

DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

Gebrauchsverhalten von Asphaltmischgut mit Gummimodifiziertem Bindemittel

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Andreas Wellan, BSc

Matr.Nr.: 00968634

unter der Anleitung von

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

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Wien, im Juni 2020

Danksagung

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

Dank gilt auch meinen Studienkollegen, die mich während der Zeit meines Studiums begleitet und unterstützt haben.

Aufrichtiger Dank gilt meinem Chef, Martin Buchleitner, in dessen Firma ich viel Erfahrung bei Bauprojekten im Hochbau sammeln konnte. Er ermöglichte mir in 8 Jahren neben meinem Studium an der TU Wien, eine flexible Arbeitszeiteinteilung und unterstützte mich in dieser Zeit großzügig.

Mein größter Dank gilt meiner Mutter, Gabriele Wellan, die mir das Studium an der Technischen Universität ermöglicht und mich zu jeder Zeit, vor allem in schwierigen Phasen, unterstützt hat. Du hast mir immer viel Verständnis und Geduld entgegengebracht.

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird der Einfluss der Gummimodifizierung auf das Bindemittel Bitumen und den damit hergestellten Asphalt anhand von diversen Bindemittel- und Asphaltprüfungen untersucht und das Gummimodifizierte Bitumen mit einem Polymermodifizierten Bitumen verglichen.

Im ersten Teil der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen und Regelwerke der Gummimodifizierung in Bindemitteln genauer erläutert, um ein Basiswissen davon zu erlangen. Mit Hilfe der Literaturrecherche wird ein Überblick über Bitumen und die Gesteinskörnung gegeben und in weiterer Folge auf die Funktionsweise und den Aufbau von Asphalt eingegangen.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Gummimodifizierung des Bitumens und Asphalts. Als Ausgangsbitumen wird Straßenbaubitumen mit Hilfe von Gummimodifiziertem Bitumengranulat modifiziert und konventionellen und gebrauchsverhaltensorientierten Bindemittelprüfungen unterzogen. Daraus können Rückschlüsse auf den Einfluss der Gummimodifizierung auf das Straßenbaubitumen gezogen werden. Parallel dazu wird ein Polymermodifiziertes Bitumen geprüft, um die beiden modifizierten Bindemittel miteinander zu vergleichen. Im Anschluss werden die modifizierten Bitumen herangezogen, um Asphaltmischgut herzustellen und zu prüfen. Es werden das Tieftemperaturverhalten, das Hochtemperaturverhalten und das Steifigkeitsverhalten der einzelnen Mischgüter ermittelt, diese miteinander verglichen und analysiert.

Nach der Analyse der einzelnen Ergebnisse hat sich gezeigt, dass die Gummimodifizierung die Materialeigenschaften des Ausgangsbitumens deutlich verändert und das Polymermodifizierte Bitumen bessere Gebrauchseigenschaften als das Gummimodifizierte Bitumen aufweist. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Asphaltmischgüter mit Polymermodifiziertem Bindemittel günstigere Gebrauchseigenschaften im Tief- und Hochtemperaturbereich zeigen, jedoch die Mischgüter mit Gummimodifiziertem Bindemittel ein besseres Steifigkeitsverhalten im Mitteltemperaturbereich aufweisen.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sollen eine Hilfestellung für weitere Untersuchungen zum Thema Gummimodifiziertem Bitumen geben und zu einer Weiterentwicklung zur Verwendung in Österreich dienen.

Abstract

The aim of this Master's thesis is to study the effects of crumb-rubber modification of bitumen and asphalt mixtures through various tests and by comparing crumb-rubber modified bitumen with polymer modified bitumen.

The first section of the thesis is the theoretical part. It provides state-of-the-art knowledge of crumb-rubber modification in binders. With the help of literature research, firstly an overview of bitumen and aggregates is given and secondly asphalt mixtures along with its manufacture and functionality is discussed.

The second part of the thesis deals with the crumb-rubber modification of bitumen and asphalt mixtures. Straight-run bitumen was modified by adding crumb-rubber modified bitumen granulate and subjected to empirical and conventional binder tests. Conclusions were drawn of the effect of the crumb-rubber modification on the straight-run bitumen. In addition, a polymer-modified bitumen was tested. Then the two modified bitumens were compared and used to produce asphalt mixtures. These asphalt mixtures were compared and analysed for their low temperature, high temperature and stiffness properties.

The analysis of the various tests showed the following results: firstly, the crumb-rubber modification changed the material properties of the straight-run bitumen considerably. Secondly, the properties of the polymer-modified bitumen in use were superior to those of the crumb-rubber-modified bitumen. Moreover, the asphalt mixtures containing polymer-modified binders were better at lower and higher temperatures, whereas at medium temperatures the stiffness of mixtures with crumb-rubber modified binders exceeded that of other mixtures.

The findings from this thesis are intended to support further research work in the field of crumb-rubber modified bitumen and to develop its usage in Austria.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Überblick.....	7
1.2	Frühere Forschungsarbeiten.....	7
1.3	Zielsetzung.....	8
2	Stand der Technik	9
2.1	Bitumen.....	9
2.1.1	Definition.....	9
2.1.2	Herkunft.....	10
2.1.3	Chemische Zusammensetzung.....	10
2.1.4	Eigenschaften.....	11
2.1.5	Alterung.....	12
2.1.6	Polymermodifiziertes Bitumen (PmB).....	13
2.1.7	Bitumenprüfungen.....	13
2.2	Gummimodifizierung.....	14
2.2.1	Herstellung Gummigranulat.....	15
2.2.2	Reaktionsablauf Gummi mit Bitumen.....	16
2.2.3	Modifizierungsverfahren.....	16
2.2.4	Regelwerke.....	17
2.3	Gesteinskörnung.....	19
2.4	Asphalt.....	19
2.4.1	Einteilung nach der Funktion.....	20
2.4.2	Einteilung nach der Einbautemperatur.....	21
2.4.3	Arten und Eigenschaften.....	21
3	Materialien und Methoden	23
3.1	Ausgangsstoffe.....	23
3.1.1	Bitumensorten.....	23
3.1.2	Fasern und Recyclingprodukte.....	23
3.1.3	Gestein.....	23
3.1.4	Füller.....	23
3.2	Herstellung des Gummimodifizierten Bitumens.....	23
3.3	Bitumenprüfungen.....	24

3.3.1	Empirische Prüfverfahren	24
3.3.2	Gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfungen (GVO)	26
3.3.3	Bitumenalterung	30
3.4	Asphaltkonzept.....	31
3.5	Probekörperherstellung	32
3.6	Asphaltprüfungen	33
3.6.1	Strukturelle GVO Prüfverfahren	33
4	Auswertung und Interpretation der Prüfungsergebnisse.....	36
4.1	Ergebnisse der Bitumenprüfungen	36
4.1.1	Nadelpenetration	36
4.1.2	Erweichungspunkt Ring und Kugel	36
4.1.3	Elastische Rückstellung	37
4.1.4	Dynamisches Scherrheometer (DSR)	39
4.1.5	Biegebalkenrheometer (BBR).....	42
4.1.6	Rotationsviskosimeter (RV).....	44
4.1.7	Klassifizierung nach SUPERPAVE.....	45
4.2	Ergebnisse der Asphaltprüfungen	46
4.2.1	Abkühlprüfung (TSRST)	46
4.2.2	Zyklisch triaxiale Druckschwellprüfung (TCCT).....	47
4.2.3	Steifigkeitsverhalten - 4-Punkt-Biegebalken (4-PBB).....	49
4.2.4	Klassifizierung nach ÖNORM.....	50
4.3	Vergleich des RmB- und 50/70-Bitumens	51
4.4	Vergleich des RmB- und PmB-Bitumens	51
4.5	Vergleich der RmB- und PmB-Asphaltmischgüter.....	51
5	Zusammenfassung.....	53
6	Abbildungsverzeichnis	54
7	Tabellenverzeichnis.....	55
8	Literaturverzeichnis.....	56
9	Anhang	58

1 Einleitung

1.1 Überblick

Durch das steigende Güter- und Personenverkehrsaufkommen auf Österreichs Straßen in den letzten Jahrzehnten nimmt auch die Belastung auf die Straßenