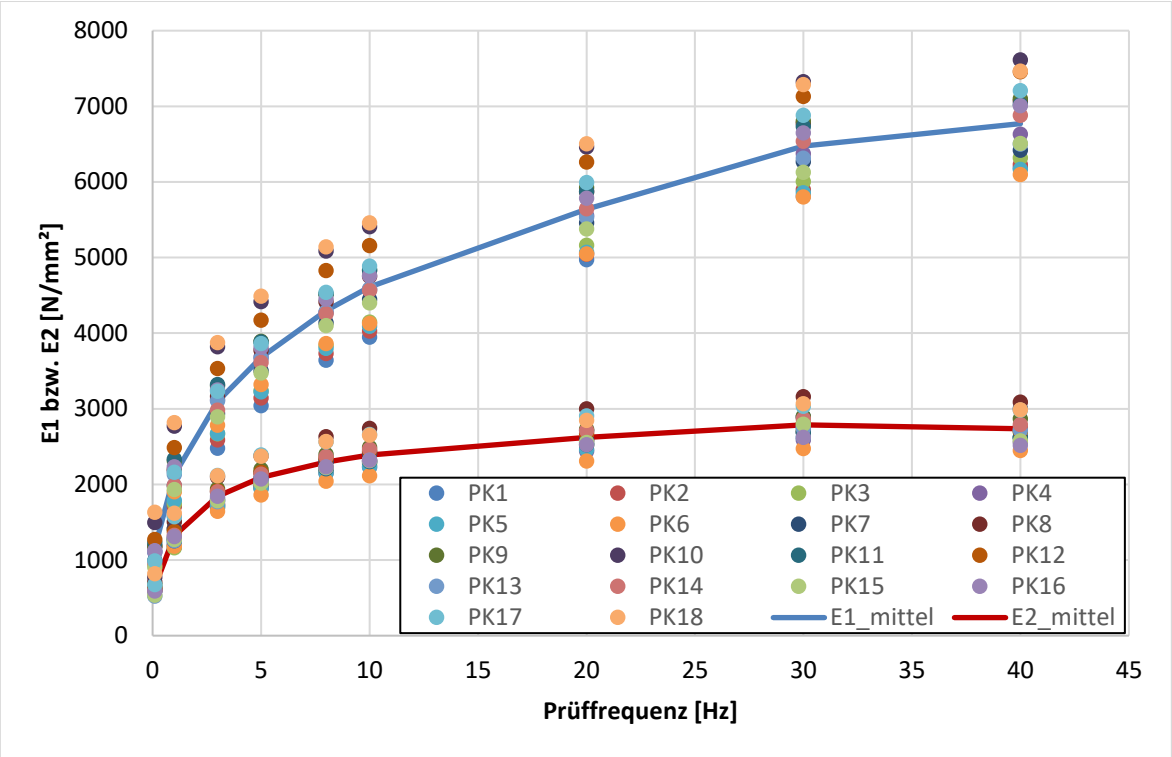


Abbildung 43. Ergebnis für den elastischen (E1) und viskosen (E2) Anteil der Steifigkeits-prüfung der Asphaltmischung A121.

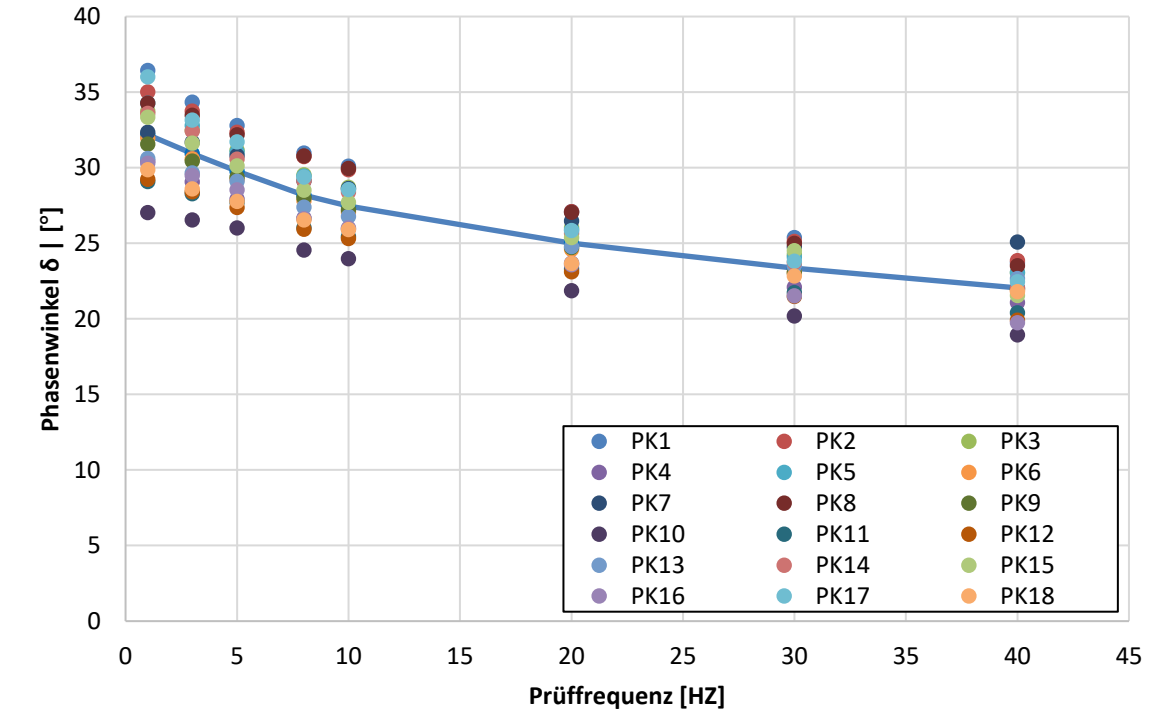


Abbildung 44. Ergebnis für δ der Steifigkeitsprüfung der Asphaltmischung A121.

5.1.2.3 Verformungsprüfungen

Mithilfe der zyklischen triaxialen Druckschwellprüfung (TCCT) wird die Beständigkeit des Mischguts gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen beschrieben (Spurbildungsresistenz). Dies erfolgt nach EN 12697-25 (2016), Teil B. Ein auf Prüftemperatur temperierter zylindrischer Probekörper wird zwischen zwei planparallelen Lastplatten angeordnet. Der Probekörper wird einem konstanten Seitendruck σ_c zur Behinderung der Querdehnung ausgesetzt, der von einem zyklischen Axialdruck $\sigma_a(t)$ überlagert wird wie in Abbildung 45 dargestellt.

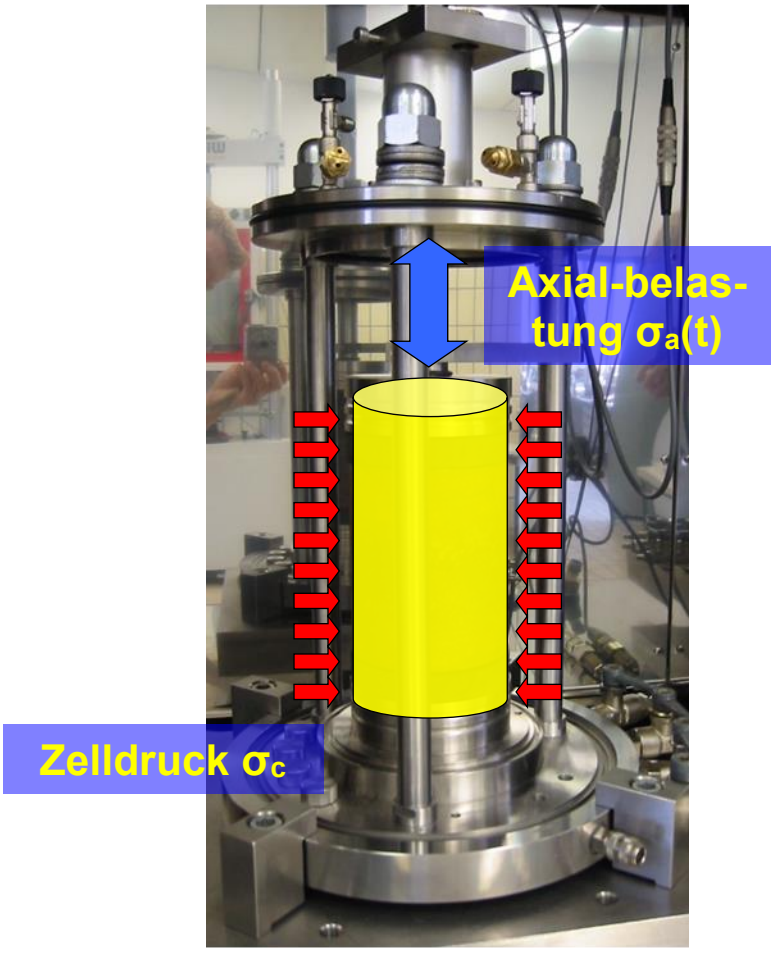


Abbildung 45. Versuchsschemata der TCCT-Prüfung.

Während der Prüfung wird die Änderung der Höhe des Probekörpers gemessen. Daraus wird die Gesamtaxialverformung (bleibende Verformung) des Probekörpers als Funktion der Anzahl an Lastwechsel bestimmt. Die Ergebnisse werden in einer Kriechkurve dargestellt. Daraus werden die Kriecheigenschaften des Probekörpers berechnet. Dafür wird an den quasilinearen Teil der Kriechkurve eine Gerade durch Regression der Form

$$\varepsilon_n = A_1 + B_1 \cdot n \qquad \text{Gl. 7}$$

angepasst. Mit ε_n wird die bleibende Gesamtaxialverformung des Probekörpers nach n Lastwechsel in Prozent (%) bezeichnet. Die Kriechrate f_c [µm/m/n] ist die mit 10^4 erweiterte Steigung der Linearen B_1. In Abbildung 46 ist das Prüfergebnis eines Asphaltprobekörpers abgebildet. Die schwarze Linie entspricht den Messwerten, die rote punktierte Linie der Regressionskurve mittels Potenzfunktion. Die grün strichlierte Linie ist die Lineare B_1, mit deren Hilfe die mit 10^4 erweiterte Steigung berechnet und somit die Kriechrate f_c [µm/m/n] angegeben werden kann.

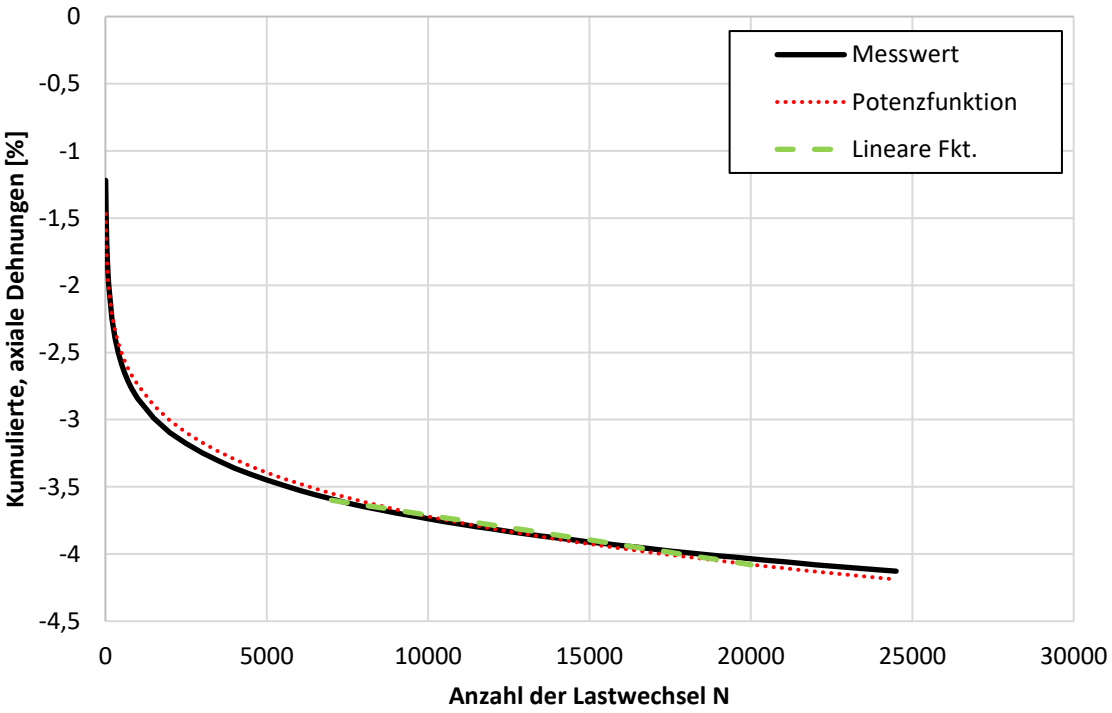


Abbildung 46. Prüfergebnis eines TCCT-Versuches.

Die Probekörper sind Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm. Pro Mischgut werden im Regelfall 3 Einzelprüfungen durchgeführt und als Gesamtergebnis der Mittelwert aus diesen 3 Einzelprüfungen angegeben. Die Prüfbedingungen sind nach EN 13108-20 festzulegen (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Prüfbedingungen für TCCT-Versuch

	Deckschicht
Prüftemperatur [°C]	50
Prüffrequenz [Hz]	3
Stützdruck [kPa]	150
Axialspannungsamplitude [kPa]	300
Lastwechselzahl [-]	25.000

Für dieses Projekt wurden 16 verschiedene Asphaltmischungen geprüft. Insgesamt wurden 50 Probekörper getestet, wobei alle Versuche mit dem Bitumen 50/70 und 70/100 des Herstellers 2 keine verwertbaren Ergebnisse erbracht haben. Das Asphaltmischgut wurde nach deutschen Richtlinien konzipiert mit deutlich höheren Bindemittelgehalten (5.9 M%) als in Österreich üblich (5.1 bis 5.3 M%). Zufolge des hohen Bindemittelgehalts verformten sich die Probekörper während den Prüfungen zu stark. Somit konnten keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden. Nach mehrmaligen Fehlschlägen bei diesen Asphaltmischungen wurden auf das Testen der weiteren Probekörper mit diesen Bitumen verzichtet.

5.2 Untersuchungsergebnisse

5.2.1 Performanceprüfungen an Bitumen und Mastix

5.2.1.1 Ermüdungsprüfungen

Als Ergebnis der Ermüdungsprüfungen wird die Lastwechselzahl gewertet, bei der der Phasenwinkel ein Maximum erreicht. Die Prüfung erfolgt bei +10 °C mit Schubspannungen von 300, 400, 500, 600 oder 700 kPa. Insgesamt wurden 18 verschiedene Mastixproben gemäß Tabelle 3 mit je 9 Einzelprüfungen geprüft. Somit wurden insgesamt 162 Mastixermüdungsprüfungen durchgeführt. Aus den Lastwechselzahlen lässt sich für jede Mastix eine Wöhlerlinie konstruieren, aus der wiederum der Kennwert τ_6 ermittelt werden kann, der die notwendige Schubspannung angibt, bei welcher die Mastix bei 10^6 Lastwechsel aufgrund der Ermüdung versagt. In den Abbildungen 47 bis 51 sind die Wöhlerkurven zu allen getesteten Mastixproben dargestellt.

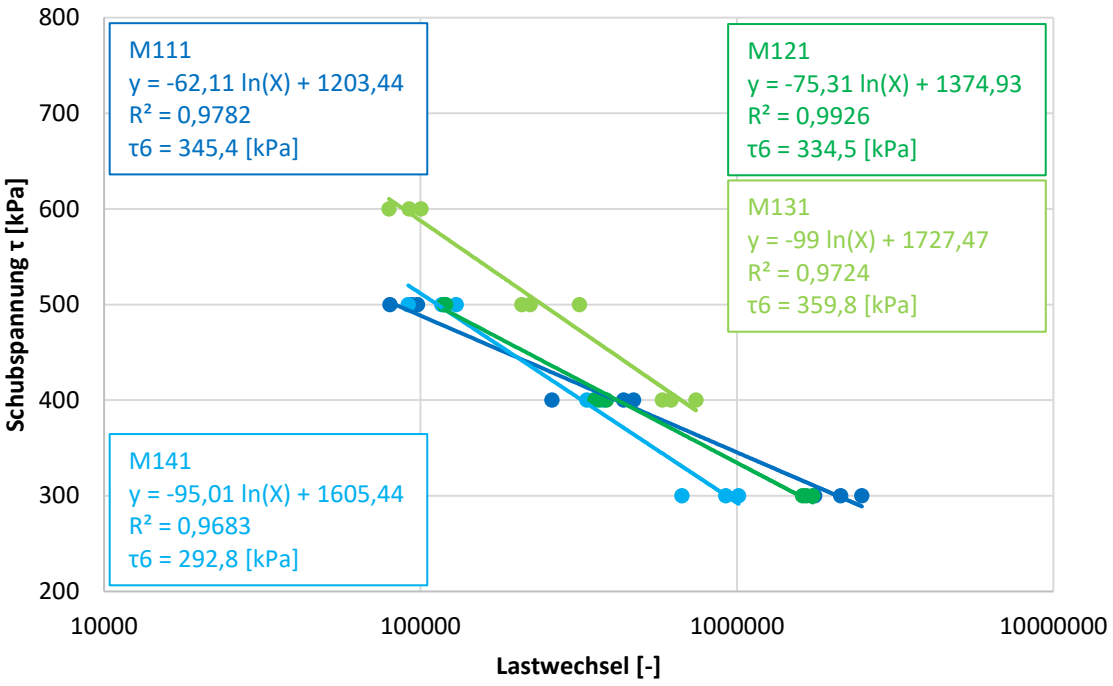


Abbildung 47. Wöhlerkurven der Mastix M111 bis M141.

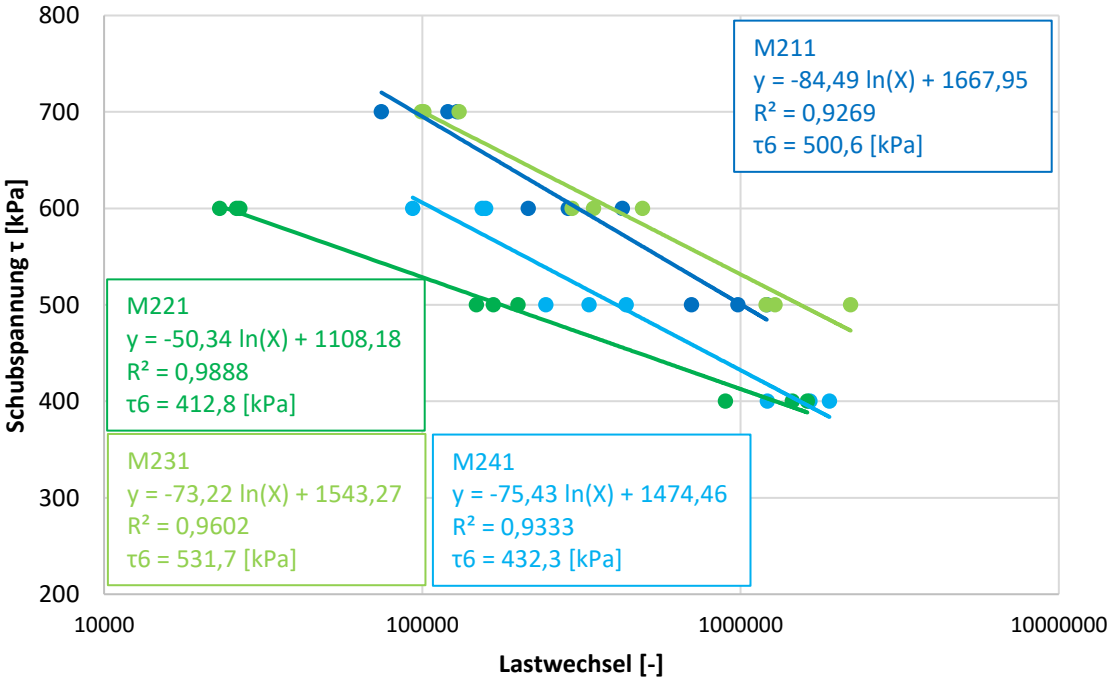


Abbildung 48. Wöhlerkurven der Mastix M211 bis M241.

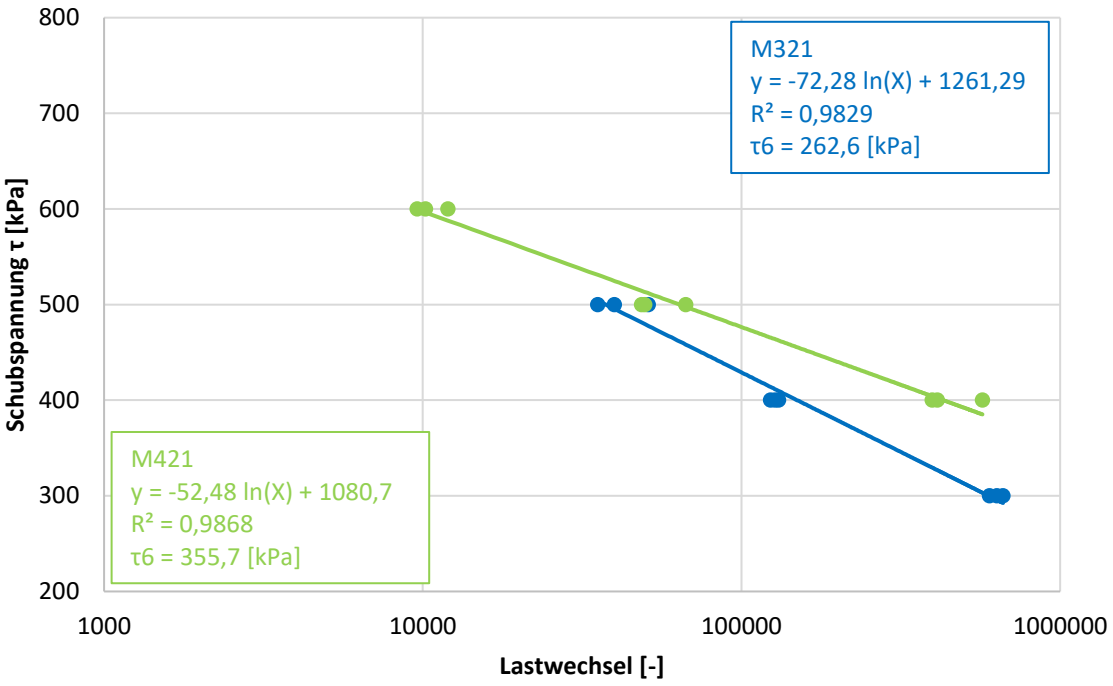


Abbildung 49. Wöhlerkurven der Mastix M321 und M421.

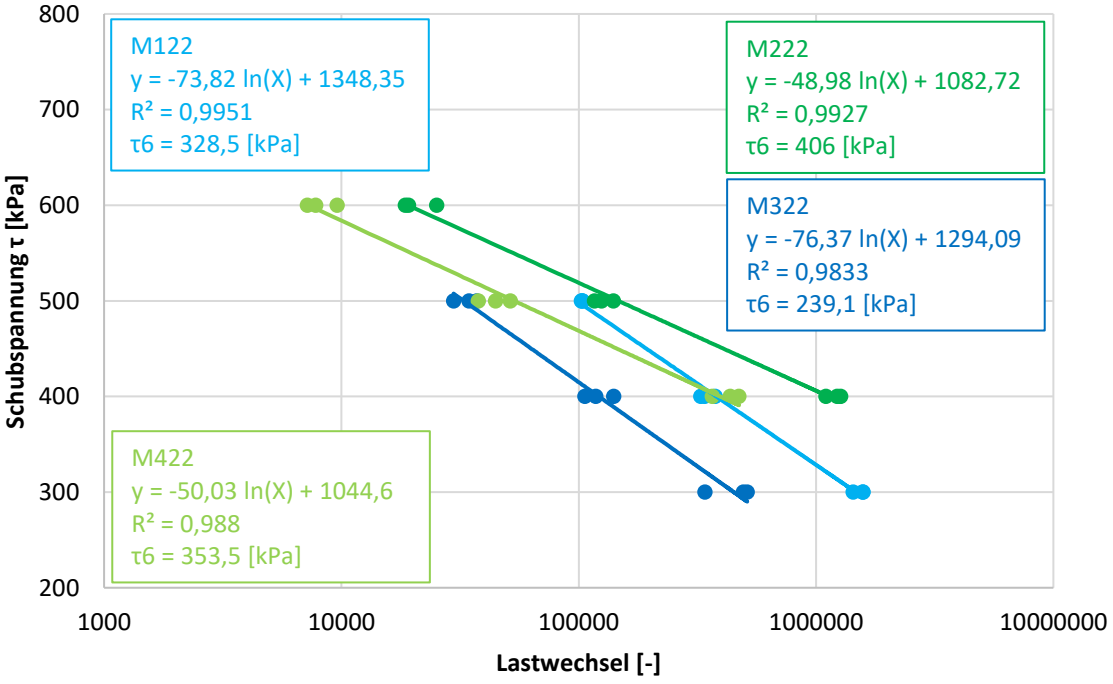


Abbildung 50. Wöhlerkurven der Mastix M122 bis M422.

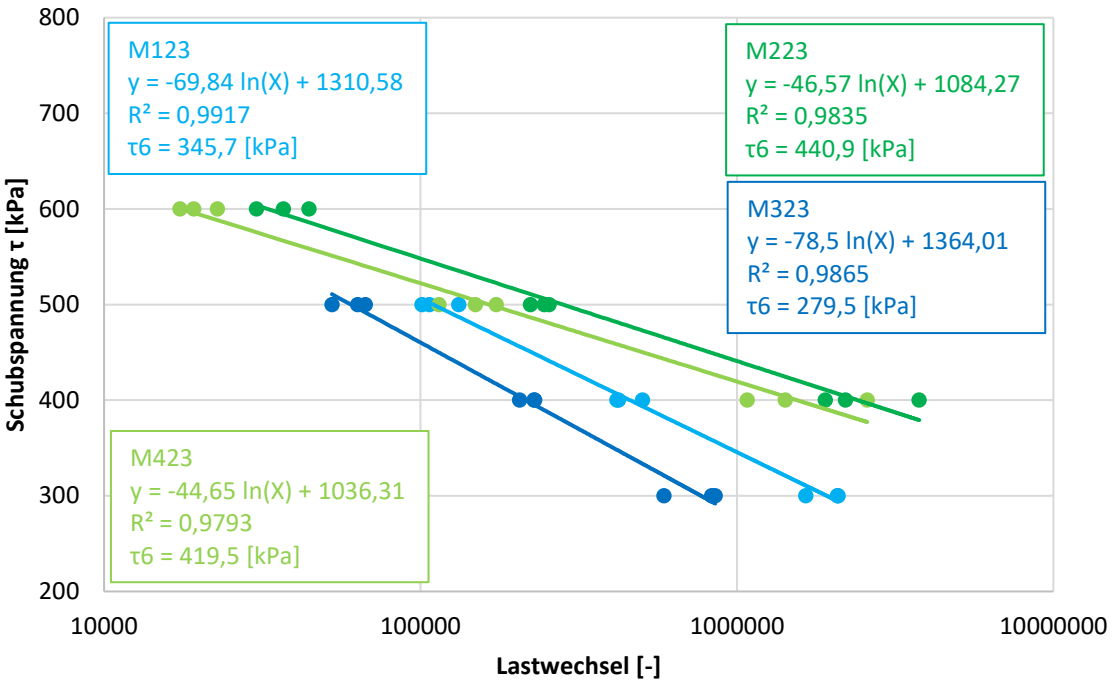


Abbildung 51. Wöhlerkurven der Mastix M123 bis M423.

Als Beurteilungskriterium für die Ermüdungsprüfung wurde der τ_6-Wert festgelegt. Dieser entspricht dem Äquivalent zur Ermüdungsprüfung an Asphaltprobekörpern, bei dem die Amplitude als Bewertungskriterium herangezogen wird, bei der 10^6 Lastwechsel erreicht werden. In Abbildung 52 sind alle τ_6-Werte zum Vergleich in einem Diagramm dargestellt. Alle grünen Balken sind Mastixproben mit polymermodifiziertem Bitumen und alle blauen Balken mit Straßenbaubitumen. Man kann erkennen, dass Mastix mit polymermodifiziertem Bitumen stets eine deutlich höhere Ermüdungsbeständigkeit aufweisen als Mastix mit Straßenbaubitumen des gleichen Herstellers. Des Weiteren zeigen die Mastix mit polymermodifiziertem Bitumen im Allgemeinen meist eine höhere Ermüdungsbeständigkeit als Mastix mit Straßenbaubitumen. Für dieses entwickelte Prüfverfahren im DSR steht eine detaillierte Arbeitsanleitung als Anhang zu diesem Ergebnisbericht zur Verfügung.

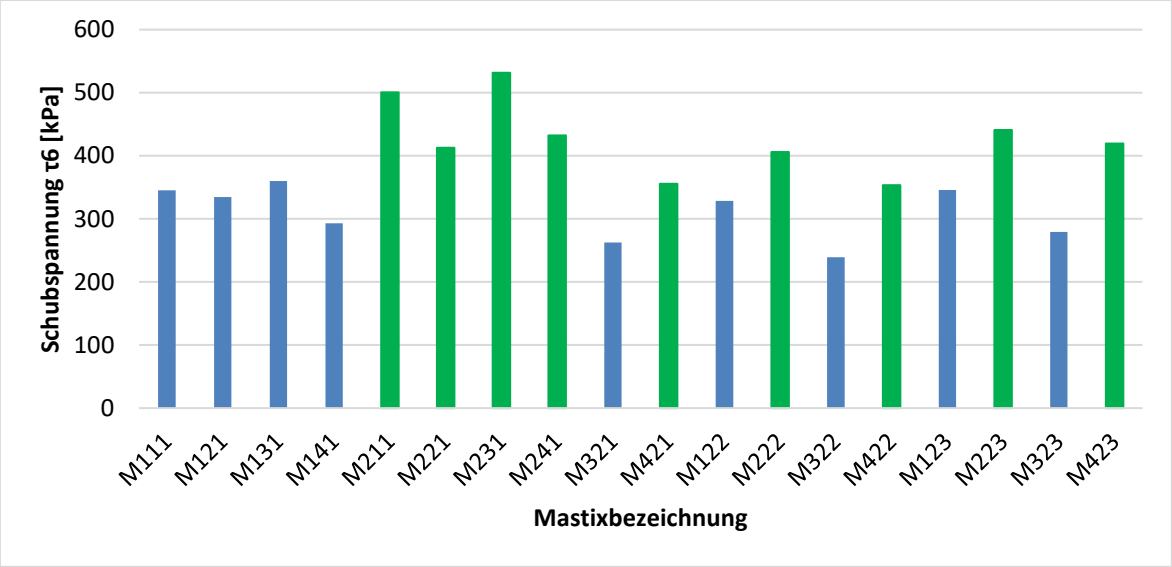


Abbildung 52. Vergleich der τ_6-Werte aller Mastixvarianten (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

5.2.2 Performanceprüfungen an Asphalt

5.2.2.1 Ermüdungsprüfungen

Als Ergebnis der Ermüdungsprüfungen wird die Lastwechselzahl gewertet, bei der die Steifigkeit die Hälfte der Anfangssteifigkeit $S_{max,0}$ (Steifigkeit nach 100 Lastwechsel) erreicht. Die Prüfung erfolgt bei +20 °C mit Amplituden von 140, 200, 260, 320 oder 380 µm/m. Insgesamt wurden 14 verschiedene Asphalte gemäß Variantenbezeichnung nach Tabelle 3 geprüft.

Als Beurteilungskriterium für die Ermüdungsprüfung wurde der ε_6-Wert gemäß EN 12697-24 herangezogen. Aus den Lastwechselzahlen lässt sich für jede Asphaltsorte eine Wöhlerlinie konstruieren, aus der wiederum der ε_6-Wert ermittelt werden kann, der die notwendige Amplitude angibt, bei welcher der Asphalt bei 10^6 Lastwechsel aufgrund der Ermüdung versagt. In den Abbildungen 53 bis 56 sind alle Wöhlerlinien für die 14 getesteten Asphalte dargestellt inklusive der jeweiligen ε_6-Werte.

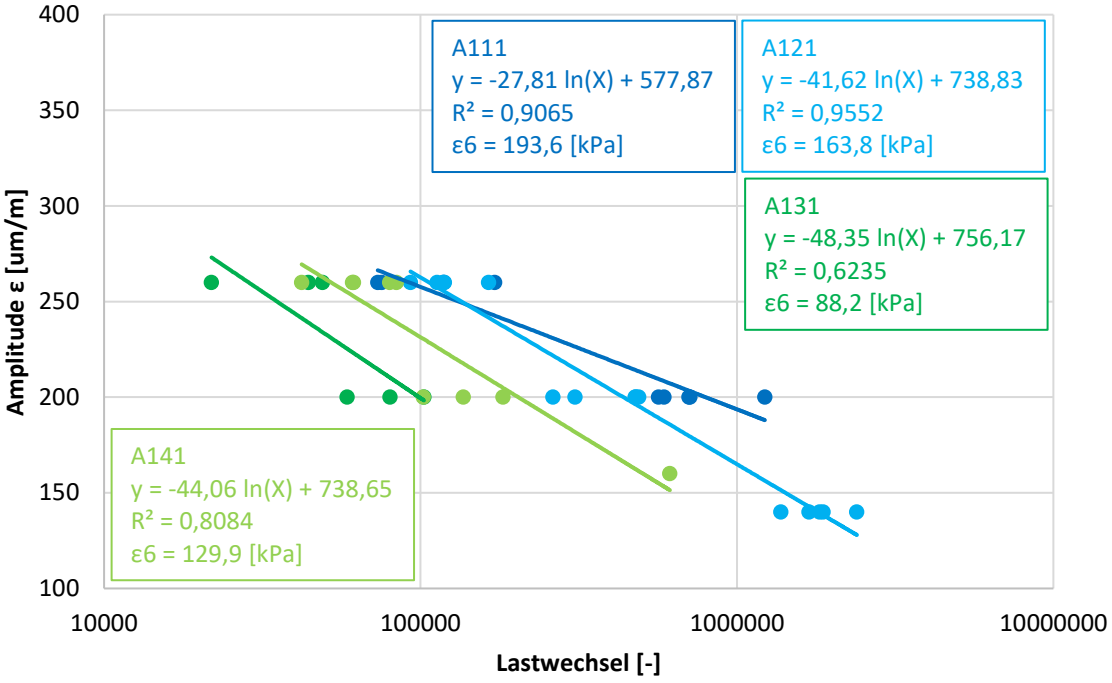


Abbildung 53. Wöhlerkurven der Asphalte A111 bis A141.

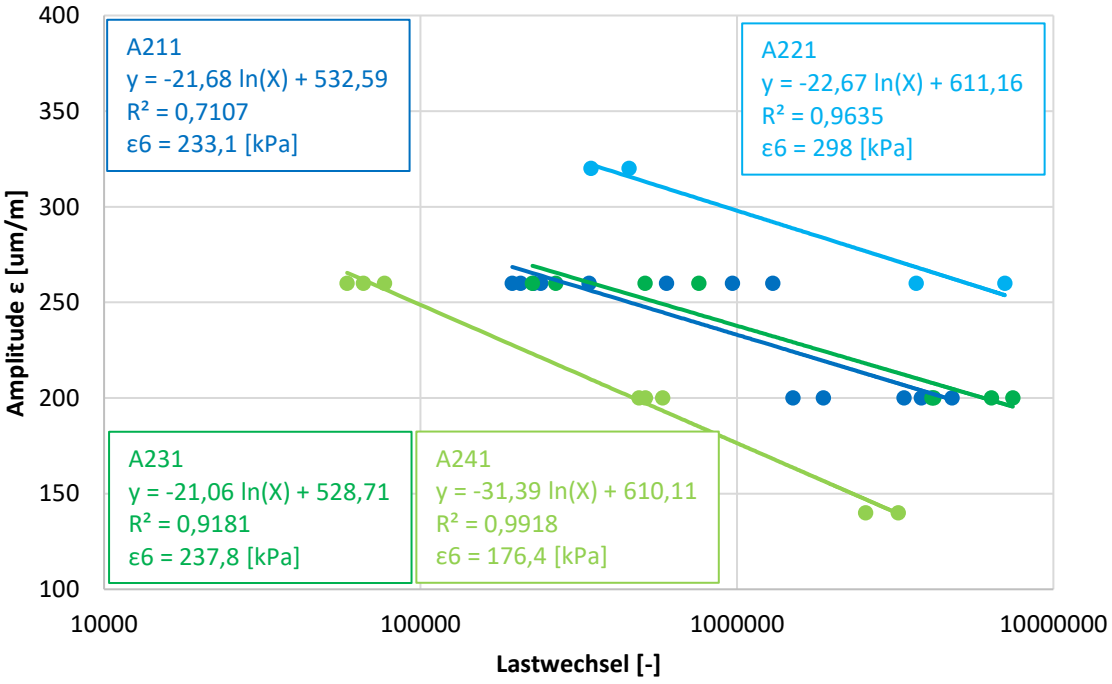


Abbildung 54. Wöhlerkurven der Asphalte A211 bis A241.

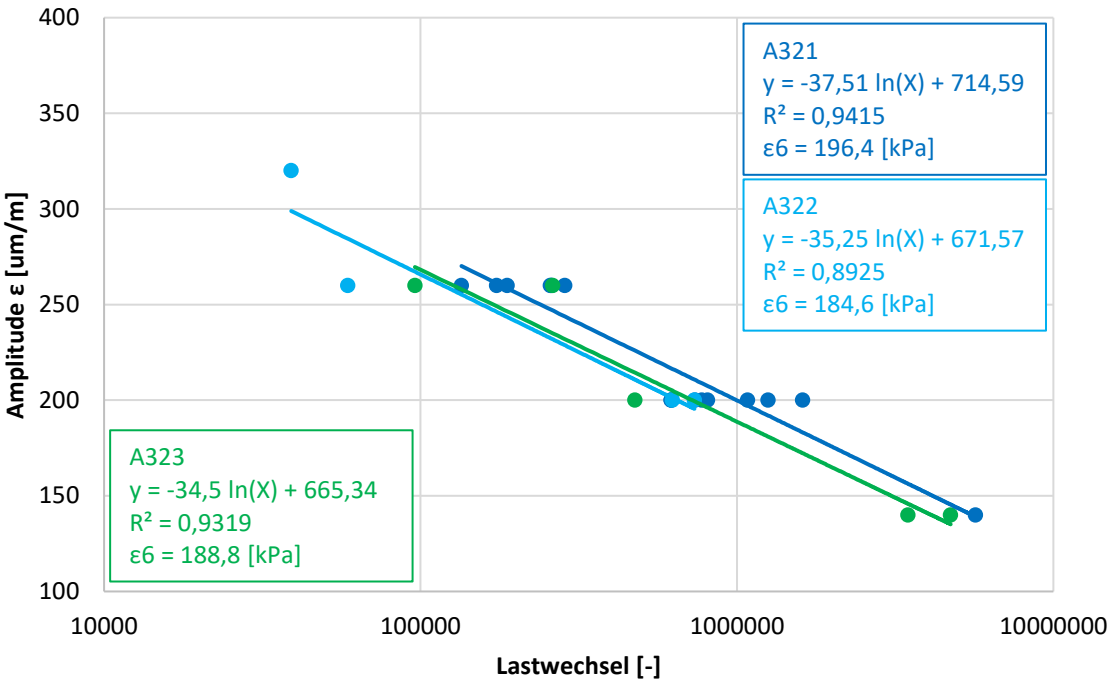


Abbildung 55. Wöhlerkurven der Asphalte A321 bis A323.

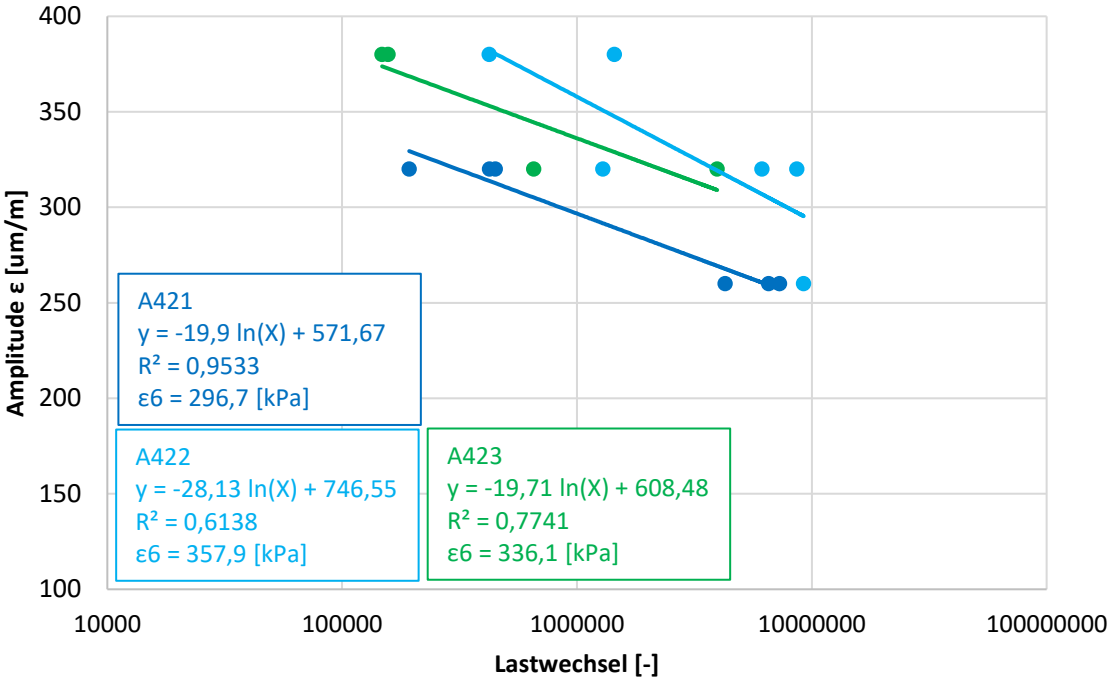


Abbildung 56. Wöhlerkurven der Asphalte A421 bis A423.

In Abbildung 57 sind alle ε_6-Werte zum Vergleich in einem Diagramm dargestellt. Alle grünen Balken sind Asphalte mit unterschiedlichen polymermodifizierten Bitumenproben und

alle blauen Balken mit unterschiedlichen Straßenbaubitumen. Die hellblauen Balken sind Asphalte mit dem Bitumen 70/100 des Herstellers 2 und alle hellgrünen Balken sind Asphalte mit dem polymermodifiziertem Bitumen PmB 45/80-65 des Herstellers 2. Man kann erkennen, dass Asphalte mit polymermodifiziertem Bitumen stets eine deutlich höhere Ermüdungsbeständigkeit aufweisen als Asphalte mit Straßenbaubitumen des gleichen Herstellers. Des Weiteren zeigen die Asphalte mit polymermodifiziertem Bitumen im Allgemeinen meist eine höhere Ermüdungsbeständigkeit als Asphalte mit Straßenbaubitumen.

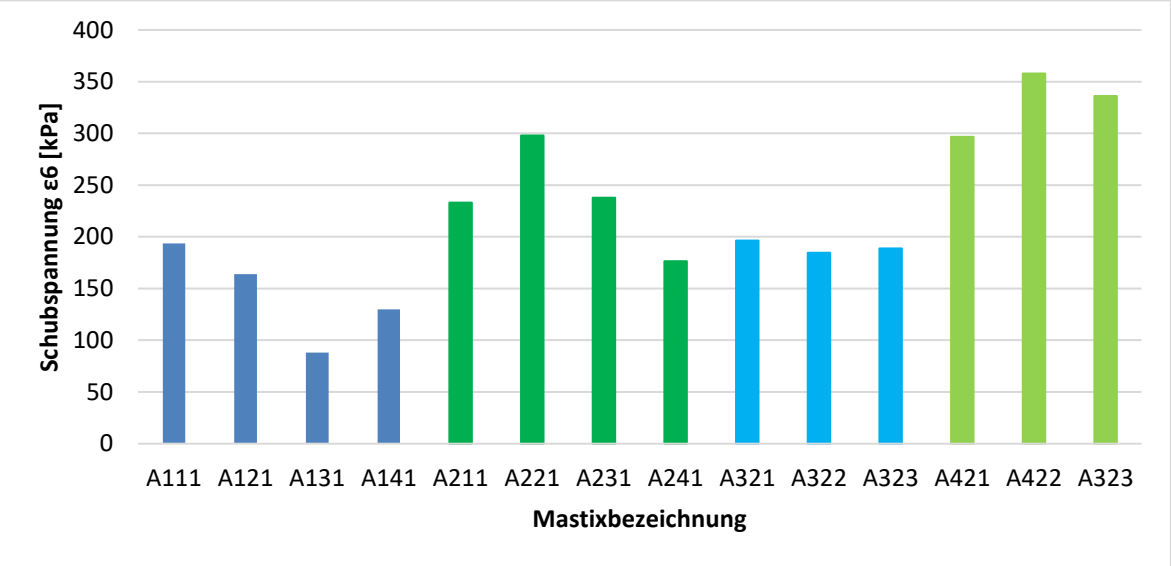


Abbildung 57. Vergleich der ε_6-Werte aller Asphalte (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

5.2.2.2 Steifigkeitsprüfungen

Die Steifigkeitsprüfungen erfolgen jeweils vor der Ermüdungsprüfung am 4-Punkt-Biegebalken. Die Prüfungen erfolgen bei einer Amplitude von 35 µm/m um den Probekörper nicht zu schädigen und bei einer Prüftemperatur von +20 °C. Dabei wird die dynamische Steifigkeit |E*| in MPa und der Phasenwinkel (δ) in Grad bei den Prüffrequenzen 0,1; 1; 3; 5; 8; 10; 20; 30 und 40 Hz ermittelt. In Abbildung 58 sind alle dynamischen Steifigkeiten |E*| von den insgesamt 134 Tests zusammengefasst. Die blauen Linien sind Asphalte mit unterschiedlichen Straßenbaubitumen der Sorte 50/70, die grünen Linien sind Asphalte mit unterschiedlichen polymermodifizierten Bitumen der Sorte PmB 25/55-55, die orangenen Linien sind Asphalte mit dem Bitumen der Sorte 70/100 des Herstellers 2 und die grauen Linien sind Asphalte mit dem polymermodifiziertem Bitumen der Sorte PmB 45/80-65 des Herstellers 2.

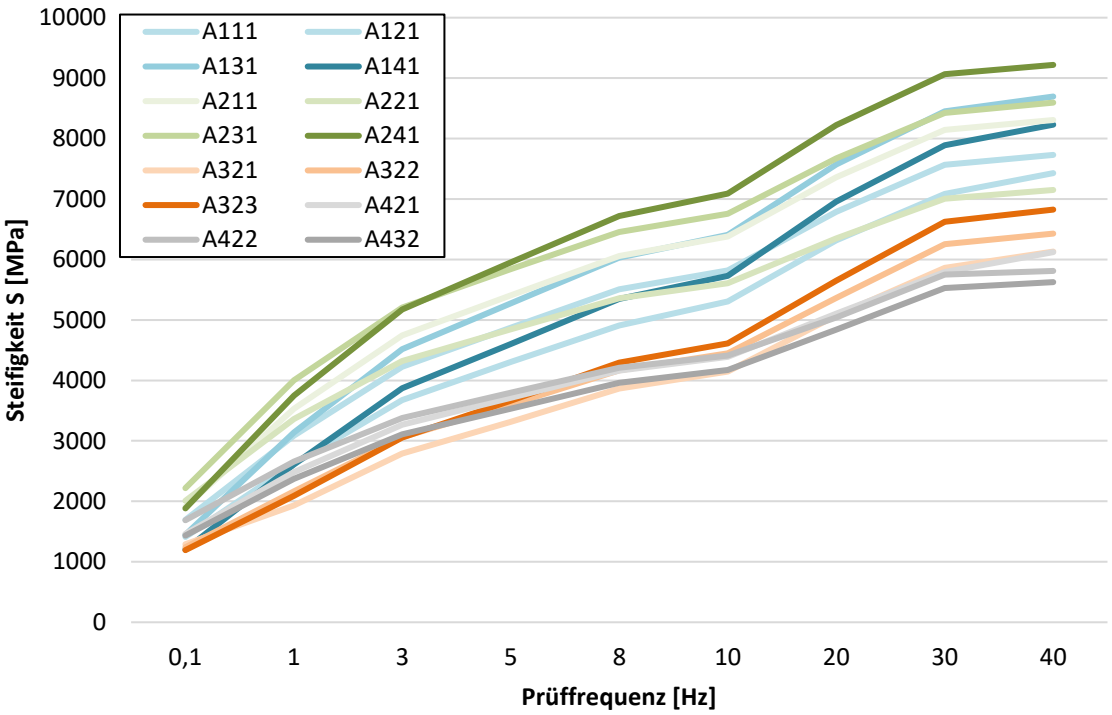


Abbildung 58. Ergebnisse der Prüfungen für die dynamische Steifigkeit (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

In Abbildung 59 sind alle Phasenwinkel der insgesamt 134 Tests zusammengefasst. Auch hier sind die blauen Linien Asphalte mit unterschiedlichen Straßenbaubitumen der Sorte 50/70, die grünen Linien Asphalte mit unterschiedlichen polymermodifizierten Bitumen der Sorte PmB 25/55-55, die orangen Linien Asphalte mit dem Bitumen der Sorte 70/100 des Herstellers 2 und die grauen Linien Asphalte mit dem polymermodifiziertem Bitumen der Sorte PmB 45/80-65 des Herstellers 2.

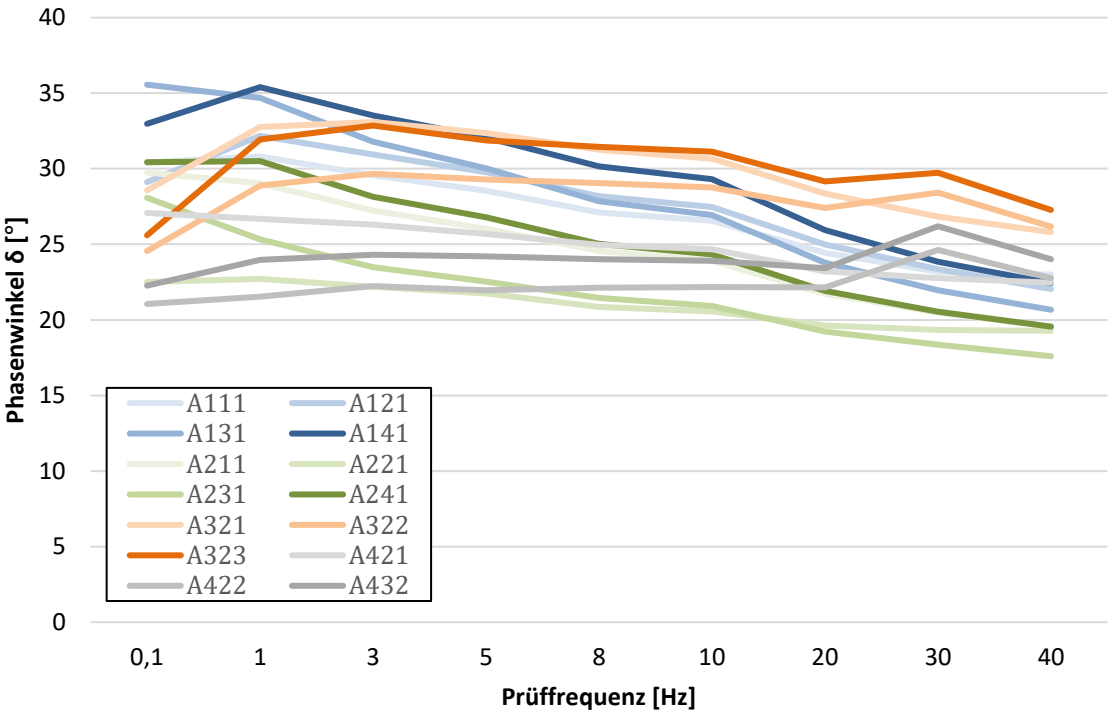


Abbildung 59. Ergebnisse der Prüfungen für den Phasenwinkel (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

5.2.2.3 Verformungsprüfungen

Als Ergebnis der zyklischen triaxialen Druckschwellprüfung wird zum einem der Verlauf der kumulierten, axialen Dehnung während eines Versuches aufgezeichnet. In Abbildung 60 ist jeweils der Mittelwert aus denen zu einer Asphaltsorte geprüften Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm dargestellt.

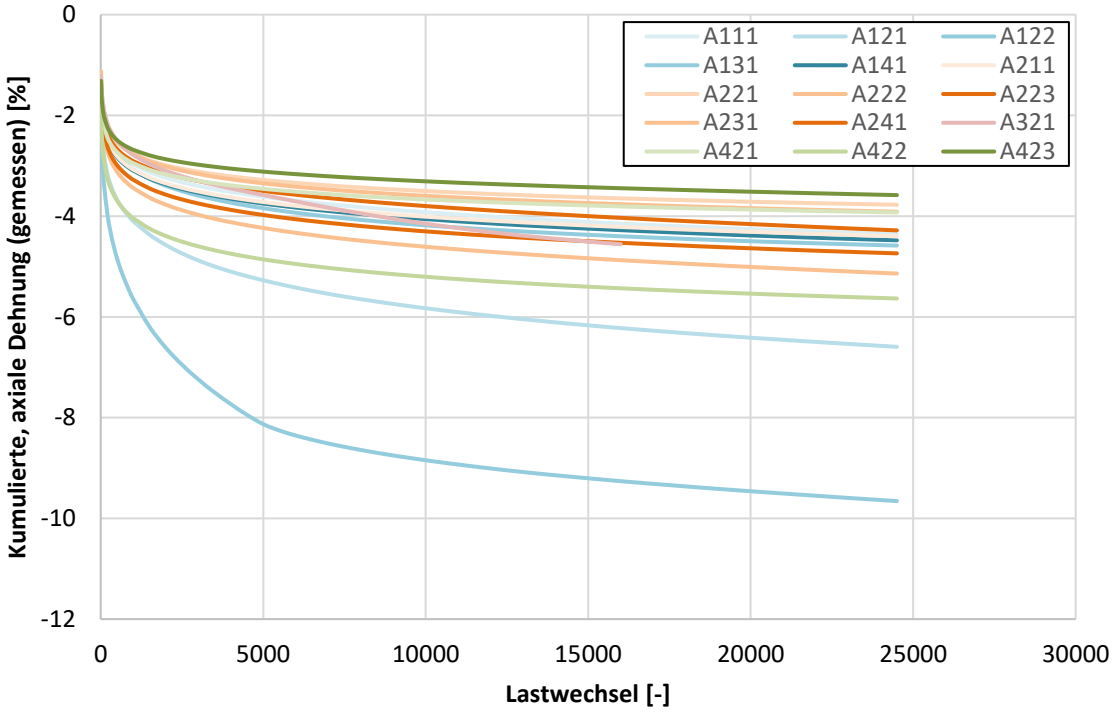


Abbildung 60. Mittelwert der axialen Dehnung der geprüften Asphaltsorten (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

Neben dem Verlauf werden auch der Norm entsprechend die Werte für die kumulierte, axiale Dehnung nach 10.000 Lastwechsel sowie die Kriechrate f_c für jede Asphaltsorte im Zuge der Prüfungen berechnet. In Abbildung 61 ist der Mittelwert der kumulierten, axialen Dehnung nach 10.000 Lastwechsel für jede Asphaltsorte gegenübergestellt. In Abbildung 62 ist wiederum die Kriechrate f_c für jede Asphaltsorte gegenübergestellt. Wie auch in den Gegenüberstellungen in den Kapiteln zuvor sind alle grünen Balken Asphalte mit unterschiedlichem polymermodifiziertem Bitumen der Sorte PmB 25/55-55 und alle blauen Balken Asphalte mit unterschiedlichem Straßenbaubitumen der Sorte 50/70. Die hellblauen Balken sind Asphalte mit dem Bitumen 70/100 des Herstellers 2 und alle hellgrünen Balken sind Asphalte mit dem polymermodifiziertem Bitumen PmB 45/80-65 des Herstellers 2.

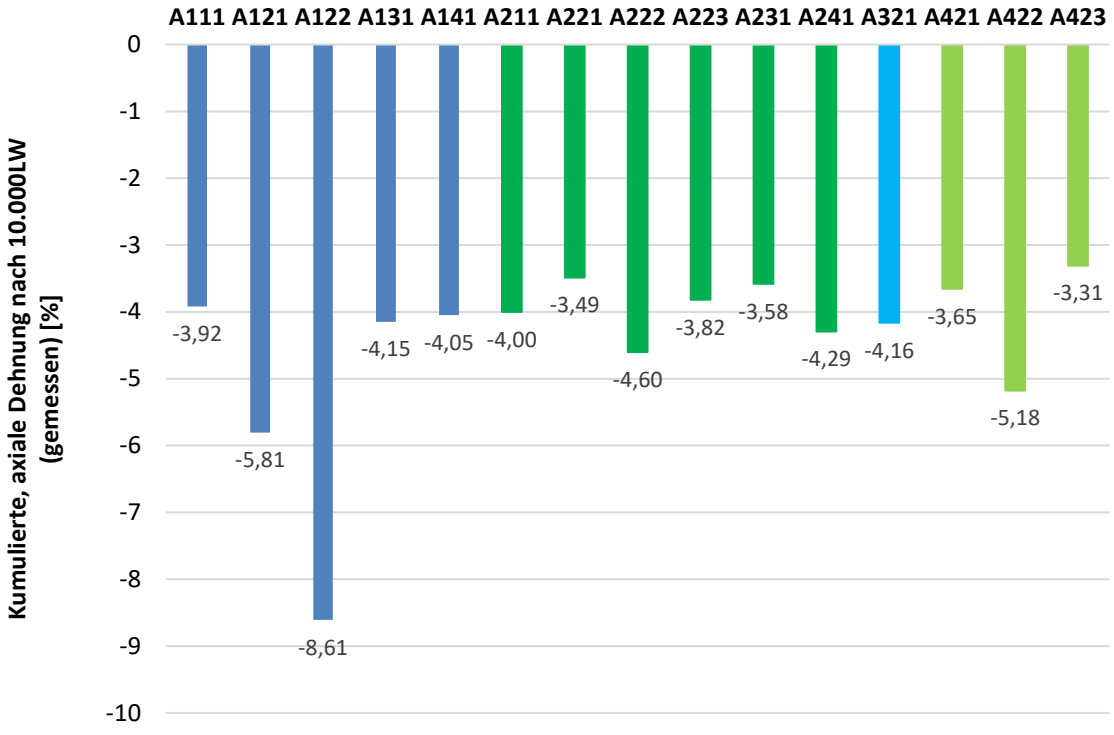


Abbildung 61. Mittelwert der axialen Dehnung nach 10.000 Lastwechsel der geprüften Asphaltsorten (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

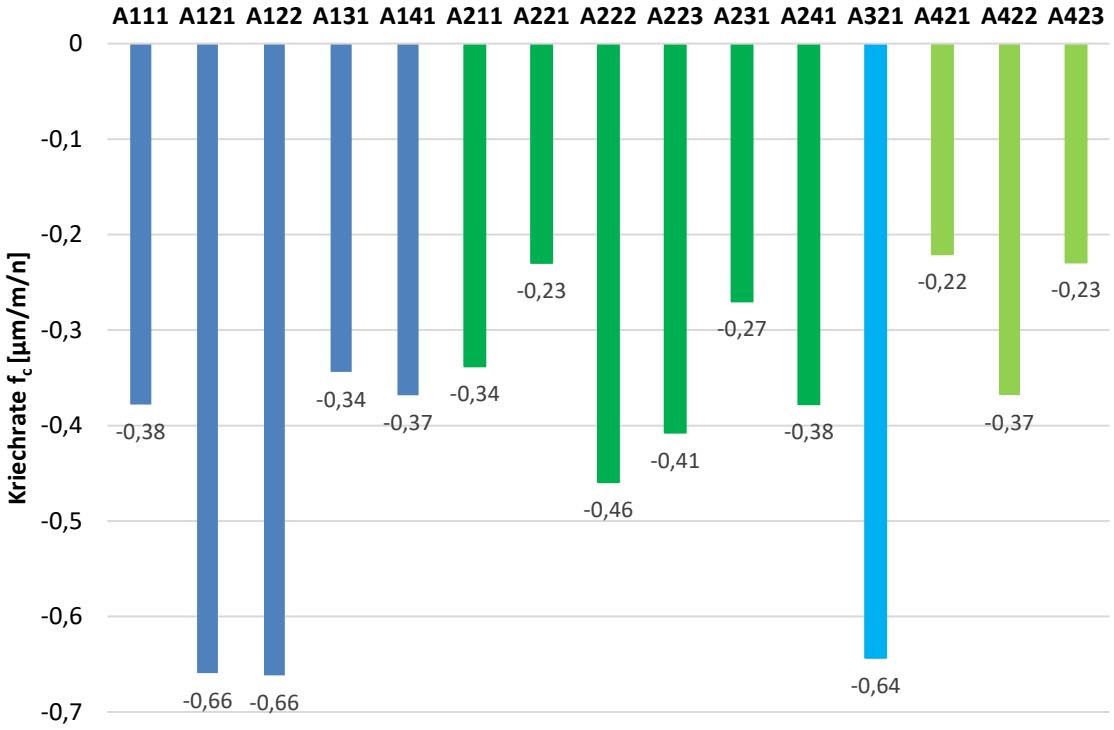


Abbildung 62. Mittelwert der Kriechrate der geprüften Asphaltsorten (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

5.3 Auswertung

5.3.1.1 Ermüdungsprüfungen

Aufgrund der Tatsache, dass es abhängig vom gewählten Gestein zu unterschiedlichen Sieblinien kommt, hat auch jedes Mischgut mit unterschiedlichem Gestein ein unterschiedliches Füller-Bitumen-Verhältnis. Dem entsprechend wird im Rahmen dieser Auswertung der Einfluss des Füller-Bitumen-Verhältnisses auf die Ermüdungsbeständigkeit der Mastix genauer betrachtet. In nachfolgender Tabelle 17 sind zu jedem Mischgut mit unterschiedlichen Lieferanten für das Gestein die dazugehörigen Füller-Bitumen-Verhältnisse gegenübergestellt.

Tabelle 17: Füller-Bitumen-Verhältnisse zu den unterschiedlichen Mischgutsorten

Gabbro	1,33
Porphyr	1,22
Silikat	1,09

Um einen Einfluss der unterschiedlichen Verhältnisse zu untersuchen, werden die Wöhlergeraden mit demselben Bitumen aber unterschiedlichen Füller-Bitumen-Verhältnissen miteinander verglichen. Demnach sollte das höchste Verhältnis zur höchsten oder geringsten Ermüdungsbeständigkeit und dementsprechenden die weiteren Mastixproben gemäß ihrem Füller-Bitumen-Verhältnis gereiht sein. In Abbildung 63 sind vier unterschiedliche Bitumen mit jeweils 3 unterschiedlichen Füller-Bitumen Verhältnissen dargestellt. Alle Linien mit derselben Farbe entsprechen demselben Bitumen. Des Weiteren haben die Wöhlergeraden mit einer durchgezogenen Linie ein F/B-Verhältnis von 1,33, die strichlierte Linie ein F/B-Verhältnis von 1,22 und die punktierte Linie ein F/B-Verhältnis von 1,09. Jedoch kann man erkennen das dieses Verhältnis keinen direkten Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit hat, da die Wöhlergeraden nicht entsprechend ihres absteigenden F/B-Verhältnisses gereiht sind sondern die Mastix mit einem Verhältnis von 1,22 in allen Versuchen die schlechtesten Ermüdungsergebnisse erzielte und jene Mastix mit dem geringsten F/B-Verhältnis die besten Ermüdungseigenschaften erzielte. Dazwischen liegt jeweils jene Mastix mit dem größten F/B-Verhältnis von 1,33. Somit müssen andere Eigenschaften der Mastix für die Ermüdungsbeständigkeit verantwortlich sein.

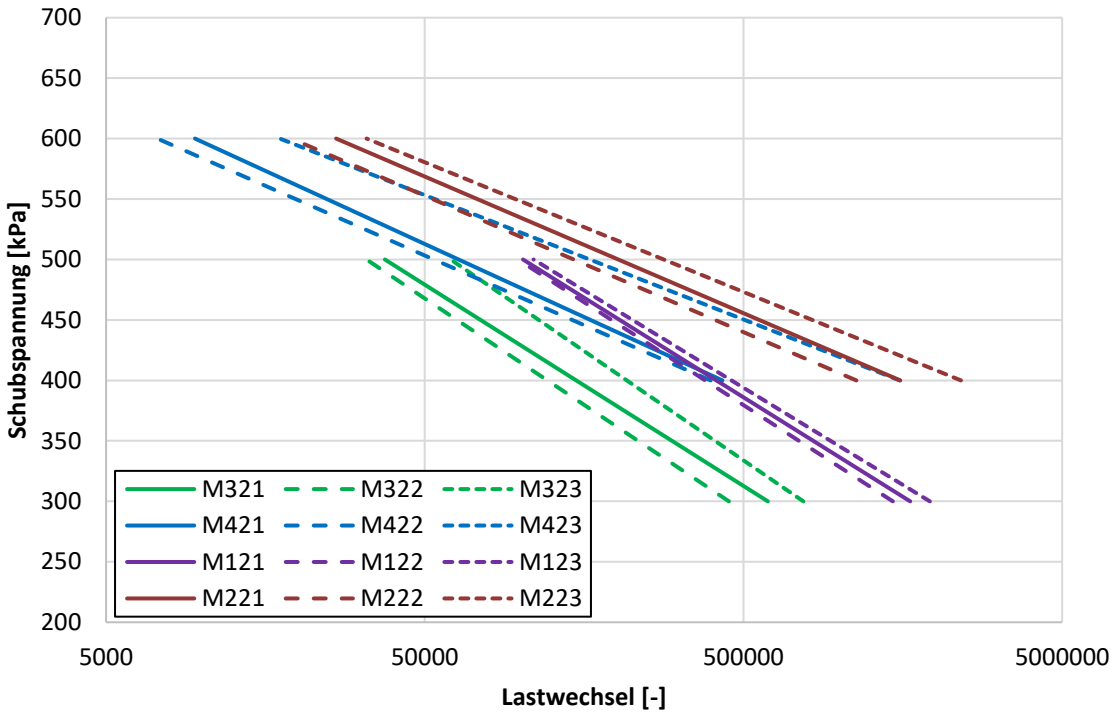


Abbildung 63. Vergleich der Wöhlergeraden mit unterschiedlichen f/B-Verhältnissen (Variantenbezeichnung gemäß Tabelle 3).

Im Weiteren soll die Korrelation zwischen den Ergebnissen aus Ermüdungsprüfungen an Mastix und Asphalt evaluiert werden. Die Stärke der Korrelation ist ein Indiz für den Einfluss von Mastixeigenschaften auf das Ermüdungsverhalten von Asphalt bzw. für die Möglichkeit das Ermüdungsverhaltens auf Asphaltebene anhand von Kennwerten abgeleitet von Mastixversuchen zu prognostizieren. Konkret werden die Ergebnisse aus 14 verschiedenen Mastix-Proben (vgl. Kapitel 5.2.1.1) und den entsprechenden Asphaltvarianten (vgl. Kapitel 5.2.2.1) gegenübergestellt. In der Regel besteht jede Mastixermüdungsprüfung aus 9 Einzelversuchen bzw. für Asphalt werden 18 Probekörper getestet. Allerdings können Einzelversuche auf Mastixebene nicht Einzelversuchen auf Asphaltebene paarweise zugeordnet werden. Demgemäß erscheint es als zweckmäßig, den Vergleich auf den aus den Einzelversuchen abgeleiteten Kennwerten Schubspannung τ_6 und Dehnungsamplitude ε_6, die jeweils die Mastix- bzw. Asphaltermüdung bei 10^6 Lastwechsel beschreiben, zu basieren. Dabei ist jedoch anzumerken, dass der Ermüdungsversuch auf Mastixebene (DSR) spannungsgesteuert bzw. auf Asphaltebene (4PBB) dehnungsgesteuert ist. Noch dazu erfolgt die Mastixprüfung bei einer Temperatur von +10°C bzw. die Asphaltprüfung bei einer Temperatur von +20°C. Durch Analyse und Vergleich von verschiedenen Modellen hat sich ein

Prognosemodell für das Asphaltermüdungsverhalten auf Basis von multipler linearer Regression als zweckmäßig erwiesen (Abbildung 64). Multiple lineare Regression ist ein statistisches Verfahren, das zur Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen einer abhängigen Variable (Prognosevariable) und mehreren unabhängigen Variablen (Prädiktorvariablen) eingesetzt wird. Die Regressionsanalyse ist die mit Abstand am häufigsten verwendete statistische Methode, die sowohl zur Beschreibung von Zusammenhängen als auch zur Durchführung von Vorhersagen verwendet wird. Die Beiträge der einzelnen Prädiktorvariablen für die Erklärung bzw. Prognose der abhängigen Variable werden durch die Regressionskoeffizienten berücksichtigt. Für Details über die Schätzung der Koeffizienten des multiplen Regressionsmodels wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (z.B. Backhaus et al., 2016; Bortz & Schuster, 2010; Greene, 2018; Hair et al., 2014; Hartung et al., 2009; Hayter, 2013; Montgomery & Runger, 2014; Ross, 2014; Wooldridge, 2016).

Das hier abgeleitete Modell beschreibt die Dehnung ε_6 auf Asphaltebene (Dauerhaltbarkeit) als Funktion von der Schubspannung τ_6 und dem komplexen Schubmodul am Beginn der Mastixermüdungsprüfung ($|G^*|_{Start}$). Dabei ist der komplexe Schubmodul ein Mittelwert von allen Einzelversuchen für die entsprechende Mastixvariante. Die Güte des Modells kann anhand des Bestimmtheitsmaßes von 0,92 als sehr gut beurteilt werden. Das Bestimmtheitsmaß beschreibt wie gut das Modell die Messwerte beschreibt und kann im normalen Fall Werte zwischen 0 (kein Zusammenhang) und 1 (perfekte Anpassung) annehmen. Der Regressionskoeffizient für τ_6 weist ein positives bzw. für $|G^*|$ ein negatives Vorzeichen auf. Dies bedeutet, dass höhere Werte der Schubspannung (bessere Mastixermüdungsbeständigkeit) und niedrigere Werte des komplexen Schubmoduls höhere Werte der Dehnungsamplitude (ebenfalls bessere Asphaltermüdungsbeständigkeit) ergeben. Die statistische Analyse hat gezeigt, dass sich alle Regressionskoeffizienten von Null unterscheiden, d.h. der Einfluss von beiden Prädiktorvariablen ist signifikant. Ferner haben die statistischen Tests noch gezeigt, dass Multikollinearitätsprobleme nicht zu erwarten sind. Da die Modellabweichungen der einzelne Asphaltvarianten anhand von Abbildung 64 nicht beurteilt werden können, werden für dasselbe Modell die prognostizierten und beobachteten

Werten von ε_6 in

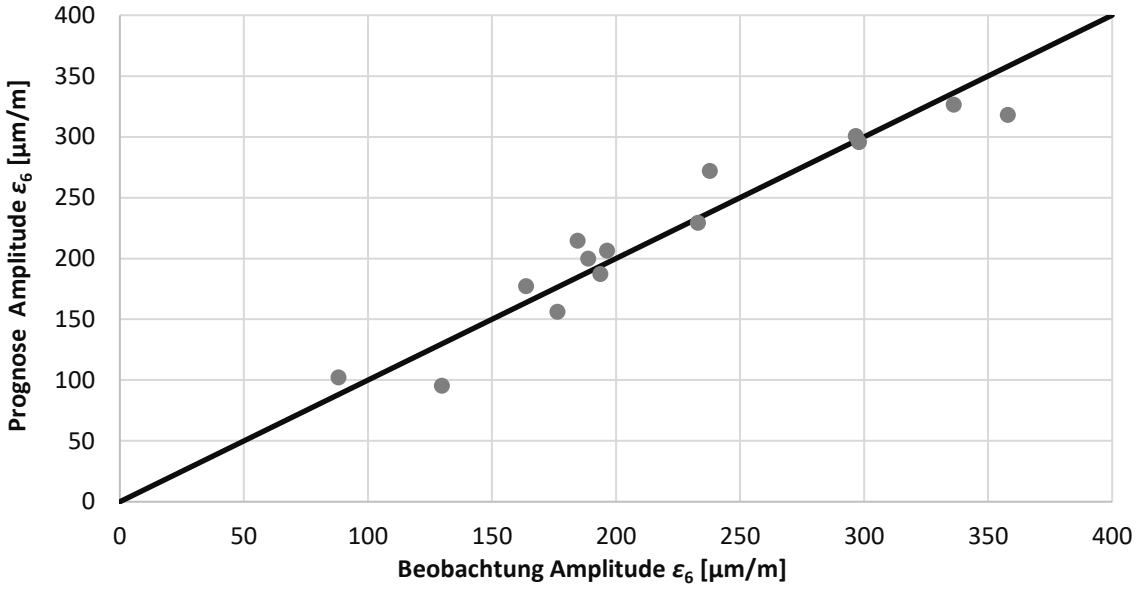


Abbildung 65 gegenübergestellt. Im Idealfall sollten alle Punkte auf der Diagonallinie liegen, was eine perfekte Übereinstimmung zwischen Versuchsergebnis und Prognose entsprechen würde. Für das abgeleitete Modell lassen sich bei keiner von den 14 Mastix- bzw. Asphaltvarianten auffällige Abweichungen von der Diagonallinie erkennen.

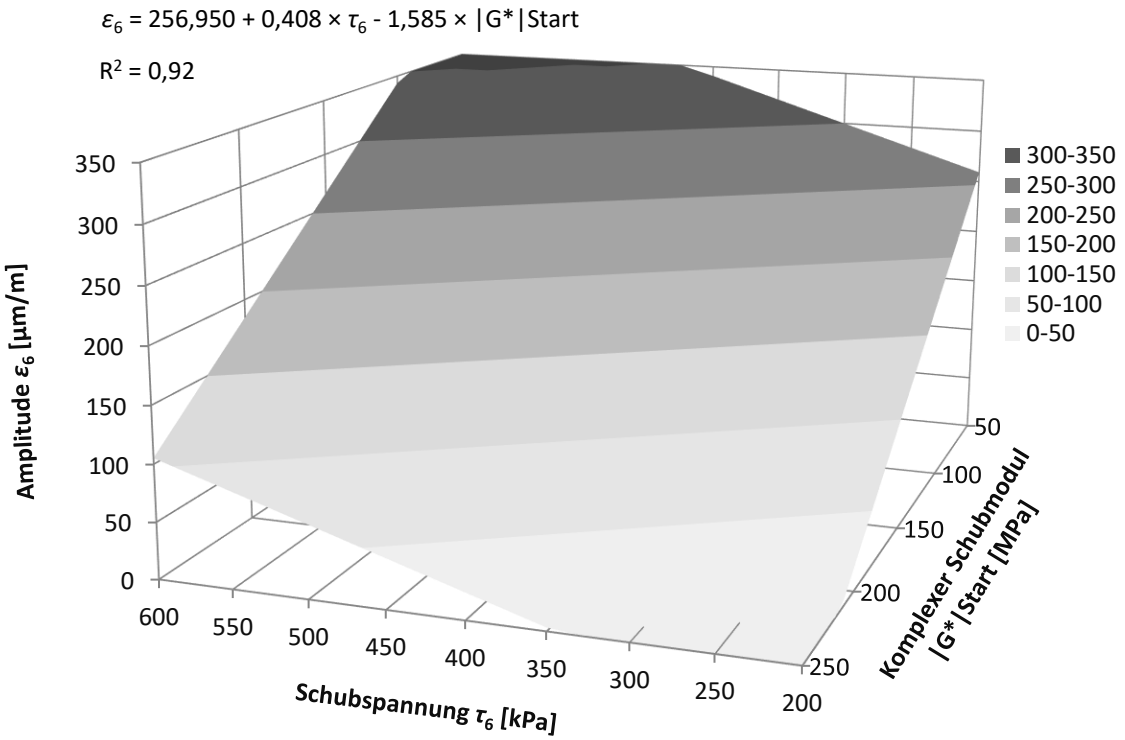


Abbildung 64. Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt (Dehnung ε_6) mittels multipler linearer Regression auf Basis von Ergebnissen aus rheologischen Prüfungen mit dem DSR auf Mastixebene (Schubspannung τ_6 und komplexer Schubmodul |G*|Start).

Bei einer Erweiterung der Ergebnisse mit weiteren Datensätzen zur Validierung wäre somit auch die Einführung von Grenzwerten möglich, die eine gute Asphaltermüdung sicherstellen.

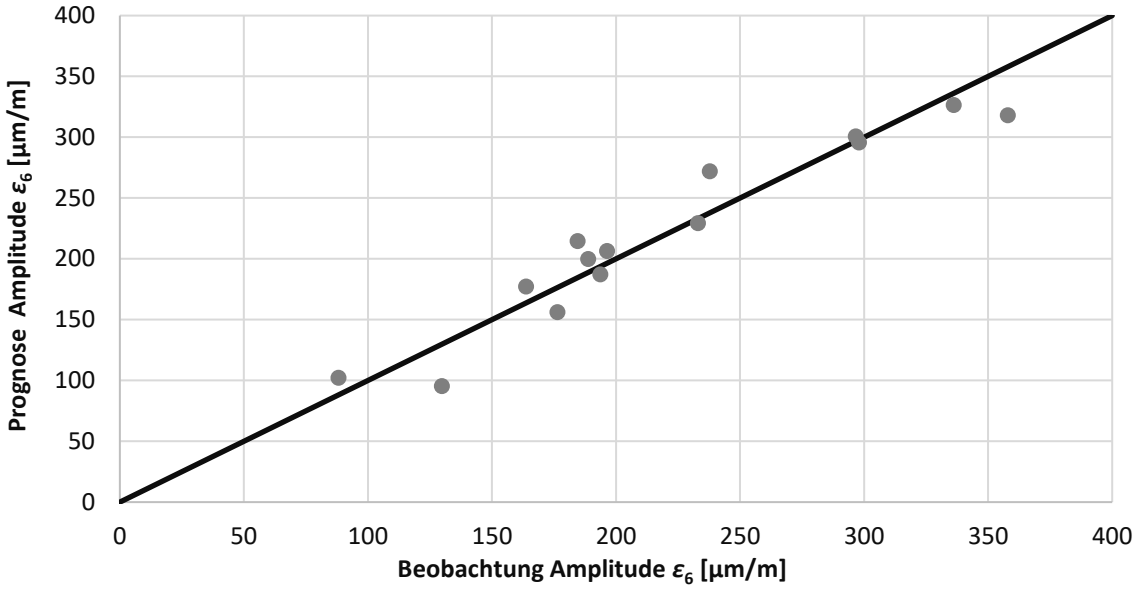


Abbildung 65. Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für Dehnung ε_6.

5.3.1.2 Steifigkeitsprüfungen

Die Ermüdungsprüfungen (DSR und 4PB) erlauben auch einen direkten Vergleich von Anfangssteifigkeiten. Der komplexe Steifigkeitsmodul für Asphalt $S_{mix,0}$ bei 100 Lastwechsel wird ebenfalls als Mittelwert der Einzelprüfungen ermittelt. Die Analyse zeigt, dass zwischen den Steifigkeitsmodulen auf Mastix- und Asphaltebene eine sehr gute positive Korrelation besteht. Positive Korrelation bedeutet, dass hohe Werte der Mastixsteifigkeit hohen Werte der Asphaltsteifigkeit entsprechen. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt 0,95. Details für die Berechnung des Korrelationskoeffizient sind in fast jedem statistischen Lehrbuch zu finden (z.B. Bortz & Schuster, 2010; Hartung et al., 2009; Meissner, 2014; Shevlyakov & Oja, 2016). Bei einfacher linearer Regression entspricht das Quadrat des Pearson-Korrelationskoeffizients dem Bestimmtheitsmaß R^2. Im Weiteren wurde ein lineares Modell für die Prognose der mittleren Asphaltanfangssteifigkeit in Abhängigkeit von der Mastixsteifigkeit abgeleitet (s. Abbildung 66). Dargestellt sind auch die 95%-Prognosestreifen, die den Wertebereich darstellen, in dem zukünftige Prognosewerte der Asphaltsteifigkeit in Abhängigkeit von dem Wert der unabhängigen Variable (|G*|) mit einer gewissen Vertrauenswahrscheinlichkeit (z.B. 95% Konfidenz) liegen können. Bei linearer Regression können Prog-

noseintervalle analytisch berechnet werden, wobei Details für die Berechnung in der Literatur zu finden sind (Greene, 2018; Hartung et al., 2009; Hayter, 2013; Montgomery & Runger, 2014; Ross, 2014).

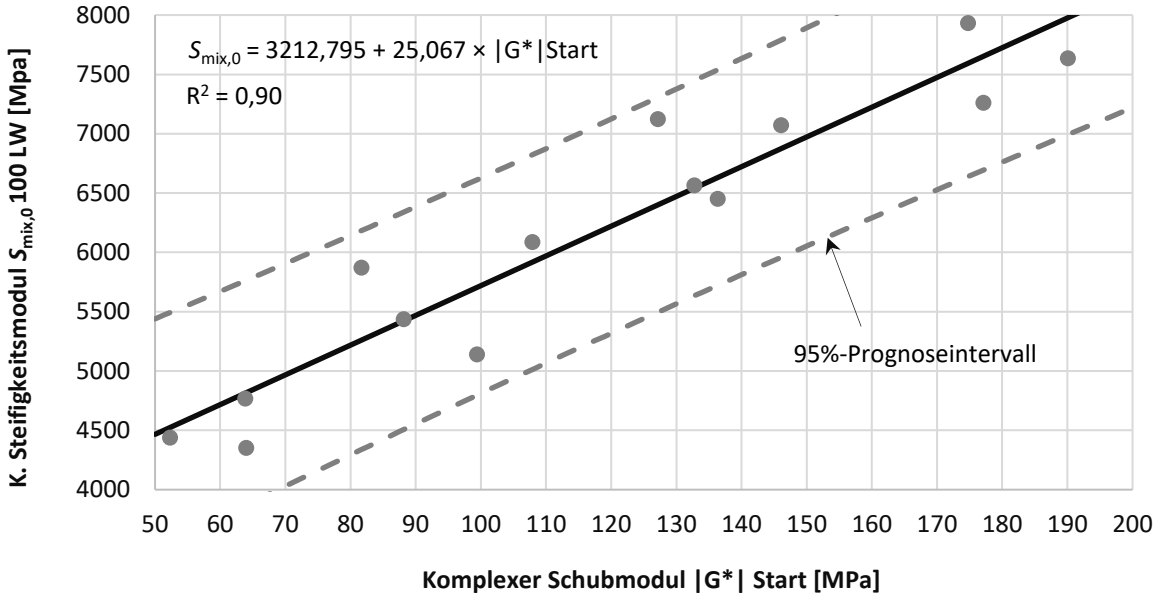


Abbildung 66. Prognose des Steifigkeitsmodul von Asphalt mittels einfacher linearer Regression auf Basis von Ergebnissen aus DSR-Prüfungen auf Bitumenebene.

Bei einer Erweiterung der Ergebnisse mit weiteren Datensätzen zur Validierung wäre somit auch die Einführung von Grenzwerten möglich, die eine Abschätzung des Steifigkeitsmoduls $S_{mix,0}$ von Asphalten anhand des komplexen Anfangsschubmodul $|G^*|_{Start}$ der Mastix zulassen würde.

5.3.1.3 Verformungsprüfungen

Weiters soll die Korrelation zwischen den Verformungsprüfungen für Bitumen und Asphalt untersucht werden. Dabei werden die Ergebnisse von den MSCRT-Versuchen, die an der TU Braunschweig durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4.1.2.4) den Ergebnissen der zyklischen triaxialen Druckschwellprüfung (TCCT) (vgl. Kapitel 5.2.2.3) gegenübergestellt. Es ist anzumerken, dass die Prüftemperatur bei MSCRT +60°C und bei TCCT +50°C beträgt. Weiters ist auch die Art der Belastung (Kriechphasen mit konstanter Spannung, gefolgt von Erholungsphasen bei MSCRT und sinusförmige Belastung bei TCCT) nicht äquivalent. Für die Ableitung eines empirischen Zusammenhangs sollte das kein großes Hindernis sein. Der Vergleich umfasst 15 Asphaltvarianten. Jede Bitumenprüfung besteht aus zwei Einzelproben. Der TCCT-Versuch wurde in der Regel an drei Asphaltprobekörpern durchgeführt,

wobei nicht alle Einzelprüfungen gültige Ergebnisse lieferten. Aus dem Grund, dass die Einzelversuche auf Bitumen- und Asphaltebene nicht paarweise zuordenbar sind, basiert die Analyse auf den Mittelwerten. Die statistische Analyse hat gezeigt, dass zwischen der mittleren Nachgiebigkeit J und der mittleren Kriechrate f_c eine negative Korrelation besteht. Negative Korrelation bedeutet, dass niedrige Werte der Nachgiebigkeit hohen Werten der Kriechrate entsprechen und vice versa. Die negative Korrelation ist plausibel, da sowohl eine niedrige Nachgiebigkeit als auch eine hohe Kriechrate (negatives Vorzeichen) auf gute Verformungsbeständigkeit hinweisen. Dieser Zusammenhang lässt sich durch eine lineare Gleichung beschreiben, wie in Abbildung 67 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt -0,68 und entspricht einem Bestimmtheitsmaß von 0,46 bei einfacher linearer Regression. Die Stärke der Korrelation bzw. die Güte des Models hängt nicht davon ab, ob die Nachgiebigkeit bei 0,1 kPa oder bei 3,2 kPa verwendet wird, da beide Nachgiebigkeiten fast perfekt miteinander korreliert sind. Auf Abbildung 67 sind zwei Cluster (Gruppen) von Punkten zu erkennen. Im linken Bereich befinden sich die polymermodifizierten Bitumen, die sich durch geringe absolute Kriechraten und geringe Nachgiebigkeit auszeichnen. Im rechten Bereich der Graphik sind die Straßenbaubitumen 50/70 und 70/100. Es lässt sich erkennen, dass in diesem Fall die TCCT-Prüfung nicht so gut zwischen Asphaltprobekörper mit modifizierten und nicht modifizierten Bitumen unterscheidet. Die Graphik enthält die 95%-Prognoseintervalle für einzelne Beobachtungen sowie den Hinweis, dass die Gültigkeit des linearen Zusammenhangs auf den Wertebereich der Stichprobe beschränkt ist, was grundsätzlich für Regressionsgleichungen gilt. Daher sind Out-of-Sample-Aussagen und Prognosen (z.B. für Nachgiebigkeit $J_{nr\ 3,2kPa} > 6{,}51\ kPa^{-1}$) mit Vorsicht zu machen.

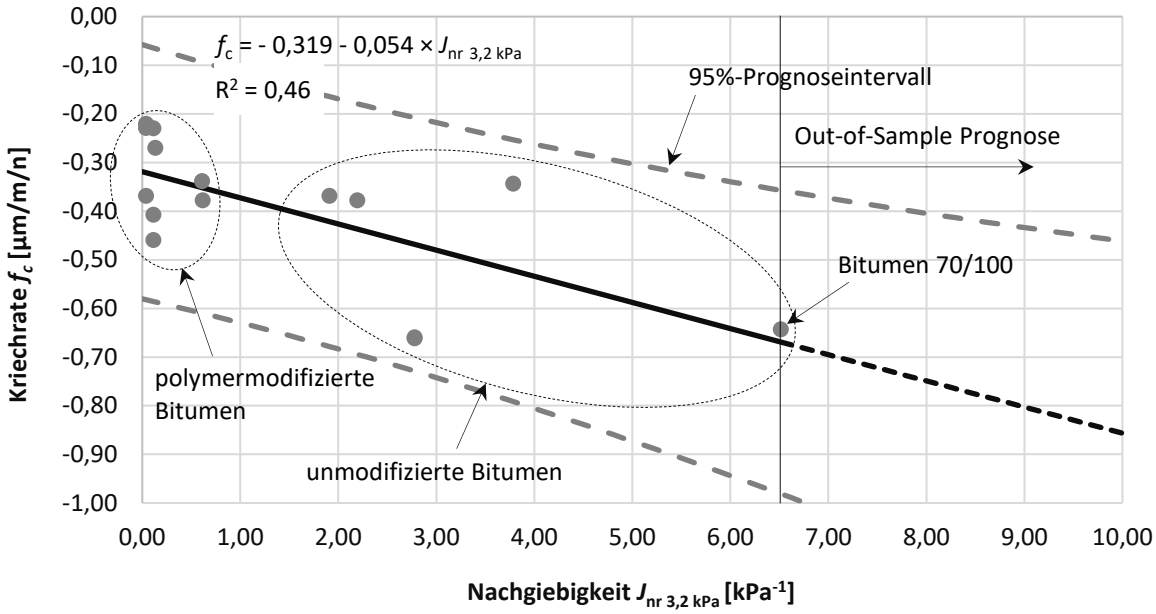


Abbildung 67. Prognose des Verformungsverhaltens von Asphalt (Kriechrate f_c) mittels einfacher linearer Regression auf Basis von Ergebnissen aus MSCRT-Prüfungen auf Bitumenebene (Nachgiebigkeit $J_{nr\ 3,2\ kPa}$).

5.3.1.4 Mehrskalenmodellierung

Mit Hilfe eines mikromechanischen Mehrskalenmodells von Asphalt kann dessen Materialverhalten aus den volumetrischen Kenngrößen des Mischgutes, sowie den mechanischen Eigenschaften des Bindemittels bestimmt werden.

In der Kontinuums-Mikromechanik wird ein Material als ein makrohomogenes repräsentatives Volumselement (RVE), das mit einem mikroheterogenen Körper gefüllt ist, gesehen. Die komplizierte Mikrostruktur innerhalb des RVEs kann mit Hilfe quasi- homogener Teilbereiche, so genannter Materialphasen mit bekannten physikalischen Eigenschaften beschrieben werden. Das mechanische Verhalten dieser Materialphasen, sowie deren volumetrischen Anteile, deren charakteristische Form und deren Interaktion untereinander können verwendet werden, um das homogenisierte mechanische Verhalten des gesamten Materials abzuschätzen. Die charakteristischen Abmessungen dieses RVEs müssen allerdings deutlich größer sein, als die Abmessungen der Einschlüsse, aber deutlich kleiner als die Geometrie oder Belastung der Struktur, die aus dem Material aufgebaut ist.

Besitzt eine Materialphase selbst eine heterogene Mikrostruktur können innerhalb dieser Phase wiederum repräsentative Volumselemente eingeführt werden, um das mechanische

Verhalten abzuschätzen. So entstehen Homogenisierungsschemen mit mehreren Ebenen. Ein solches Schema für Asphalt ist in Abbildung 68 dargestellt.

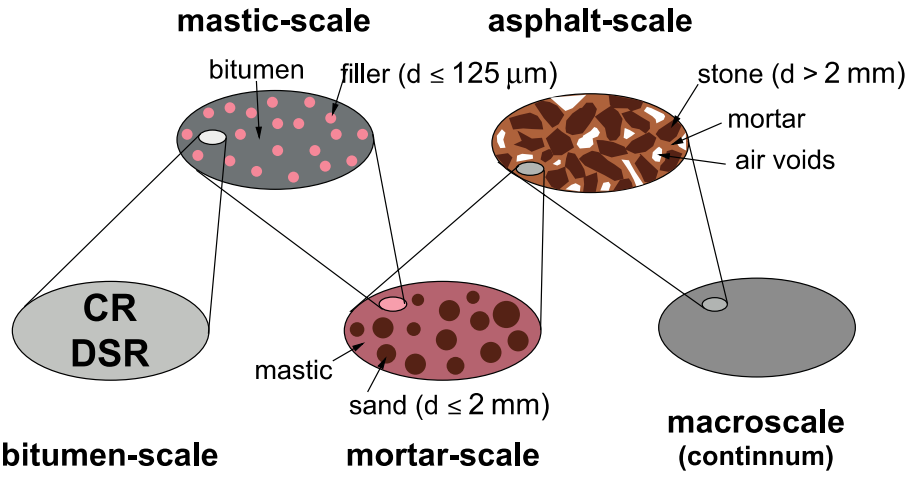


Abbildung 68. Mehrskalenmodell von Asphalt (Blab & Eberhardsteiner, 2007; Lackner et al., 2004).

Bei der Abbildung des Ermüdungsverhaltens im Sinne eines solchen Homogenisierungsschemas wird von einer Mikrorissbildung auf Mastixebene ausgegangen, die in weiterer Folge mit zunehmender Anzahl an Lastwechseln zur Abnahme der Steifigkeit auf Asphaltebene führt. Die Umsetzung eines solchen Modellansatzes ist in Abbildung 69 zu sehen (Füssl & Lackner, 2011). Dabei werden Mikrorisse auf Mastixebene in Form einer weiteren Materialphase eingeführt, die keine Steifigkeit besitzt. Ein Risswachstumsgesetz basierend auf den Ansätzen nach Paris (Paris & Erdogan, 1963; Schapery, 1984) beschreibt den Zuwachs des volumenmäßigen Anteils dieser Materialphase und somit der Mikrorisse. Durch Homogenisierung des Materialverhaltens im Sinne der Kontinuumsmikromechanik von der Mastixebene zur Asphaltebene für jeden Lastzyklus kann die Abnahme der Steifigkeit durch Ermüdung beschrieben werden.

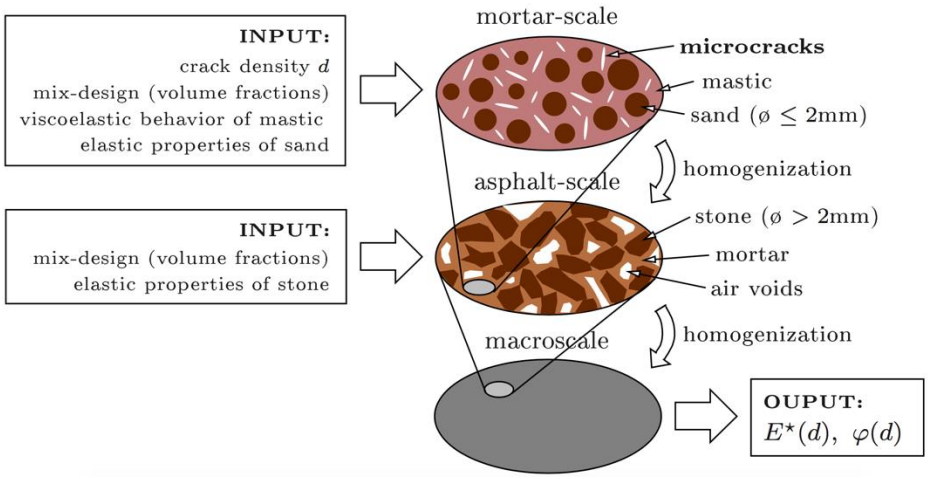


Abbildung 69. Abbildung des Ermüdungsverhaltens im Mehrskalenmodell für Asphalt (Füssl & Lackner, 2011).

Eingangsparameter in das Modell sind die viskoelastischen Kennwerte der Mastix (Ergebnissen aus rheologischen Prüfungen mit dem DSR) sowie die Abnahme des komplexen Schubmoduls mit zunehmender Anzahl an Lastwechseln aus der Ermüdungsprüfung am DSR (siehe Kapitel 5.2.1). Zudem wird die volumetrische Zusammensetzung des Mischguts berücksichtigt.

Abbildung 70 zeigt reale Ergebnisse eines Ermüdungseinzelversuchs auf Mastixebene und die Ergebnisse der Homogenisierung des Ermüdungsverhaltens unter Berücksichtigung einer realistischen volumetrischen Zusammensetzung. Dabei ist die Abnahme der Steifigkeit mit zunehmender Anzahl an Lastwechseln klar erkennbar.

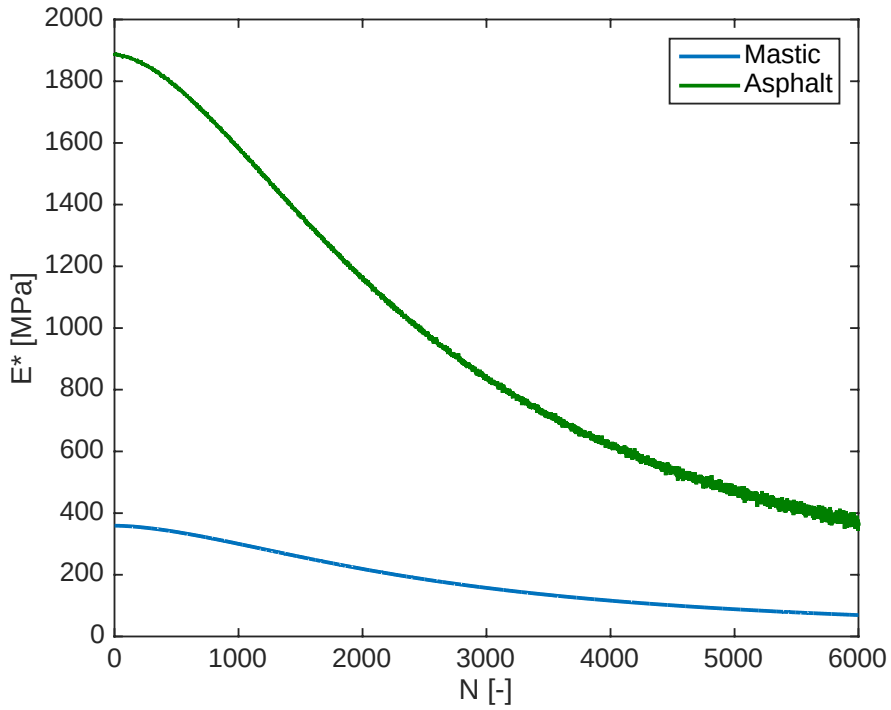


Abbildung 70. Ergebnis eines Ermüdungsversuchs auf Mastixebene und hochskaliertes (simuliertes) Ermüdungsverhalten auf Asphaltebene.

Die Hochskalierung des Ermüdungsverhaltens von der Mastix- auf die Asphaltebene mithilfe eines Mehrskalenmodells auf Basis der Kontinuumsmikromechanik ist somit gelungen. Ziel weiterer Forschung muss der (rechnerische) Brückenschlag zwischen den verschiedenen Prüfbedingungen auf unterschiedlichen Längenskalen sein. Diese sind im Speziellen die Art der Belastung sowie die Prüftemperatur. Nur dann ist eine sinnvolle Validierung mit derzeit EN-genormten Laborprüfungen möglich.

5.4 Zusammenfassung Teilbericht B

An der TU Wien wurden verschiedene gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen an Asphaltmastix und Asphalt angewendet. Die Prüfungen auf Asphaltmastixebene wurden an neu entwickelten Verfahren im Dynamischen Scherrheometer (DSR) durchgeführt. Auf Asphaltebene wurden standardisierte Prüfverfahren gemäß EN 12697-xx zum Gebrauchsverhalten (Performanceprüfungen) von Asphaltprobekörpern durchgeführt.

Die Prüftemperaturen wurden spezifisch zum jeweils relevanten Versagenskriterium angepasst. Im mittleren Temperaturbereich wird das Ermüdungsverhalten und im oberen Temperaturbereich das Verformungsverhalten untersucht. Die Prüfungen werden dabei bei

Temperaturen gemäß den anzuwendenden Normen bzw. mit länderspezifischen Werten durchgeführt. Folgende Erkenntnisse resultieren aus den Prüfungen:

- Zwischen dem Ermüdungsverhalten auf der Asphaltmastixebene und der Asphaltebene besteht basierend auf den beiden durchgeführten Prüfmethoden mit einer Vielzahl an durchgeführten Einzelprüfungen eine eindeutige Korrelation zwischen den Ermüdungsprüfungen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,92.
- Beim Ermüdungsverhalten auf beiden Ebenen sind Unterschiede zwischen unmodifizierten und modifizierten Bitumen erkennbar. Die polymermodifizierten Bitumen zeigen eine erhöhte Ermüdungsbeständigkeit sowohl bei den Wöhlerkurven als auch bei den τ6-Werten.
- Die Ermüdungsversuche auf Asphaltmastixebene zeigen einen eindeutigen Einfluss des Füllermaterials auf die Ermüdungsbeständigkeit. Abhängig des gewählten Füllermaterials wird die Beständigkeit größer oder kleiner. Auf ein besseres oder schlechteres Verhalten zufolge des Füller-Bitumen-Verhältnisses konnte kein erkennbarer Rückschluss gezogen werden.
- Im Zuge der Ermüdungsprüfungen am 4PB wurde der Steifigkeitsmodul für Asphalt $S_{mix,0}$ bei 100 Lastwechsel ebenfalls ermittelt und wird als Mittelwert der Einzelprüfungen ermittelt. Die Analyse zeigt, dass zwischen den Steifigkeitsmodulen auf Mastix- und Asphaltebene eine sehr gute positive Korrelation besteht.
- Bei der Gegenüberstellung der Verformungsbeständigkeit auf der Asphaltmastix- und Asphaltebene konnte ebenfalls eine Korrelation hergestellt werden, wobei das Bestimmtheitsmaß mit 0,47 relativ niedrig ist. Dabei wurden die Ergebnisse von den MSCRT-Versuchen, die an der TU Braunschweig durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4.1.2.4) den Ergebnissen der zyklischen triaxialen Druckschwellprüfung (TCCT) (vgl. Kapitel 5.2.2.3) gegenübergestellt. Die statistische Analyse hat gezeigt, dass zwischen der mittleren Nachgiebigkeit J und der mittleren Kriechrate fc eine negative Korrelation besteht.
- Mithilfe der Mehrskalenmodellierung ist die Hochskalierung des Ermüdungsverhaltens von der Mastix- auf die Asphaltebene auf Basis der Kontinuumsmikromechanik gelungen. Jedoch bedarf es noch weiterer Forschung um den (rechnerische) Brückenschlag zwischen den verschiedenen Prüfbedingungen auf unterschiedlichen Längenskalen zu erlangen. Diese sind im Speziellen die Art der Belastung sowie die Prüftemperatur. Nur dann ist eine sinnvolle Validierung mit derzeit EN-genormten Laborprüfungen möglich.

6 TEILBERICHT C: ERGEBNISBERICHT DER EMPA

6.1 Untersuchungsmethodik

An der Empa wurden gemäß der Übersicht in Tabelle 1 Prüfungen auf der Bitumen- der Mastix- und auf der Asphaltebene unterschiedliche Prüfungen durchgeführt. Bei den Prüfungen handelt es sich überwiegend um gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen, die zum einen die das Tieftemperaturverhalten, die Steifigkeit, die Ermüdungsbeständigkeit und zum anderen die Verformungsbeständigkeit ansprechen.

Im Bereich des tieferen Gebrauchstemperaturbereiches wurden der Fracture Toughness Test für Bitumen und Mastix (Kapitel 6.1.2.1), der Double Torsion Test für Mastix (Kapitel 6.1.2.1) und der Semi Circular Bending Test (Kapitel 6.2.2.1) für Asphalt Probekörper durchgeführt.

Im Bereich des mittleren Gebrauchstemperaturbereiches wurden Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen an Asphaltprobekörper gemacht (Kapitel 6.1.2.2). Zusätzlich wurden Validierungsprüfungen an Asphaltprobeplatten mit dem Verkehrslastsimulator MMLS3 durgeführt (Kapitel 6.2.2.5)

Im Bereich des oberen Gebrauchstemperaturbereiches wurden der Widerstand gegen bleibende Verformungen nach EN 12697-22 (2007) mit dem Gerät mit großem Rad an Asphaltprobekörpern bestimmt

6.1.1 Performanceprüfungen an Bitumen, Mastix und Mörtel

6.1.1.1 Kälteprüfungen

Zur Bestimmung des Kälteverhaltens wurde der Fracture Toughness Test (FTT) gemäß EN 15963 (2010) an allen vorhandenen Bitumen durchgeführt. Diese Prüfung wurde auch an allen Mastixvarianten durchgeführt, obwohl dies nach Norm eigentlich nicht vorgesehen ist. Diese an gekerbten Probekörpern durchgeführte Prüfung dient dazu, das Bruchverhalten von nicht modifiziertem oder modifiziertem bitumenhaltigen Bindemittel zu bestimmen. Sie liefert die Widerstandsfähigkeit gegen Versagen in Gegenwart von Zugspannungen und Rissen. Als Bruchwiderstandstemperatur gilt die niedrigste Temperatur, bei der die unter Höchstkraft erzielte Verschiebung 0.3 mm beträgt.

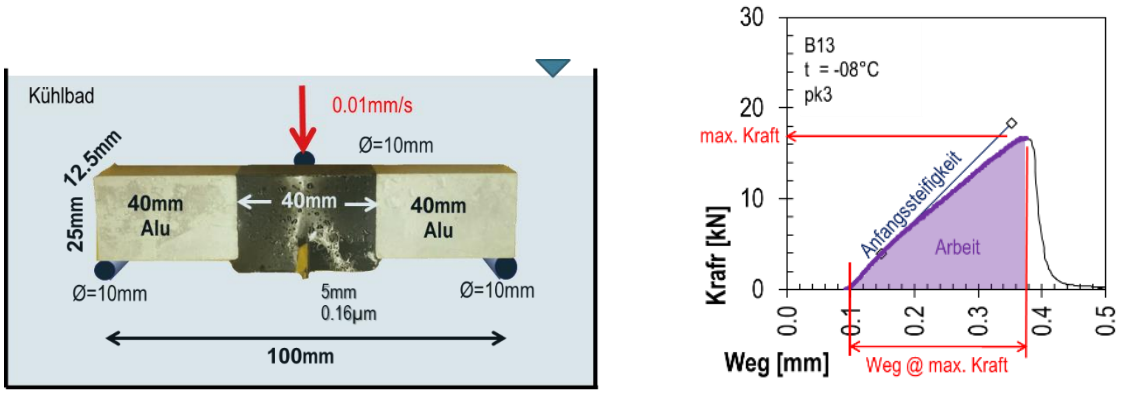


Abbildung 71. Fracture Toughness Test (FTT), links: Prüfaufbau, rechts: schematische Auswertung.

Die Bruchwiderstandstemperatur T_{FTT} wird durch Anpassung einer Exponentialfunktion an die Punkte für die Messwerte der Temperatur über der Verschiebung und Berechnung der zu einer Verschiebung von 0.3 mm gehörenden Temperatur bestimmt (siehe Abbildung 72). Falls zwei Temperaturen, eine oberhalb und eine unterhalb der Bruchwiderstandstemperatur, zur Verfügung stehen, darf eine lineare Interpolation vorgenommen werden.

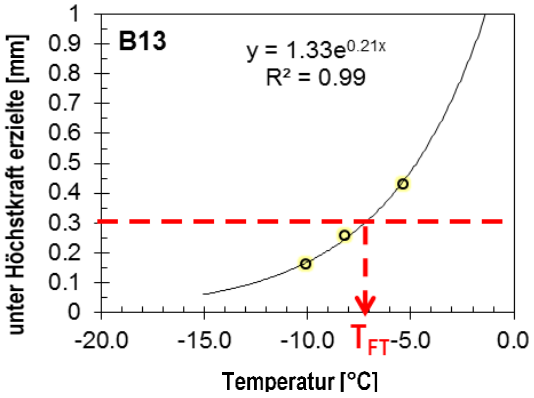


Abbildung 72. Beispiel für die unter Höchstkraft erzielte Verschiebung als Funktion der Temperatur.

Außerdem können Parameter wie die Arbeit W, die Anfangssteifigkeit S und die unter Höchstkraft erzielte Verschiebung, D bestimmt werden.

Bei dieser Prüfung ist die Probekörperherstellung von großer Bedeutung, weshalb eine sehr sorgfältige Arbeitsweise nötig ist, um nach dem Ausformen einen unbeschädigten Probekörper zu erhalten.

Zur Bestimmung der Kälterissstabilität waren zusätzlich Doppel-Torsion-Tests (DTT) vorgesehen. Bei diesem Versuch handelt es nicht um eine Standardprüfung, und es war daher noch Entwicklungsarbeit nötig. So wurden in der Werkstatt der Empa Formen zur Herstellung der Probekörper aus Bitumen und Mastix hergestellt und Anpassungen der Prüfeinrichtung vorgenommen (siehe Abbildung 73). Diese Prüfung wird an kleinen plattenförmigen Prüfkörpern durchgeführt, wobei die gewählte Probekörpergröße von 24cm x 12cm x 1.5cm anhand von Vorversuchen bestimmt wurde. Die Prüfkörper wurden bei der Prüfung durch 2 Auflager an den Längskanten unterstützt und in eine Temperaturkammer bei -20°C eingebaut. Ein Anschnitt in der Längsrichtung (Führungsnut) simuliert einen Riss. Durch eine senkrechte Scherkraft an der Oberfläche, wird die Nut beidseitig mit einem Moment beaufschlagt und der Prüfkörper bei Tiefentemperaturen so zum Abbruch gebracht. Der Vorteil des FTT besteht darin, dass eine kontinuierliche und keine schlagartige Rissausbreitung erzeugt wird.

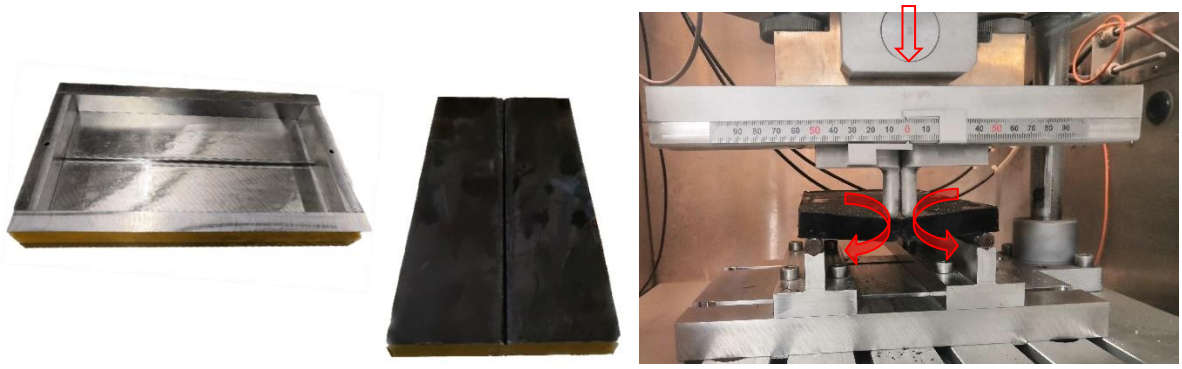


Abbildung 73. Doppel-Torsion-Tests (DTT), links: Gießform zur Herstellung von Mastixprobekörpern, rechts: Prüfaufbau.

Die Versuchsauswertung erfolgte, wie in Abbildung 74 ersichtlich mit Hilfe des erstellten Kraft-Weg-Diagramms. Grundsätzlich wurde dabei einerseits, der sich aus Kraft und Probengeometrie ergebende kritische Spannungsintensitätsfaktor (critical stress intensity factor) K_{IC} und andererseits die stabile Rissfortschrittslänge (stable crack propagation length) zwischen dem Ende der elastischen Kraftentwicklung und dem Bruch (catastrophic point) verwendet.

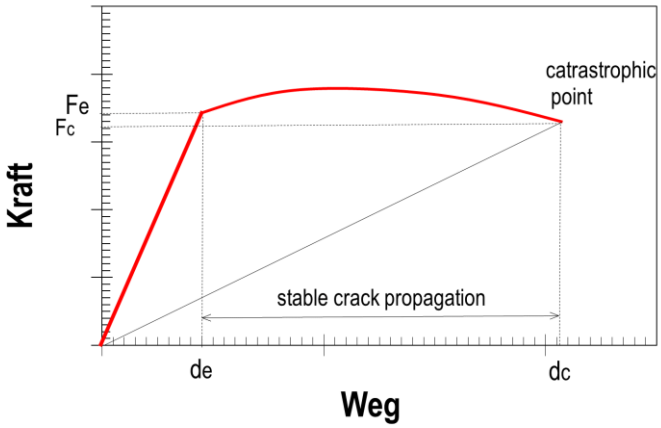


Abbildung 74. Kraft-Weg-Diagramm des DDT.

$$K_I = \mathrm{F}\,\mathrm{W}_m \left(\frac{3(1+\upsilon)}{W \quad d^3 d_l \psi(\frac{d}{W})}\right) \qquad \text{Gl. 8}$$

wobei

F	aufgebrachte Kraft in N
W_m	Abstand zwischen Lasteinleitung und Nut in mm
ν	Poissonszahl
d	Probekörperhöhe in mm
d_l	Abstand zwischen Probekörperoberkante und Nut in mm
ψ(d/W)	geometrischer Korrekturfaktor

6.1.2 Performanceprüfungen an Asphalt

6.1.2.1 Kälteprüfungen

Zur Bestimmung des Bruchverhaltens wurden Bruchprüfungen mit dem Semicircular-Bending-Test (SCB) in Anlehnung an die Standardprüfmethode EN 12697-44 (2010) durchgeführt (vgl. Abbildung 75). Die Prüfung erfolgte an Asphaltprobekörpern bei 0°C. Im Verlauf der Prüfung nimmt die Verformung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 mm/min zu. Die entsprechende Last steigt bis zu einem Höchstwert F_{max} an, der in direkter Beziehung zur Bruchzähigkeit des Probekörpers steht. Für jedes Material werden 4 Probekörper getestet.

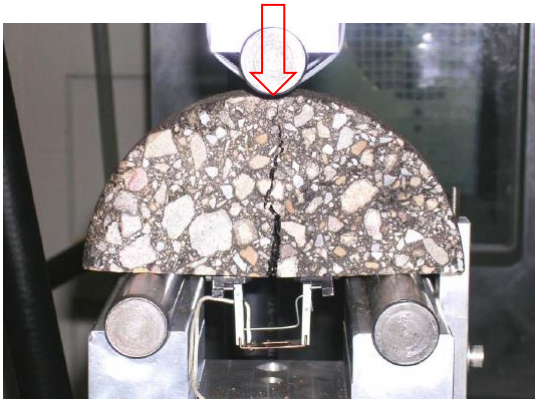


Abbildung 75. Semicircular-Bending-Test (SCB), Prüfaufbau.

Die maximale Spannung bei Versagen σ_{max} ist nach folgender Gleichung zu berechnen

$$\sigma max = \frac{4.263 \,.\, Fmax}{D\ t} \qquad \text{Gl. 9}$$

wobei:

D der Durchmesser des Probekörpers in mm

t die Dicke des Probekörpers in mm

*F*max die Höchstkraft des Probekörpers in Newton

Die Spannungsintensitätsfaktor (Bruchzähigkeit oder fracture thoughness) K_{Ic},des Probekörpers:

$$K_{Ic} = \sigma_{max}\, f(\frac{a_i}{W_i}) \qquad \text{Gl. 10}$$

wobei:

Wi die Höhe des Probekörpers in mm

a_i die Kerbtiefe des Probekörpers in mm

σ_{max} die maximale Spannung beim Versagen des Probekörpers in Newton je Quadratmeter (N/mm^2);

$f(a_i/W_i)$ geometrische Faktor des Probekörpers

6.1.2.2 Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen

Die Durchführung der Steifigkeits- und Ermüdungsprüfungen erfolgten gemäß deutscher Arbeitsanleitung AL SP-Asphalt 09 (2009). Die Steifigkeitsprüfungen wurden bei Temperaturen von -10, 0, 10 und 20°C und bei Frequenzen von 10, 1 und 0.1Hz bestimmt. Aus diesen Daten wurde dann die Hauptkurve oder sog. Masterkurve ("master curve") für die

einzelnen Materialien abgeleitet. Die Unterspannung wurde bei allen Prüftemperaturen mit 0,035 MPa (unterer Grenzwert der Sinusschwellbelastung) zur Lagesicherung des Probekörpers und für alle Versuche gleich angesetzt. Die auf den Probekörper aufgebrachte Belastung wurde so gewählt, dass die resultierenden elastischen horizontalen Dehnungen zwischen 0,05 und 0,10 ‰ liegen. Zur Berechnung des Steifigkeitsmoduls sind die Messwerte der Kraft bzw. der Horizontalverformung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate einer Sinusfunktion anzunähern

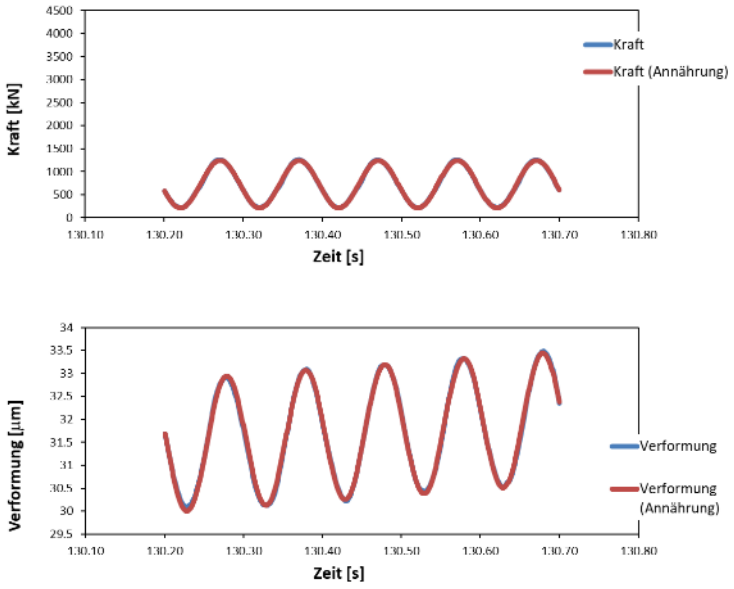


Abbildung 76. Annäherung mit Sinusfunktion.

Mit einem einzigen Parameter kann die Äquivalenz zwischen Prüftemperatur und Belastungsfrequenz bezogen auf die Steifigkeit mit Hilfe des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips hergestellt werden kann (siehe Abbildung 77). Mit Hilfe der auf dieser Grundlage ermittelten Hauptkurve ("master curve") eines Asphaltes besteht die Möglichkeit, Steifigkeitsmodule für alle interessierenden Kombinationen aus Temperatur und Belastungsfrequenz auf der Grundlage weniger Versuche zu prognostizieren. Somit besteht die Möglichkeit der Ermittlung der Steifigkeitsmodul- Temperaturfunktion auf der Grundlage weniger Versuche.

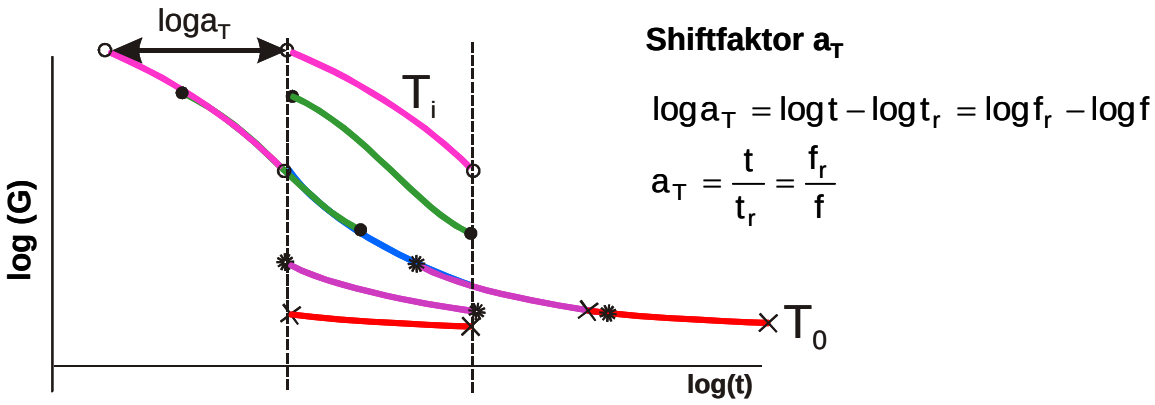


Abbildung 77. Zeit-Temperatur-Superposition: Masterkurve für T0 (Prinzip).

Die Ermüdung wird bei einer Temperatur von 20°C bestimmt. Die Belastung der Probekörper wird in Form einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwellbelastung ohne Lastpausen und mit einer Belastungsfrequenz von 10 Hz aufgebracht. Zur Lagesicherung des Probekörpers ist eine Unterspannung von 0,035 MPa zu wählen. Es ist zu gewährleisten, dass die Unterspannung während der Versuche konstant gehalten wird. Zur Ermittlung einer Ermüdungsfunktion sind mindestens drei unterschiedliche Spannungsamplituden (Variation der Oberspannung) erforderlich. Diese sind so festzulegen, dass die anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen im Probekörpermittelpunkt in einem Bereich von 0,05 bis 0,30 ‰ liegen. Weiterhin muss die Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums in einem Bereich von ca. 103 bis 106 Lastwechseln liegen.

Als Ermüdungslastwechselzahl wird die Lastwechselzahl N_{Makro} definiert, bei welcher während des Ermüdungsversuchs der Beginn des Auftretens von Makrorissen im Probekörper beobachtet werden kann. Der Versuchsverlauf danach ist durch schnell fortschreitende Rissbildung gekennzeichnet, welche zum völligen Versagen des Probekörpers führt. Die Bestimmung von N_{Makro} basiert auf dem Konzept der dissipierten Energie. Hierfür wird zunächst der sogenannte ,"Energy Ratio" ER als Produkt aus der Lastwechselzahl N und dem für N berechneten Steifigkeitsmodul IE(N)I definiert.

Die materialspezifischen Ermüdungsfunktionen werden in Abhängigkeit von den in den Versuchen gemessenen anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen $E_{el,anf}$ bestimmt. Die anfängliche elastische horizontale Dehnung $E_{el,anf}$ ist aus dem Durchschnitt der elastischen Verformungen von Lastwechsel 98 bis 102 zu berechnen.

Sollte erkennbar sein, dass der Anpassungsvorgang noch nicht abgeschlossen ist, können auch spätere Lastwechsel ausgewählt werden, die jedoch noch vor einem erkennbaren

Anstieg der elastischen horizontalen Dehnung infolge des Abfalls des Steifigkeitsmoduls liegen müssen.

Die Messwerte $E_{el,anf}$ der bestimmten Ermüdungslastwechselzahlen N_{Makro} werden mittels Regression zu einer Ermüdungsfunktion unter Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate approximiert (siehe Abbildung 78).

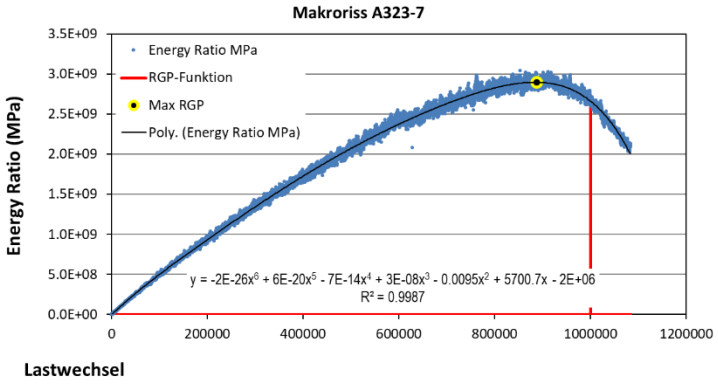


Abbildung 78. Beispiel für die Bestimmung der Lastwechselzahl N_{Makro} bis zum Kriterium „Makroriss".

Die Ermüdungsfunktionen sind in folgender Form anzugeben (Abbildung 79)

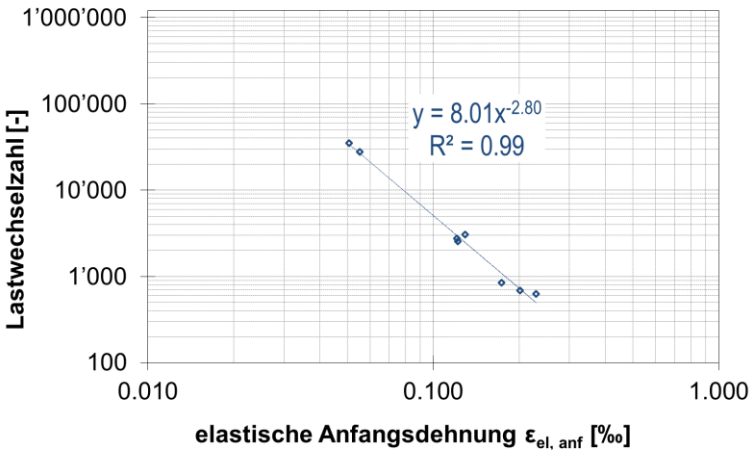


Abbildung 79. Beispiel einer Ermüdungsfunktion.

6.1.2.3 Verformungsprüfungen

Der Widerstand von Asphaltprobekörpern gegenüber Spurrinnenbildung wurde mit dem Spurrinnentester mit großem Rad nach EN 12697-22 bestimmt.

Für die Verdichtung der Asphaltschichten wurde das Verdichtungsgerät verwendet, wobei ein Stahlwalze gemäß Abbildung 80 verwendet wurde. Das Mischgut wurde dazu im Ofen aufgeheizt und heiß in den Verdichtungsrahmen eingefüllt.

Abbildung 80. Stahlwalze zur Verdichtung der Probekörper.

Für jede Spurbildungsprüfung wurden jeweils parallel zwei Prüfkörper im Spurrinnentester bei 60°C und mit 30'000 Zyklen geprüft. Nach einer Nullmessung wurden die relativen Spurbildungstiefen, das heißt die absolute Spurrinnentiefe in Prozent der Prüfkörperdicke, zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen und grafisch dargestellt (vgl. Abbildung 81).

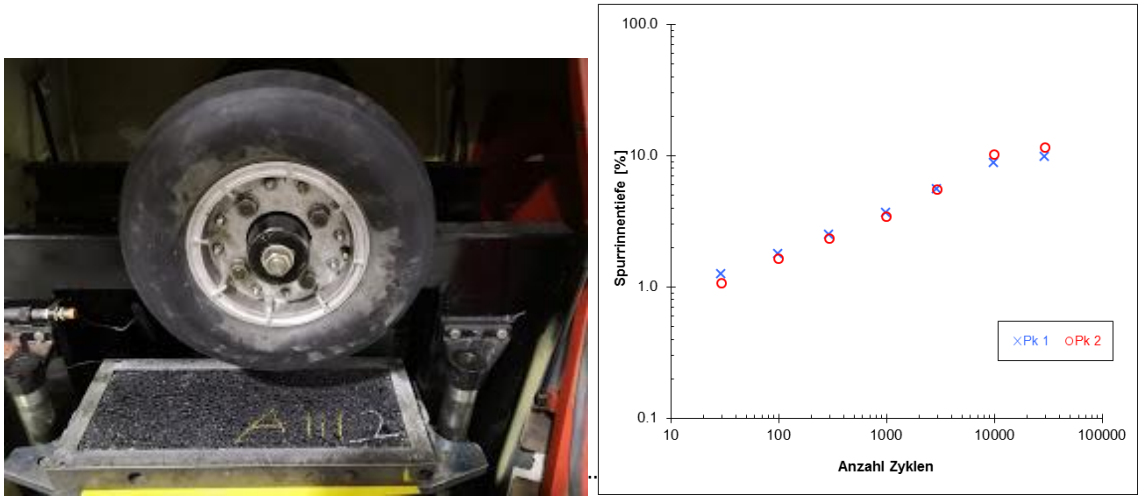


Abbildung 81. Prüfeinrichtung für den Spurbildungstest mit großem Rad, links: Prüfaufbau, rechts: Resultate des Spurbildungstests (Beispiel).

6.1.2.4 Großversuch mit MMLS3

Die Validierung der Mehrskalenmodelle erfolgte anhand von beschleunigten Großversuchen an Modellstrukturen und realen Straßenaufbauten. Dazu wurde der Verkehrslastsimulator MMLS3 (Model Mobile Load Simulator) eingesetzt (Abbildung 82). Das Gerät dient der beschleunigten Prüfung von Straßenbelägen und wird zur Bestimmung des Gebrauchsverhalten verschiedener Materialen unter Radlast eingesetzt. Das Gerät besteht aus einem steifen Stahlrahmen mit vier justierbaren Füßen. Die Belastung wird über 4 Räder mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Breite von 80mm aufgebracht, die sich wie bei einer Kettensäge in einer Richtung auf einer Umlaufschiene bewegen. Der Reifendruck kann zwischen 560 und 800 kPa eingestellt werden. Das gesamte Gerät besitzt eine Länge von 2400mm, eine Breite von 600mm, eine Höhe von 1150 mm und ein Gewicht von 800 kg. Die Länge der Prüfstrecke beträgt 1000 mm. Die Kraft pro Rad kann zwischen 1.9 und 2.7 kN geregelt werden. Die maximale Fahrgeschwindigkeit der Räder beträgt 9 km/h, womit etwa 7200 Lastzyklen pro Stunde aufgebracht werden können. Die Versuche erfolgen unter definierten reproduzierbaren klimatischen Bedingungen.

Für die Untersuchungen im Projekt wurde eine Radlast von 2.4 KN, ein Reifendruck von 800kPa und eine Fahrgeschwindigkeit von 9km/h gewählt.

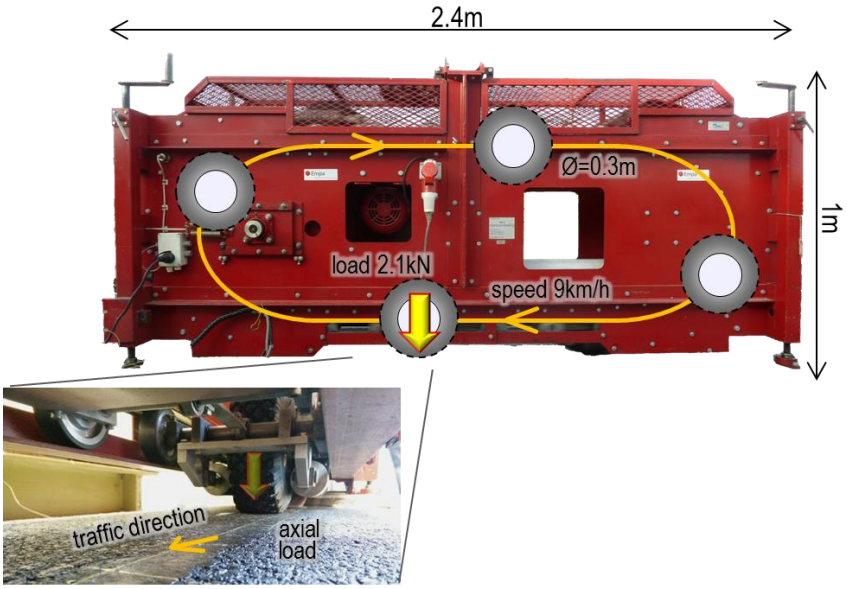


Abbildung 82. Ansicht des mobilen Verkehrslastsimulators MMLS3.

Die Untersuchung des Gebrauchsverhaltens erfolgt mit Asphaltbeton Prüfplatten der Abmessungen 1.6 m x 0.6 m, die mittels Labor Walzenverdichter hergestellt wurden. Vor der Prüfung wurde den Platten an der Unterseite mittig eine 3cm breite Nut als Sollbruchstelle eingeschnitten. Für die Versuche, wurden die Platten an den Enden auf Stahlprofile (Stützen) aufgelegt und zwischen Stahlstützen auf einen flexiblen Gummi gebettet, um die elastische Lagerung des Belages auf dem Untergrund zu simulieren (Abbildung 83). Der gesamte Aufbau wurde auf einer steifen Betonplatte befestigt und zur temperasturkontrollierten Prüfung bei 20°C in einen Container gestellt.

Während der gesamten Belastungszeit wurden zur Beobachtung der Riss- bzw. Schadensbildung regelmäßig visuelle Inspektionen und zusätzlich Messungen mit Deformationssensoren (linear variable differential transducer sensors, LVDT) sowie mit einem DIC System (Digital Imaging Correlation) durchgeführt. Die Verformungssensoren LVDTs messen die Durchbiegung des Prüfkörpers beim Überrollen und erfassen so eine Steifigkeitsänderung im System. Es wird erwartet, dass sich die Verformung des Prüfkörpers bei Versagen infolge des Auftreten von Rissen deutlich erhöhen (siehe Abbildung 84).

Beim DIC handelt es sich um eine 3D Bildkorrelationssystem zur berührungslosen Erfassung der Verschiebungs- und Dehnungsfelder auf der Oberfläche beliebiger Prüfkörper in der Größenordnung von 0.01m^2 bis 1m^2 (siehe Abbildung 85).

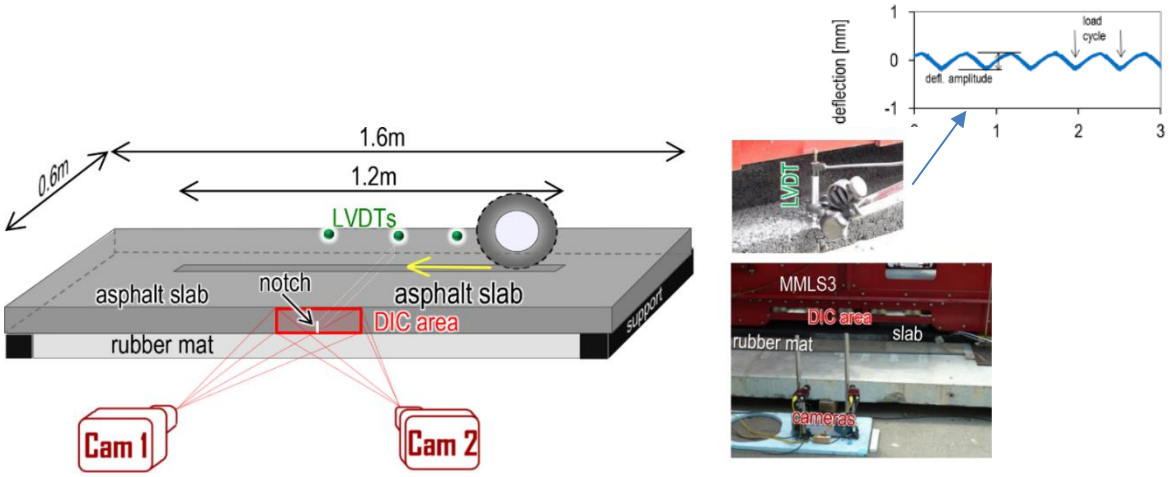


Abbildung 83. Mobiler Verkehrslastsimulator MMLS3: Prüfaufbau und LVDT Anordnung bzw. Aufzeichnung.

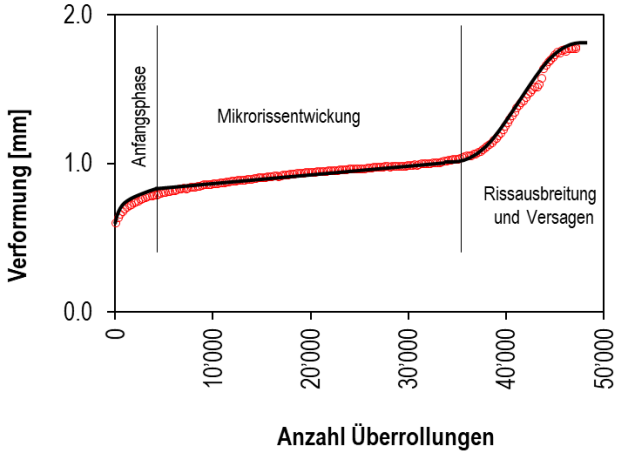


Abbildung 84. Mobiler Verkehrslastsimulator MMLS3 Auswertung Verformungsmessung (Beispiel).

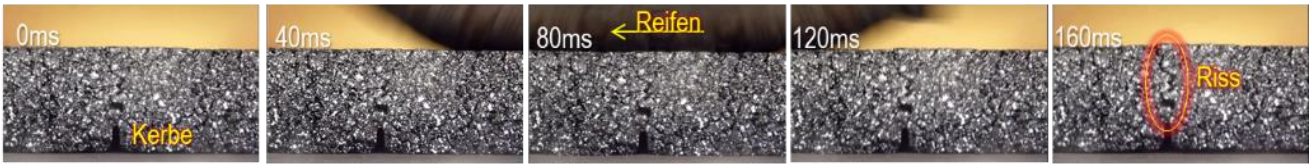


Abbildung 85. Risserkennung während einer Überrollung gemessen mit DIC (Beispiel).

6.2 Untersuchungsergebnisse

6.2.1 Performanceprüfungen an Bitumen, Mastix und Mörtel

6.2.1.1 Kälteprüfungen

Fracture Toughness Tests

Abbildung 86 zeigt Rohdaten in Form von Kraft-Weg Diagrammen, wie sie im Fracture Toughness Test ermittelt werden. Abbildung 87 zeigt die Auswertung für verschiedene Parameter gemäss Kapitel 6.1.1.1.

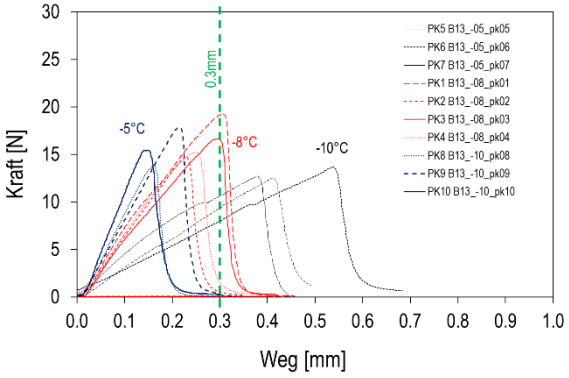


Abbildung 86. Beispielhafte FTT Rohdaten für das Bitumen B13.

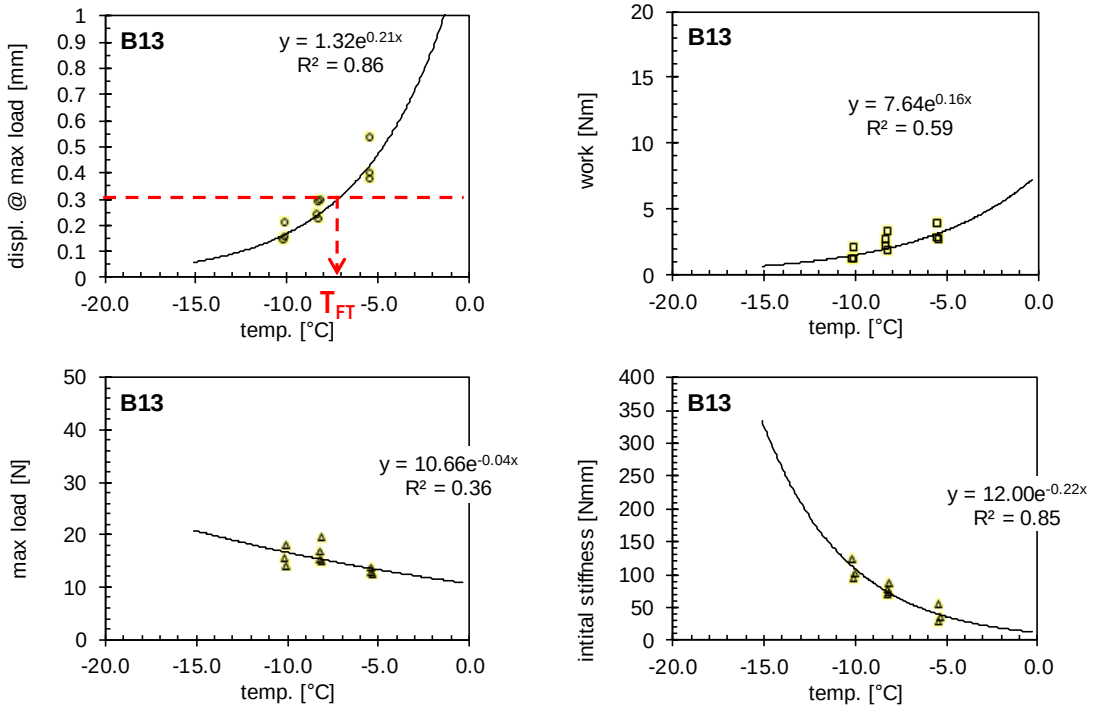


Abbildung 87. Beispielhafte FTT Auswertung für das Bitumen B13.

Abbildung 88 zeigt die Ergebnisse der FTT Prüfungen für die in WP3 untersuchten Bitumen und Mastix. In Abbildung 89 sind die Ergebnisse der FTT für die in WP7 untersuchten Materialen dargestellt wobei man den Einfluss der unterschiedlichen Füller gut erkennen kann.

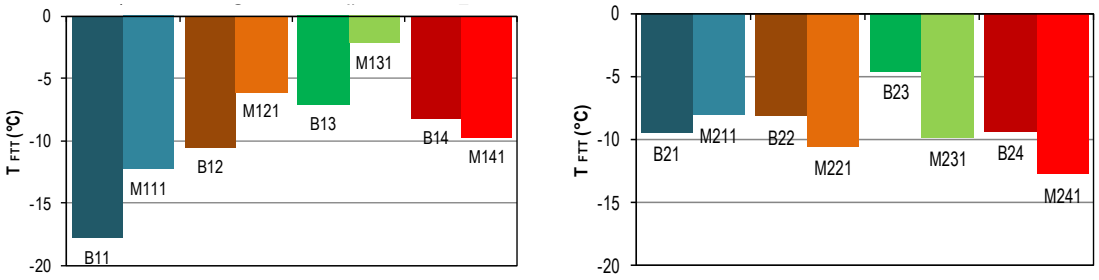


Abbildung 88. T_{FTT} Ergebnisse für die untersuchten Materialien aus WP3.

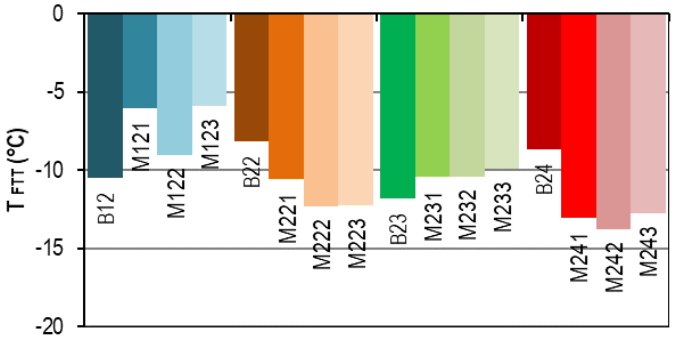


Abbildung 89. T_{FTT} Ergebnisse für die untersuchten Materialien aus WP7.

Abbildung 90 zeigt beispielhaft Rohdaten in Form von Kraft-Weg Diagrammen, wie sie im Double Torsion Test ermittelt werden. Im Diagramm ist die gute Wiederholbarkeit der an zwei unterschiedlichen Materialen durchgeführten Prüfung ersichtlich.

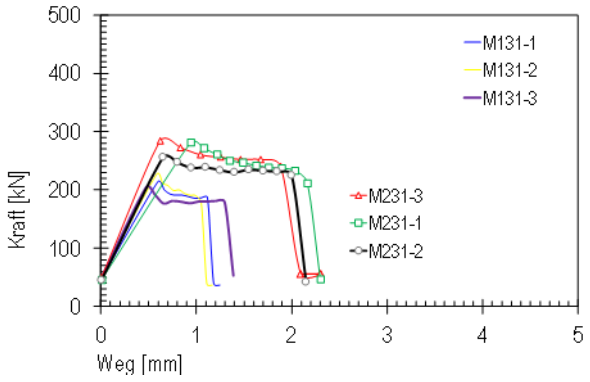


Abbildung 90. DTT Rohdaten für zwei unterschiedliche Materialien mit je 3 Wiederholungen.

Abbildung 91 und Abbildung 92 zeigen die Ergebnisse (Spannungsintensitätsfaktor und stabile Rissfortschrittslänge) der DTT Prüfungen für die in WP3 untersuchten Mastix.

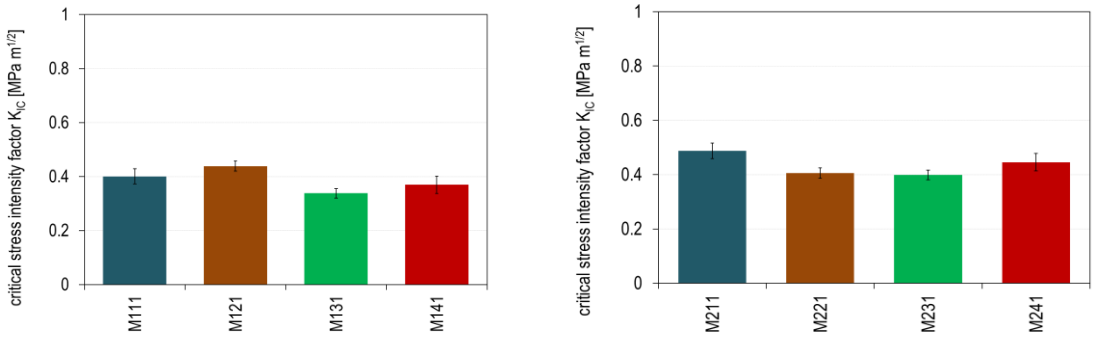


Abbildung 91. Spannungsintensitätsfaktor für die untersuchten Materialien aus WP3.

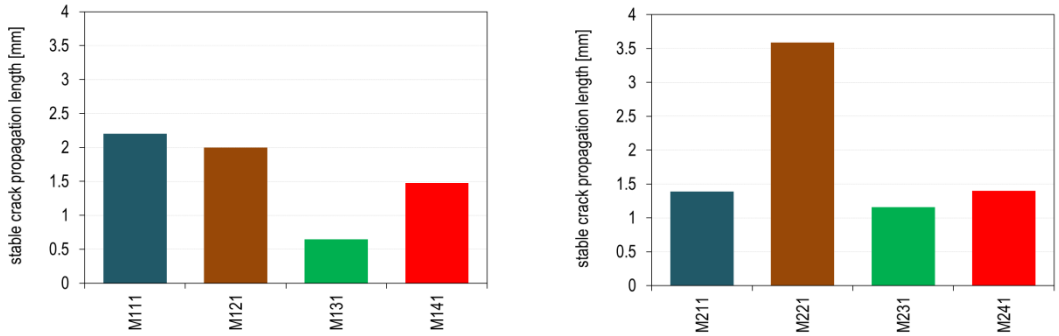


Abbildung 92. stabile Rissfortschrittslänge für die untersuchten Materialien aus WP3.

In Abbildung 93 sind die Ergebnisse (Spannungsintensitätsfaktor und stabile Rissfortschrittslänge) der DTT Prüfungen für die in WP7 untersuchten Mastix dargestellt. Daraus kann man wiederum den Einfluss der unterschiedlichen Füller gut erkennen.

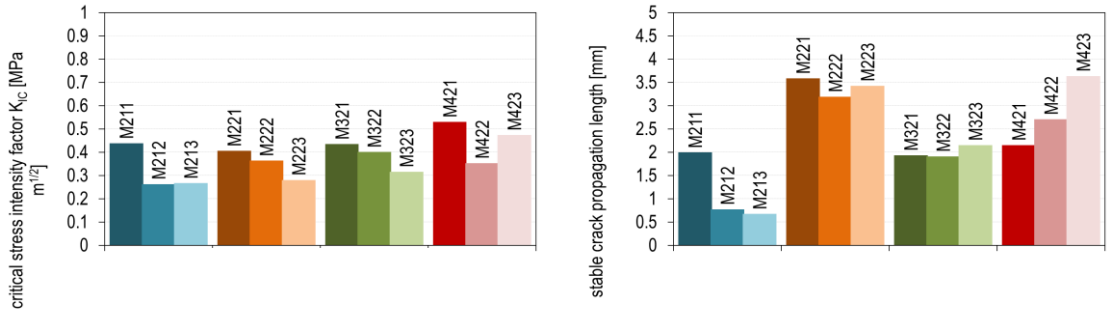


Abbildung 93. Spannungsintensitätsfaktor stabile Rissfortschrittslänge für die untersuchten Materialien aus WP7.

6.2.2 Performanceprüfungen an Asphalt

6.2.2.1 Kälteprüfungen

Abbildung 94 zeigt beispielhaft Rohdaten in Form von Kraft-Weg Diagrammen, wie sie im Semi Circular Bending tests ermittelt werden.

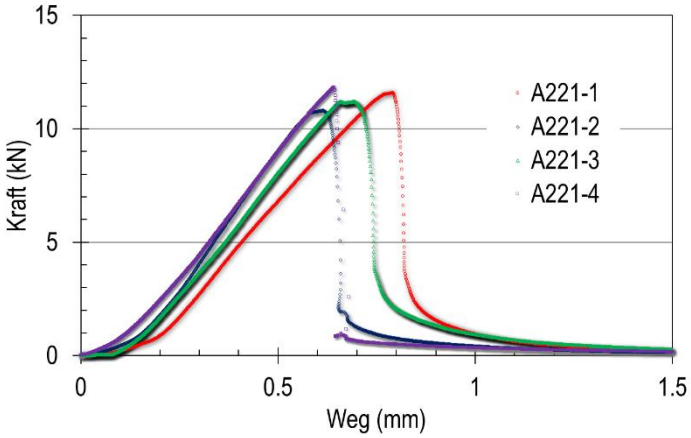


Abbildung 94. SCB Rohdaten für ein Material mit je 4 Wiederholungen.

Abbildung 95 zeigt die Ergebnisse der SCB Prüfungen für die in WP4 untersuchten Bitumen und Mastix. In

Abbildung 96 sind die Ergebnisse der SCB für die in WP7 untersuchten Materialen dargestellt wobei man den Einfluss der unterschiedlichen Füller gut erkennen kann.

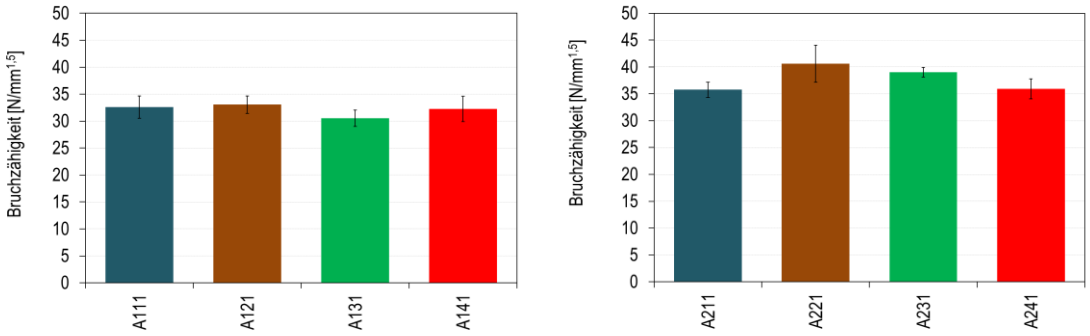


Abbildung 95. SCB Ergebnisse für die untersuchten Materialien aus WP4.

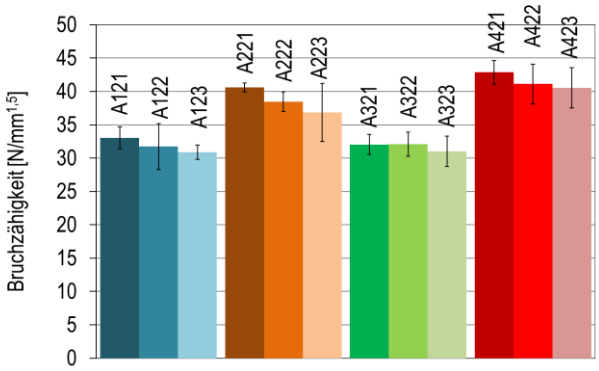


Abbildung 96. SCB Ergebnisse für die untersuchten Materialien aus WP7.

6.2.2.2 Steifigkeitsprüfungen

Alle in WP4 für eine Belastungsfrequenz von 10Hz berechneten Steifigkeitsmodule sind in Abbildung 97 in grafischer Form dargestellt. Abbildung 98 zeigt die ermittelte Hauptkurven ("master curve").

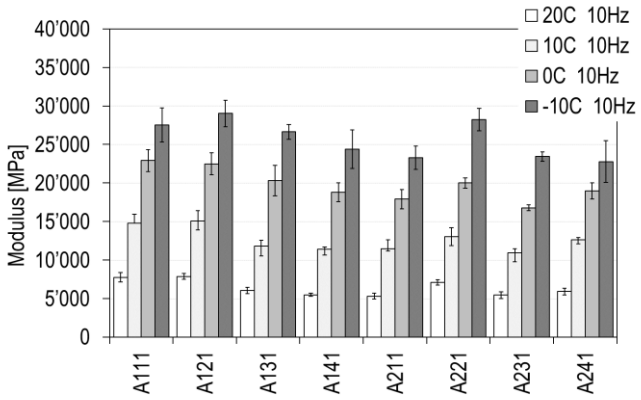


Abbildung 97. Beispiel der Steifigkeitsmodule bei verschiedenen Temperaturen und 10Hz.

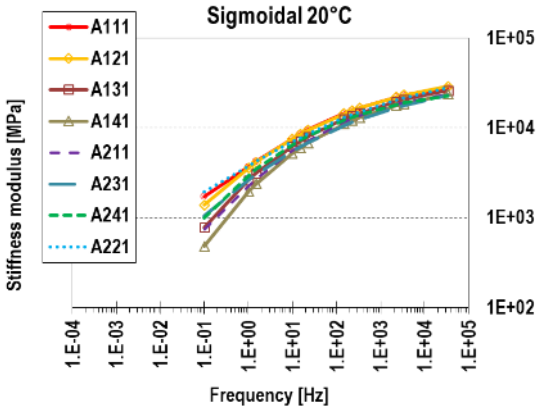


Abbildung 98. Hauptkurven ("Master curves)" von WP4.

In Abbildung 99 sind die Steifigkeitsmodule für 20°C und 10Hz bzw. 0.1Hz für die in WP4 untersuchten Materialen dargestellt wobei man den Einfluss der unterschiedlichen Füller gut erkennen kann. Die Hauptkurven sind in Abbildung 100 zu sehen.

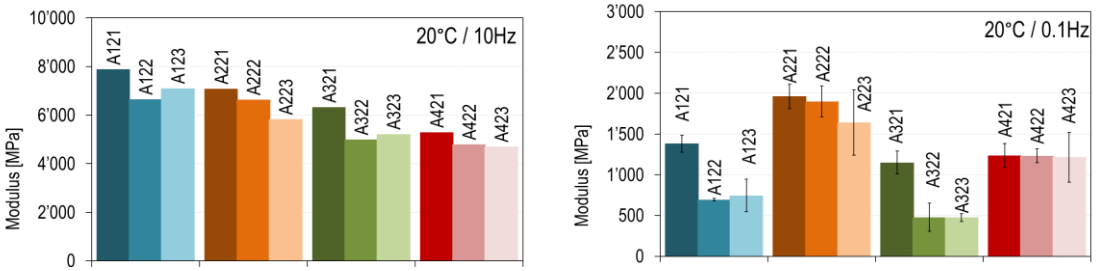


Abbildung 99. Steifigkeitsmodule bei 20°C und 10Hz bzw. 0.1Hz für WP7.

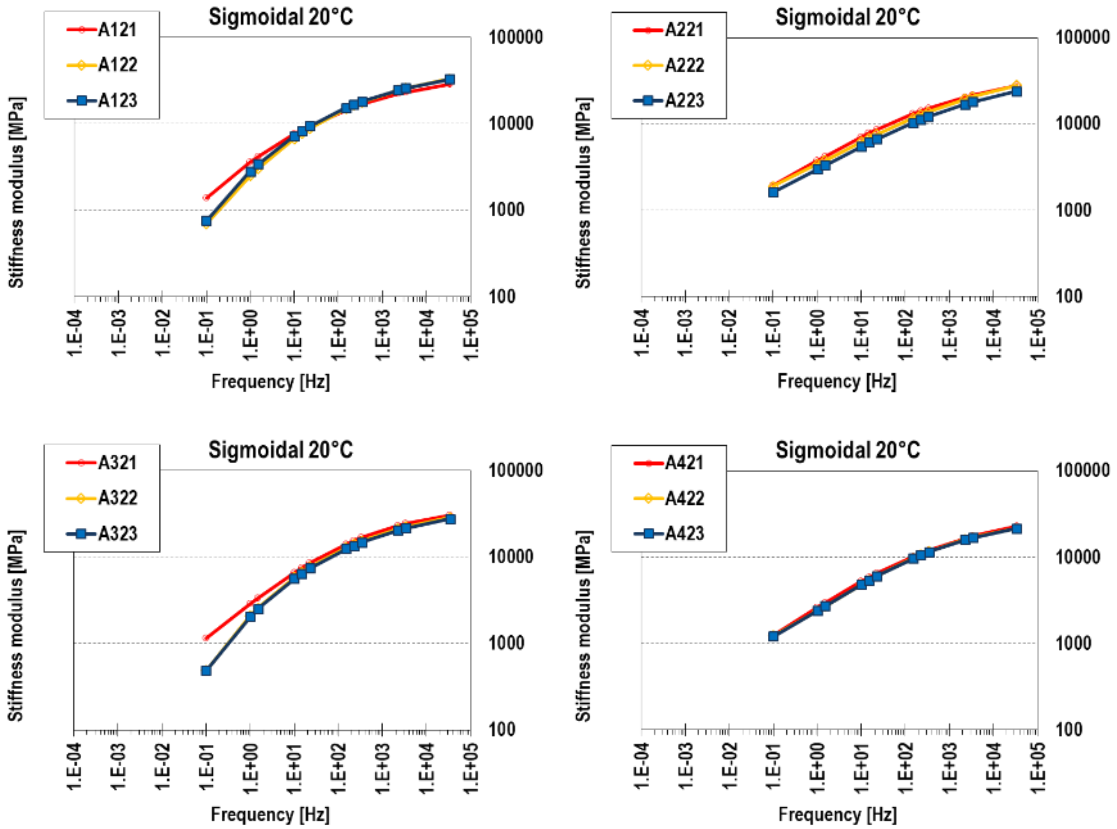


Abbildung 100. Hauptkurven ("Master curve") von WP7.

6.2.2.3 Ermüdungsprüfungen

Abbildung 101 zeigt die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen für die in WP4 untersuchten Asphaltprobekörper. In Abbildung 102 sind die Ermüdungsfunktionen für die in WP7 untersuchten Materialen dargestellt wobei man hier den Einfluss der unterschiedlichen Füller nicht deutlich erkennen kann. Im Gegensatz dazu ist jedoch ein deutlicher Einfluss der Bitumenart (modifiziert/nicht modifiziert) sichtbar.

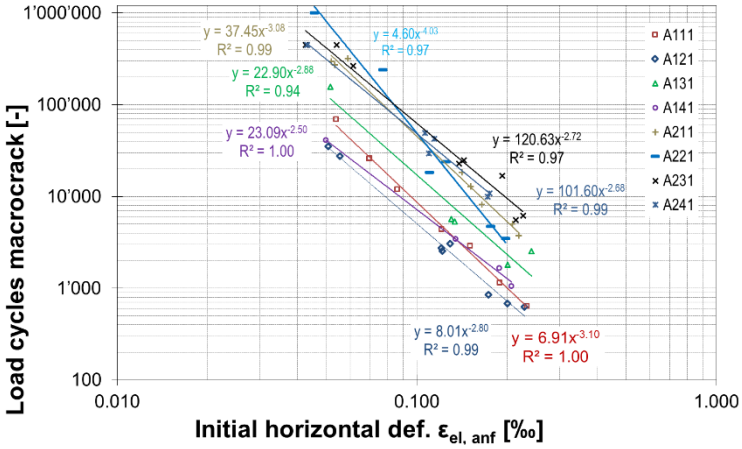


Abbildung 101. Ermüdungsfunktionen aus WP4.

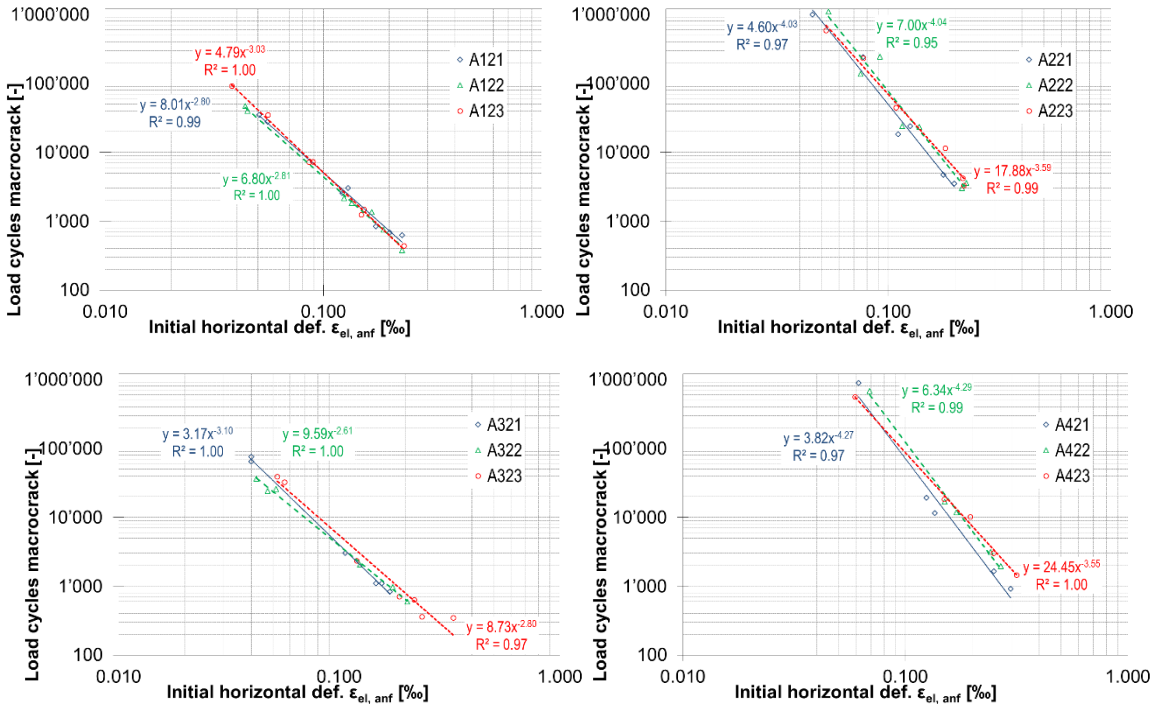


Abbildung 102. Ermüdungsfunktion aus WP7.

6.2.2.4 Verformungsprüfungen

Alle in WP4 Verformungsprüfungen in Form von Spurrinnenprüfungen mit großem Rad sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in grafischer Form dargestellt. Abbildung 103 zeigt die Spurrinnentiefen für die in WP7 untersuchten Materialien. Wie schon bei anderen Prüfungen zu sehen war, sind auch hier die Verformungen bei polymermodifizierten Probekörper deutlich geringer.

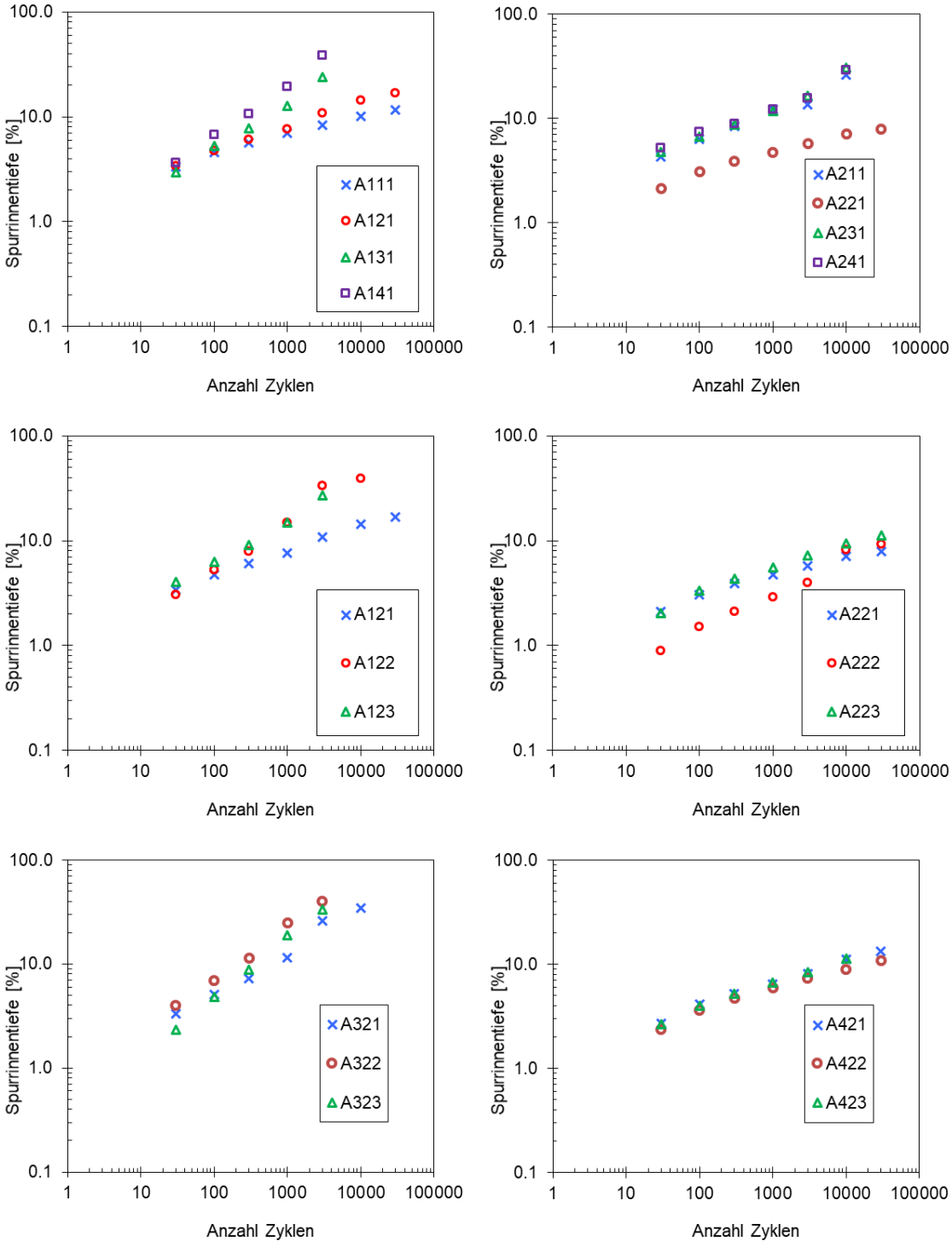


Abbildung 103. Spurrinnentiefen der verschiedenen Materialien aus WP4 und WP7 (Variantenbezeichnung entsprechend Tabelle 3).

6.2.2.5 Großversuch mit MMLS3

Abbildung 104 zeigt die Ansicht einer mit MMLS3 geprüften Platte und die sich ergebende Rissbildung. In Abbildung 105 sind die ausgewerteten Verformungsmessungen für alle in WP6 untersuchten Materialien zu sehen. Bei den im linken Bild abgebildeten Verformungskurven für nicht modifizierte Bitumen konnte die Rissbildung mit Hilfe des LVDT gut erkannt werden. Dagegen war die Risserkennung für die polymermodifizierten Bitumen (rechtes Bild) nur mit Hilfe des DIC möglich (vgl. Abbildung 106).

Abbildung 104. Ansicht einer MMLS3 geprüften Platte.

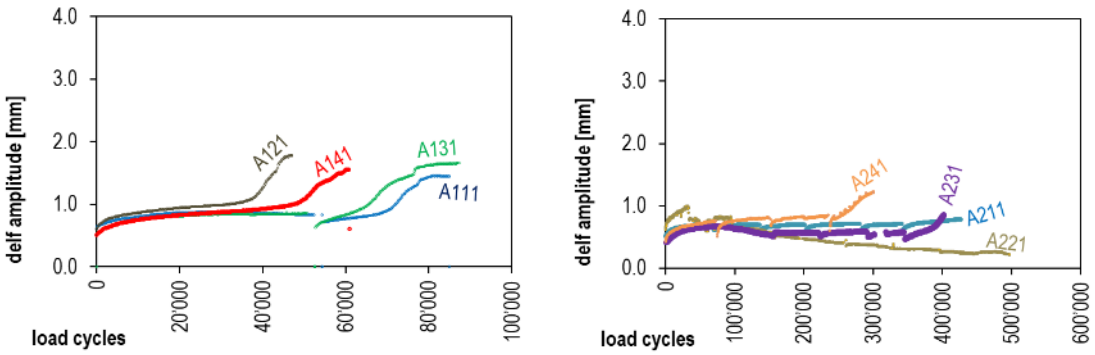


Abbildung 105. Ausgewertete Verformungsmessungen für alle in WP6 untersuchten Materialien. Links: nicht modifiziertes Bitumen 50/70, rechts: polymermodifiziertes Bitumen.

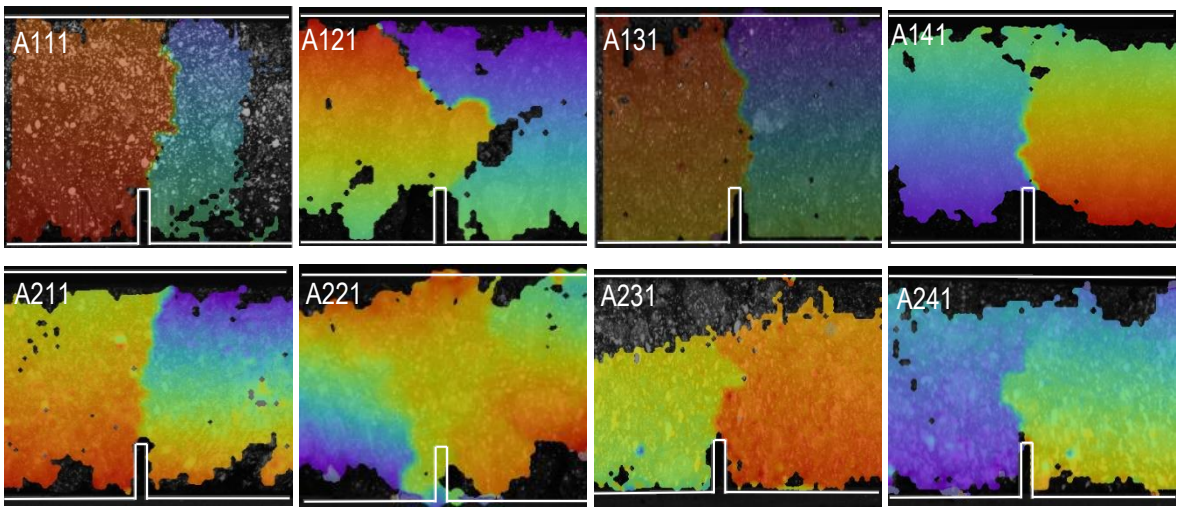


Abbildung 106. DIC Messungen für alle in WP6 geprüften Platten (Beispiel).

Abbildung 107 zeigt die berechneten Lastzyklen bis zum Rissdurchschlag für alle Materialien aus WP6 im Vergleich, wobei man wiederum sehr gut die Unterschiede zwischen polymer modifizierten und nicht modifizierten Bitumen erkennen kann.

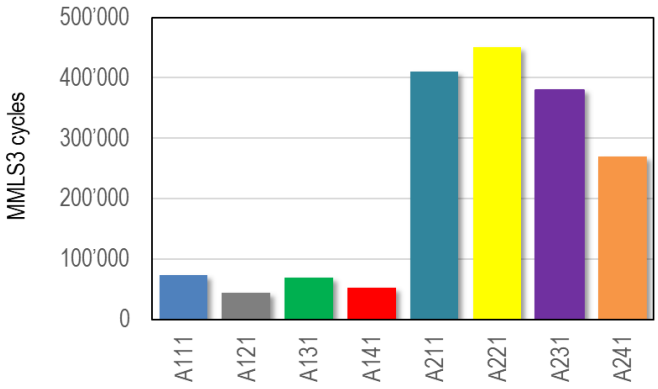


Abbildung 107. MMLS3 Lastzyklen bis zum Rissdurchschlag an die Plattenoberkante.

6.3 Auswertung

6.3.1 Kälteprüfungen

Wie bereits im Kapitel Kälteprüfungen 6.1.1.1 erwähnt, ist die FTT Prüfung bisher nur für nicht modifizierte und polymer modifizierte Bitumen durchgeführt worden. Im Rahmen des VEGAS Projekts wurde diese Prüfung erstmal auch für Mastix durchgeführt. Abbildung 108 zeigt die Gegenüberstellung der T_{FFT} Ergebnisse für Bitumen und Mastixprobekörper. In der Regel ergeben sich bei nicht modifizierten Probekörpern höhere Bruchtemperaturen für

Mastix, bei polymermodifizierten Probekörpern dagegen niedrigere Bruchtemperaturen für Mastix (vgl. auch Abbildung 88 und Abbildung 89).

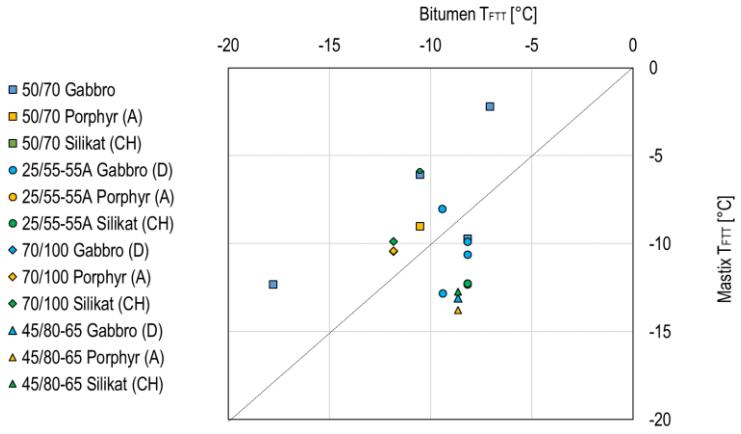


Abbildung 108. Gegenüberstellung T_{FTT} Ergebnisse für Mastix und Bitumen

In Abbildung 109 ist das Tieftemperaturverhalten von Mastix- und Asphaltprobekörpern anhand des DTT und SCB dargestellt. Wie aus der Grafik ersichtlich ergib sich optisch ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen, allerdings ist das Bestimmtheitsmaß mit R2 = 0.2272 sehr klein.

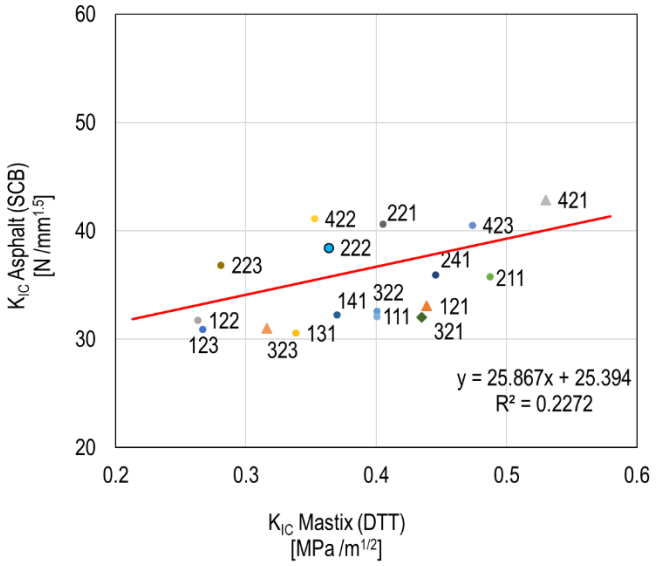


Abbildung 109. Gegenüberstellung der DTT und SCB Ergebnisse für Mastix bzw. Asphalt.

6.3.2 Ermüdungsprüfungen und Großversuche MMLS3

Die für die Validierungsversuche hergestellten Asphaltplatten wurden mit zwei unterschiedlichen Prüfverfahren auf ihren Ermüdungswiderstand getestet. Zum einen wurden zylindrische Probekörper aus Platten gebohrt, zum anderen wurden Prüfplatten mit dem Verkehrslastsimulator MMLS3 beansprucht. Abbildung 110 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus beiden Versuchen wobei die Ermüdungslastwechsel für eine elastische Anfangsdehnung $\varepsilon_{el,\ anf}$ [‰]=0.1 aus der Ermüdungsfunktion bestimmt wurden. Wie die Abbildung zeigt ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Prüfverfahren.

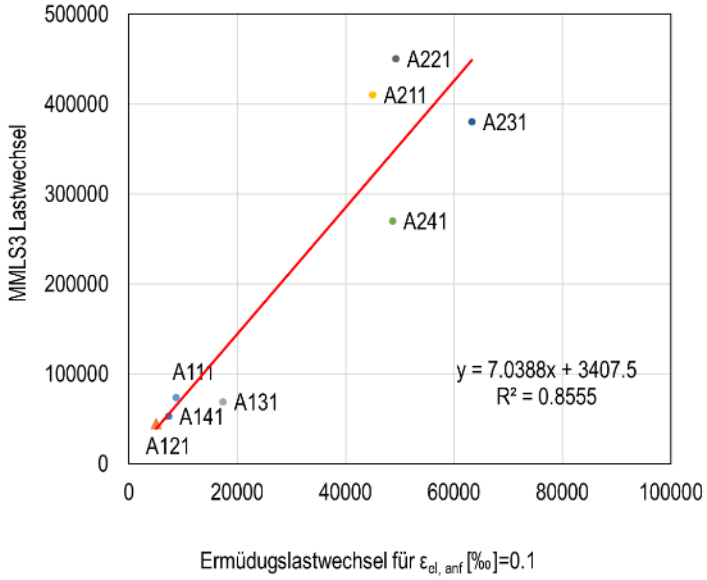


Abbildung 110. MMLS3 Lastzyklen bis zum Rissdurchschlag an die Plattenoberkante

6.4 Zusammenfassung Teilbericht C

Im Rahmen des VEGAS Projekts wurden von der Empa verschiedene Performance Prüfungen zur Beschreibung des Materialverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen an Bitumen, Mastix und Asphalt durchgeführt. Bei einigen dieser Prüfmethoden handelt es sich um normierte Verfahren, während andere Prüfmethoden neu entwickelt oder für die vorliegenden Anwendungen adaptiert wurden.

Die FTT Prüfung ist in der technischen Spezifikation CEN/TS 15963 beschrieben und hat die Bestimmung des Tieftemperaturverhaltens von nicht modifizierten und polymermodifizierten Bitumen zum Ziel. Die Prüfung basiert auf der Berechnung der Bruchzähigkeitstemperatur T_{FTT} (Fracture Toughness temperature), die in einem 3-Punkt Biegeversuch an einer gekerbten Probe bestimmt wird. Im Rahmen des Projekts wurde diese Prüfung erstmals für

Mastix durchgeführt. Die Probekörperherstellung ist, wie experimentelle Vorarbeiten und die Auswertung von Literatur zeigte, von entscheidender Bedeutung für die Ermittlung aussagekräftiger und repräsentativer Ergebnisse. Im Fall der Mastixprobekörper stellte die Herstellung aufgrund der hohen Viskosität des Materials und der Schwierigkeit dieses so in die Formen zu füllen, dass Luftblasen nicht zu Diskontinuitäten führten, eine besondere Herausforderung dar. Dies gelang mit einiger Übung jedoch relativ gut und die Prüfergebnisse zeigten eine gute Wiederholbarkeit. Die Gegenüberstellung der Prüfergebnisse von mit dem gleichen Bitumentyp hergestellten Bitumen- und Mastixprobekörper ergab folgenden Zusammenhang bzw. Trend: Von einem Fall abgesehen wiesen alle nicht modifizierten Bitumenprobekörper niedrigere Temperaturen TFTT auf als die entsprechenden Mastixprobekörper. Dagegen verhielt es sich im Fall der polymermodifizierten Probekörper entgegengesetzt: Hier zeigten die Bitumenprobekörper höhere Temperaturen TFTT als die mit dem gleichen Bitumen hergestellten Mastixprobekörper.

Im Fall der Doppel Torsionsprüfung DTT gibt es keine Norm und auch eine Literaturrecherche ergab nur wenige Beispiele für die Verwendung des Doppeltorsionsprinzips zur Bestimmung der Rissausbreitung bei tiefen Temperaturen von Asphaltprobekörpern. Es war im Rahmen des vorliegenden Projekts daher notwendig, eine Methode zur Herstellung und Prüfung der plattenförmigen Probekörper zu entwickeln. So wurden in einem ersten Schritt Prüfformen konstruiert, die die Herstellung von gekerbten Probekörper ohne nachträgliches Einschneiden einer Nut und das Ausformen ohne Probekörperbeschädigung ermöglichten. Weiterhin wurde ein neues Setup zur Lasteinleitung konstruiert. Obwohl das Ausformen von plattenförmigen Bitumenprobekörpern der geforderten Abmessungen eine große Schwierigkeit dargestellt, gelang es unbeschädigte Probekörper herzustellen. Die erhaltenen Probekörperplatten wurden in einer Klimakammer bei -20°C belastet, wobei die erhaltenen Kraft-Weg-Diagramme eine gute Übereinstimmung mit den aus der Literatur entnommenen aufwiesen. Die Auswertung der Resultate erfolgte anhand des Spannungsintensitätsfaktors und der Risslänge.

Auf Asphaltebene wurde das Tieftemperaturverhalten mit dem Biegeversuch - Rissausbreitung mittels Halbzylinder (Semi Circular Bending) SCB nach der Europäischen Norm 12697-44 bestimmt. Hier wurden mit einer Nut versehene halbkreisförmige Probekörper durch eine Dreipunkt-Biegung bei 0°C mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5mm/min so belastet, Die Last steigt bis zu einem Höchstwert *F*max an, der in direkter Beziehung zur Bruchzähigkeit des Probekörpers steht. Anhand der Versuchsergebnisse zeigte sich, dass die mit den deutschen Mineralstoffen (Gabbro) hergestellten Asphaltprobekörper die

höchste und die mit dem Schweizer Mineralstoffen (Silikat) hergestellten die niedrigsten Bruchzähigkeiten aufwiesen. Ebenfalls zeigten Probekörper mit polymermodifizierten Bitumen eine bessere Bruchzähigkeit.

Der Vergleich zwischen den anhand der jeweiligen Spannungsintensitätsfaktoren ermittelten Ergebnissen von Mastixprobekörpers aus dem DTT und Asphaltprobekörpern aus dem SCB Versuch ergab optisch einen linearen Zusammenhang, der allerdings einen sehr niedrigen Bestimmtheitsmaß R^2 aufweist.

Die Steifigkeit bei tiefen und mittleren Temperaturen der im Forschungsprojekt untersuchten Asphaltprobekörper wurde nach der deutschen Richtlinie AL Sp-Asphalt 09 bestimmt. Nach dieser Richtlinie werden die Probekörper bei Temperaturen zwischen -10°C und 20°C und Frequenzen von 0.1Hz bis 10Hz geprüft. Aus den Prüfergebnissen können dann Hauptkurven (Masterkurven) erstellt werden mit deren Hilfe der Steifigkeitsmodul für jede Temperatur-Frequenzkombination ermittelt werden kann. Aus den Versuchsergebnissen ergeben sich für Asphaltprobekörper mit polymermodifizierten Bitumen bei tiefen Temperaturen höhere Steifigkeitswerte. Ein Vergleich zwischen den mit länderspezifischen Mineralstoffen hergestellten Asphaltprobekörper zeigt wiederum für die deutschen Mineralstoffe (Gabbro) die höchsten Steifigkeiten.

Dieselbe deutsche Richtlinie AL Sp-Asphalt 09 wurde auch zur Bestimmung des Ermüdungswiderstands von Asphaltprobekörpern bei 20°C verwendet. Mit Hilfe des in der Richtlinie beschrienen Verfahrens ist es möglich die Ermüdungsfunktion zu bestimmen, die die Anzahl der Belastungszyklen bis zum Bruch als Funktion der elastischen Anfangsverformung beschreibt. Wiederum wurde ein Vergleich für die aus unterschiedlichen Mineralstoffen hergestellten >Asphaltprobekörper durchgeführt, wobei die unterschiedlichen Gesteine (Gabbro (D), Porphyr (A) and Silikat (CH)) nicht zu signifikanten Unterschieden im Ermüdungsverhalten führten. Dagegen war der Ermüdungswiderstand für alle Asphaltprobekörper mit polymermodifiziertem Bitumen höher als für Asphaltprobekörper mit nicht modifiziertem Bitumen.

Diese Ergebnisse stehen auch in guter Übereinstimmung mit den Validierungsversuchen mit dem Verkehrslastsimulator MMLS3. Diese Validierungsprüfungen wurden an großen (1.6 m x 0.6 m x 0.04 m) gekerbten Platten durchgeführt, wobei der Lasteintrag durch den Verkehrslastsimulator in Form eines rollenden Rades als Simulation der realen Belastung auf der Straße erfolgt und so durch wiederholte Biegung zur einer Rissbildung und letztlich zum Rissdurchschlag führt. Bei dieser Art Prüfung wird die Rissbildung- und Ausbreitung

durch eine vorgefräste Nut erleichtert und es wird die Anzahl der Überrollungen des Verkehrslastsimulators bis zum Durchschlagen des Risses an die Probekörperoberseite bestimmt. Dies ist keine genormte Prüfung und ihre Durchführung verlangt eine genaue Prozedur zur Bestimmung der Rissentstehung und –entwicklung. Hierzu wurden sowohl Verformungssensoren (LVDTs) als auch ein Digitales Bildkorrelationssystem (digital imaging correlation system DIC) verwendet,

Schließlich wurden noch der Widerstand gegen plastische Verformungen für die verschiedenen Asphaltprobekörper, wie er im Hochtemperaturbereich auftritt, nach der Europäischen Norm EN 12697-22 mit dem Gerät mit großem Rad bestimmt. Bei dieser Prüfung zeigten wiederum die mit polymermodifiziertem Bitumen hergestellten Asphaltprobekörper einen höheren Widerstand als diejenigen mit nicht modifiziertem Bitumen.

7 GESAMTZUSAMMENFASSUNG

Die Erreichung einer guten Asphaltperformance – also eines guten Gebrauchsverhaltens der Asphaltstraße unter den Einwirkungen aus Verkehr, Witterung und Klima – ist das Ziel eines technisch und wirtschaftlich effizienten Straßenbaus. Über gebrauchsverhaltensorientierte Laborprüfungen (Performance-Prüfungen) an verdichteten Asphaltproben kann das Gebrauchsverhalten abgeschätzt und so die Eignung einer bestimmten Asphaltart bzw. -sorte als Schicht im Straßenoberbau nachgewiesen werden. Allerdings erfordern Performance-Prüfungen einen erheblichen Prüfaufwand und eignen sich deshalb kaum für Routineuntersuchungen. Daher werden sie in der Baupraxis in den D-A-CH-Ländern heute praktisch nicht angewandt – ausgenommen zur Entwicklung von neuen Asphaltrezepturen und Schichtaufbauten, bei Schadensgutachten und Großprojekten.

Ziel des Forschungsprojekts VEGAS war es, die gebrauchsverhaltensorientierten Prüfungen an Asphalten in eine praxistaugliche Prüfsystematik zu überführen. Es sollte ein vereinfachtes Prüfkonzept unter Anwendung von verschiedenen Prüfmethoden an Bitumen und Asphaltmastix (Bitumen-Füller-Gemisch) entwickelt werden, um damit systematische Zusammenhänge zwischen dem Gebrauchsverhalten von Bitumen bzw. Asphaltmastix und Asphalt zu identifizieren.

Durch die vereinfachte Prüfsystematik sollte die Voraussetzung geschaffen werden, die grundsätzliche Idee der gebrauchsverhaltensorientierten Ansprache von bitumengebundenen Straßenbaustoffen im Labor auch in der Baupraxis zu etablieren.

Zur Entwicklung einer zuverlässigen Prüfsystematik wurde davon ausgegangen, dass das Gebrauchsverhalten von Asphalt von der Bitumenqualität bzw. Mastixqualität maßgeblich

gesteuert wird. Ein zu den empirischen Richtlinien konformer Asphalt, d. h. der alle empirischen Grenzwerte des Gebrauchsverhaltens hinsichtlich Mischgutzusammensetzung, Herstellung und Einbau erfüllt, strukturell einwandfrei intakt und makroskopisch ungeschädigt ist, sollte wesentliche Gebrauchseigenschaften aufweisen, die dominant durch das Bindemittel bzw. die Asphaltmastix gesteuert werden.

Die Vorgehensweise im Forschungsprojekt VEGAS zielte darauf ab, Korrelationen zwischen der Performance von Bitumen, einer daraus hergestellten Asphaltmastix und eines daraus hergestellten Asphalts zu identifizieren. Dazu mussten geeignete Kennwerte (und geeignete Prüfmethoden) gefunden werden, die das Gebrauchsverhalten von Bitumen, Asphaltmastix und Asphalt in vergleichbarer Weise beschreiben.

Weil bitumenhaltige Baustoffe aufgrund ihrer ausgeprägten viskoelastischen Eigenschaften ein stark temperaturabhängiges Materialverhalten zeigen, musste die Suche nach möglichen Korrelationen in unterschiedlichen Temperaturbereichen erfolgen. Es wurden drei Temperaturbereiche unterschieden, in denen die Materialeigenschaften mit jeweils unterschiedlichen Prüfverfahren sowohl auf Asphaltebene, als auch auf Bitumen- und Mastixebene angesprochen wurden. Der Tieftemperaturbereich zur Ermittlung der Tieftemperaturbeständigkeit wurde von -40 bis 0°C definiert, der Mitteltemperaturbereich zur Ermittlung des Ermüdungswiderstand von -10 bis 40°C und der Hochtemperaturbereich zur Ermittlung des Verformungswiderstand von 30 bis 90°C.

Im Forschungsprojekt VEGAS wurden 18 unterschiedliche Asphaltvarianten labortechnisch hergestellt und deren wesentliche Gebrauchseigenschaften (Tieftemperaturbeständigkeit, Steifigkeit, Ermüdungsbeständigkeit und Verformungsbeständigkeit) über bekannte Performance-Prüfungen nach den Technischen Regelwerken bestimmt. Diese umfassten zur Prüfung des Verformungswiderstands im Hochtemperaturbereich den Dynamischen Stempeleindringversuch (DSEV), die Triaxialprüfung (TCCT, triaxial cyclic compression test) und den Spurrinnentest. Zur Prüfung der Steifigkeit (im -Bereich linear viskoelastischen Materialverhaltens) bzw. des Ermüdungswiderstands wurden eingesetzt die Zug-Druck-Wechsel-Prüfung (ZDW), der 4-Punkt-Biege-Versuch (4PB), der Spaltzug-Schwellversuch (SSV) und der Mobile Load Simulator (MLS). Der Widerstand gegen Rissbildung wurde geprüft mittels Zugversuch bei Kälte (TSRST, thermal stress restrained specimen test), Abkühlversuch (UTST, uniaxial thermal stress test) und der Semi-Circular-Bending-Test (SCB).

Weiterhin wurden die Gebrauchseigenschaften der 18 entsprechenden Asphaltmastixvarianten (Bitumen-Füller-Gemischen) und der 10 zugehörigen unterschiedlichen Bitumen ermittelt. Zur Prüfung der Gebrauchseigenschaften

entsprechend den zuvor definierten Temperaturbereichen wurden vorzugsweise Prüfungen am DSR eingesetzt. Diese beinhalteten Kriechprüfungen, Ermüdungsprüfungen, Relaxationsprüfungen, sowie Temperatur-Frequenz-Sweeps, zu denen im Anhang detaillierte Arbeitsanleitungen zur Verfügung gestellt werden. Begleitend wurden im Tieftemperaturbereich der Fracture Toughness Test (FTT) und der Doppel-Torsion-Test (DTT) durchgeführt, um das Bruchverhalten zu studieren.

Aus den im Projekt erprobten Performance-Prüfungen wurden aussagekräftige Materialparameter abgeleitet, mit denen das Gebrauchsverhalten der geprüften Materialien bewertet werden kann. Insbesondere das Dynamische Scherrheometer (DSR) zeigt ein großes Potenzial bei der Ermittlung der Gebrauchseigenschaften von Bitumen und Asphaltmastix.

Basierung auf den Untersuchungen im Projekt VEGAS wurden eindeutige Zusammenhänge zwischen dem Materialverhalten von Bitumen, Mastix und Asphaltmischgut identifiziert, sodass eine Prognose der Asphalteigenschaften über vereinfachte Bitumen- bzw. Mastixprüfungen möglich ist.

Zusätzlich erfolgte die rheologische Modellierung der Prüfergebnisse über das 2S2P1D-Modell und das Mehrskalenmodell, mit denen das Materialverhalten erfolgreich abgebildet werden konnte. Über die Modellparameter besteht somit eine weitere Bewertungs- und Prognosemöglichkeit der zu erwartenden Asphalteigenschaften basierend auf Bitumen- bzw. Mastixprüfungen.

Aufgrund der beschränkten Anzahl an unterschiedlichen Materialvarianten, ist eine Festlegung von Grenzwerten für die ermittelten Materialparameter erst nach weiterführenden Analysen von Asphaltvarianten zielführend. Die Erprobung der im Projekt VEGAS erarbeiteten Prüfsystematik an weiteren (auch kritischen) Asphaltvarianten ist wünschenswert, damit mittelfristig eine vielversprechende Möglichkeit für eine aussagekräftige Materialklassifizierung entstehen kann.

LITERATUR

Alisov, A. 2017. Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie. Dissertation, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 33, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

AAHSTO TP 101-14, 2014. Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. American Association of State Highway and Transportation Officials (AAHSTO), Washington, DC.

AAHSTO M 320-17, 2017. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials (AAHSTO), Washington, DC.

Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Sharma, M. G., Antle, C. E. & Button, J. 1994. SHRP-A-369, Binder Characterization and Evaluation, Volume 3: Physical Characterization. National Research Council, Washington, DC.

Arraigada, M., Piemontese, F., Treuholz, A. & Partl, M. N. 2017. Einfluss kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung mit der Grossversuchsanlage MLS10 auf die Widerstandsfähigkeit eines T2 Norm-Belages, Forschungsprojekt ASTRA 2013/006 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA), eingereicht.

Arraigada, M., Treuholz, A. & Partl, M. N. 2015. Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10, VSS 2011/013 Report Nr.1545. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Ittigen.

Arraigada, M., Treuholz, A. & Partl, M. N. 2016a. Study of the Bearing Capacity of Swiss Standard Pavements Under MLS10 Loading. In: The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability (Eds.: J. P. Aguiar-Moya et al.), 241–255, Springer, Cham.

Arraigada, M., Treuholz, A. & Partl, M. N. 2016b. Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T4-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10, VSS 2011/014 Report Nr.1558. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Ittigen.

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. 2016. Multivariate Analysemethoden, Eine anwendungsorientierte Einführung. 14. Auflage, Springer, Berlin.

Blab, R.; Eberhardsteiner, J. (Eds.) 2007. Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen, Tätigkeitsbericht des Christian Doppler Labors 2006 bis 2007. Technische Universität Wien, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Wien.

Bortz, J. & Schuster, C. 2010. Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin.

Büchner, J., Wistuba, M. P., Remmler, T. & Wang, D. 2019. On low temperature binder testing using DSR 4 mm geometry. Materials and Structures, Vol. 52, Issue 113, Springer. DOI: 10.1617/s11527-019-1412-3.

Clyne, T. R. & Marasteanu, M. O. 2004. Inventory of Properties of Minnesota Certified Asphalt Binders, Final Report M/RC-2004-35. Minnesota Department of Transportation.

Coenen, A. 2011. Image Analysis of Aggregate Structure Parameters as Performance Indicators of Rutting Resistance. PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin.

DIN ISO 9277, 2014. Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption - BET-Verfahren. Deutsche Norm, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

DIN 52050, 2018. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - BTSV-Prüfung. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.

Di Benedetto, H. 1990. Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique. Proc., 4th International RILEM Symposium, International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM), October 23-28, 1990, Budapest. In: Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control (Eds.: H. W. Fritz, E. Eustacchio), 385–401, Chapman and Hall.

Dragon, I. 2015. Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf die Ermüdungsbeständigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Straßenwesen.

EN 12697-22, 2007. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 22: Spurbildungstest. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 1097-7, 2008. Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 12697-44, 2010. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 44: Bestimmung der Rissausbreitung mittels Halbzylinder-Biegeversuch; Deutsche Fassung EN 12697-44:2010. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 15963, 2010. Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Bruchwiderstandstemperatur mittels eines Drei-Punkt-Biegeversuches an einem gekerbten Probekörper. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 12697-26, 2012. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 933-1, 2012. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 1097-6, 2013. Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 12607-1, 2014. Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 12697-24, 2015. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 1426, 2015. Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 1427, 2015. Bitumen und Bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 12697-35, 2016. Asphalt - Prüfverfahren - Teil 35: Labormischung. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 12697-25, 2016. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 25: Druck-Schwellversuch. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN 13108-1, 2016. Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

EN ISO 17892-4, 2016. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel.

TP Asphalt-StB, Teil 33, 2007. Technische Prüfvorschriften für Asphalt - Teil 32: Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV), Ausgabe 2007. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

AL Sp-Asphalt, 2009. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung, Ausgabe 2009. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

TL Asphalt-StB, 2013. Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007/Fassung 2013. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

AL DSR-Prüfung (T-Sweep), 2014. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep, Ausgabe 2014. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

AL DSR-Prüfung (MSCRT), 2016. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scher-Rheometer (DSR) - Teil 2: Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test), Ausgabe 2016. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

AL BBR-Prüfung, 2017. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR), Ausgabe 2017. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag, Köln.

Füssl, J. & Lackner, R. 2011. Multiscale Fatique Model for Bituminous Mixtures. International Journal of Fatigue, Vol. 33, Issue 11, 1435–1450.

Greene, W. H. 2018. Econometric analysis. 8th edition, Pearson, New York.

Grönniger, J. 2018. Ansprache der inneren Struktur von Asphalt und Einfluss auf ausgewählte Asphalteigenschaften. Dissertation, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 34, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J. & Anderson, R. E. 2014. Multivariate Data Analysis. 7th edition, Pearson New International Edition.

Hartung, J., Elpelt, B. & Klösener, K.-H. 2009. Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik; mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen. 15. Auflage, Oldenbourg Verlag, München.

Hayter, A. J. 2013. Probability and statistics for engineers and scientists. 4th edition, Brooks/Cole, Cengage Learning, Boston, MA.

Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C. M. & Bahia, H. U. 2011. Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2207, Issue 1, 99–106. DOI: 10.3141/2207-13.

Hospodka, M., Hofko, B. & Blab, R. 2015. Entwicklung einer Prüfmethode zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit von Asphaltmastix, Vortrag. Proc., 4. Dresdner Asphalttage, Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, 10. Dezember 2015, Dresden (Ed.: F. Wellner), 125–130.

Johnson, C. M. 2010. Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method. Dissertation, University of Visconsin at Madison.

Johnson, C. M., Bahia, H. U. & Coenen, A. 2009. Comparison of Bitumen Fatigue Testing Procedures Measured in Shear and Correlations with Four-Point Bending Mixture Fatigue. Proc., 2nd Workshop in Four Point Bending, EAPA & Eurobitume, September 24-25, Guimarães, Portugal, Guimarães.

Kim, Y. R. 2009. Modeling of Asphalt Concrete. McGraw-Hill construction, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA.

Kim, Y.-R., Song, I. & Little, D. N. 2003. Use of Dynamic Mechanical Analysis to Predict Damage in Asphalt Mastic. Proc., 11th Annual Symposium: Aggregates - Asphalt Concrete, Bases and Fines, International Center for Aggregates Research, April 27-30, Texas, Austin.

Lackner, R., Blab, R., Jäger, A., Spiegl, M., Kappl, K., Wistuba, M. P. et al. 2004. Multiscale Modeling as the Basis for Reliable Predictions of the Behaviour of Multi-Composed Materials, Chapter 8. In: Progress in Engineering Computational Technology (Eds.: B. H. V. Topping, C. A. Mota Soares), 153–187, Saxe-Coburg Publications.

Li, X.-J. & Marasteanu, M. O. 2009. Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. Experimental Mechanics, Vol. 50, 867–876, Springer, Netherlands.

Liao, M.-C., Chen, J.-S. & Tsou, K.-W. 2012. Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler-Mastics and Asphalt Mixture. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, Issue 7, 916–923, American Society of Civil Engineers (ASCE). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000450.

Little, D. N.; Allen, D. H.; Bhasin, A. (Eds.) 2018. Modeling and Design of Flexible Pavements and Materials. Springer, Cham.

Meissner, G. 2014. Correlation risk modeling and management, An applied guide including the Basel III correlation framework-- with interactive models in Excel/VBA. 1st edition, Wiley, Singapore.

Montgomery, D. C. & Runger, G. C. 2014. Applied statistics and probability for engineers. 6th edition, Wiley.

Olard, F. & Di Benedetto, H. 2003. General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. Road Materials and Pavement Design, Vol. 4, Issue 2, 185–224, Taylor & Francis. DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946.

Olard, F., Di Benedetto, H., Eckmann, B. & Triquigneaux, J.-P. 2003. Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Binders and Mixtures at Low and Intermediate Temperatures. Road Materials and Pavement Design, Vol. 4, Issue 1, 77–107, Taylor & Francis. DOI: 10.1080/14680629.2003.9689941.

Paris, P. & Erdogan, F. 1963. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering, Vol. 85, Issue 4, 528–533. DOI: 10.1115/1.3656900.

Partl, M. N., Canestrari, F., Grilli, A. & Gubler, R. 2008. Characterization of Water Sensitivity of Asphalt Mixtures with Coaxial Shear Test. International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 9, Issue 2, 247–278, Taylor & Francis.

Partl, M. N., Raab, C. & Arraigada, M. 2015. Innovative Asphalt Research using Accelerated Pavement Testing. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 23, Issue 3, 269–280. DOI: 10.6119/JMST-014-0326-1.

Partl, M. N. & Sokolov, K. 2009. Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests, ASTRA 2001/052, Report Nr. 1241. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Ittigen.

Peebles, G. R. & Mehta, Y. 2013. Characterization of Fatigue Properties of Binders and Mastics at Intermediate Temperatures using Dynamic Shear Rheometer, Final Report, UTRC-RF Project Nr. 49111-24-22. Rowan University, Glassboro, NJ.

Pérez-Jiménez, F. E., Reyes-Ortiz, O. J., Miró, R. & Hernández-Noguera, A. 2008. Relation between the Fatigue Behaviour of Asphalt Binders and Bituminous Mixtures. Proc., 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, EAPA & Eurobitume, 21-23 May 2008, Kopenhagen.

Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., de La Roche, C., Bankowski, W., Partl, M. N. & Grenfell, J. 2011. Rutting of bituminous mixtures, Wheel tracking tests campaign analysis. Materials and Structures, Vol. 44, Issue 5, 969–986. DOI: 10.1617/s11527-010-9680-y.

Planche, J. P. 2004. Evaluation of fatigue properties of bituminous binders. Materials and Structures, Vol. 37, Issue 269, 356–359. DOI: 10.1617/14127.

Poulikakos, L. D., Pittet, M., Dumont, A.-G. & Partl, M. N. 2015. Comparison of the two point bending and four point bending test methods for aged asphalt concrete field samples. Materials and Structures, Vol. 48, Issue 9, 2901–2913. DOI: 10.1617/s11527-014-0366-8.

Poulikakos, L. D., Pittet, M., Partl, M. N. & Dumont, A.-G. 2006. Performance oriented requirements for bituminous mixtures, VSS 2006/503, Report Nr. 1434. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Ittigen.

Raab, C. & Partl, M. N. 2016. Forschungspaket PLANET EP-4: Gebrauchsdauer und Alterung, VSS 2010/0544 Bericht Nr. 1583. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Ittigen.

Riccardi, C. 2017. Mechanistic modeling of bituminous mortars to predict performance of asphalt mixtures containing RAP. Dissertation, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig; Università degli Studi di Firenze, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 32.

Riccardi, C., Cannone Falchetto, A., Losa, M. & Wistuba, M. P. 2018. Development of simple relationship between asphalt binder and mastic based on rheological tests. Road Materials and Pavement Design, Vol. 19, Issue 1, 18–35, Taylor & Francis. DOI: 10.1080/14680629.2016.1230514.

Ross, S. M. 2014. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. 5th edition, Academic Press, London.

Rowe, G. M. & Bouldin, M. G. 2000. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Restistance of Asphalt Mixtures. Proc., 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, EAPA & Eurobitume, 20-22 September 2000, Barcelona.

Santagata, E., Baglieri, O., Alam, M. & Dalmazzo, D. 2014. A novel procedure for the evaluation of anti-rutting potential of asphalt binders. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, Issue 4, 287–296, Taylor & Francis. DOI: 10.1080/10298436.2014.942859.

Schapery, R. A. 1984. Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. International Journal of Fracture, Vol. 25, Issue 3, 195–223. DOI: 10.1007/BF01140837.

Schrader, J. 2016. Einfluss der Bitumenqualität auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt. Masterarbeit, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Schrader, J. 2017. Von der Bitumen- zur Asphaltperformance. Vortrag, Vortragsveranstaltung Straßenbau Aktuell, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, 16. Januar 2017, Braunschweig.

Shen, S., Chiu, H.-M. & Huang, H. 2010. Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, Issue 9, 846–852, American Society of Civil Engineers (ASCE). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000080.

Shevlyakov, G. L. & Oja, H. 2016. Robust correlation, Theory and applications. Wiley, West Sussex.

Soenen, H., de La Roche, C. & Redelius, P. 2004. Predict Mix Fatigue Tests from Binder Fatigue Properties, measured with a DSR. Proc., 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, EAPA & Eurobitume, 12-14 May 2004, Vienna.

Soenen, H. & Eckmann, B. 2000. Fatigue Testing of Bituminous Binders with a Dynamic Shear Rheometer. Proc., 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, EAPA & Eurobitume, 20-22 September 2000, Barcelona.

Weißflog, M. C. 2019. Bildtechnische Analyse der Asphaltstruktur und Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften. Bachelorarbeit, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Williams, M. L., Landel, R. F. & Ferry, J. D. 1955. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. Journal of the Americam Chemical Society, Vol. 77, Issue 14, 3701–3707, American Chemical Society.

Wistuba, M. P. 2019. Straßenbaustoff Asphalt. Erste Auflage, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Braunschweig.

Wistuba, M. P., Büchner, J. & Hilmer, T. 2019. On the way to a new asphalt performance system. Proc., 17th Colloquium on Asphalt Bitumen and Pavements, Slovenian Asphalt Pavement Association, November 28-29, 2019, Bled, Slovenia.

Wistuba, M. P. & Schrader, J. 2019. Abschätzung der Performance von Asphalt anhand von Bitumenprüfungen. Straße und Autobahn, Jahrgang 70, Heft 6, 479–489, Kirschbaum Verlag, Bonn.

Wooldridge, J. M. 2016. Introductory Econometrics, A Modern Approach. 6th edition, Cengage Learning, Boston, MA.

Zeng, M., Bahia, H. U., Zhai, H., Anderson, M. R. & Turner, P. 2001. Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, 403–441, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT).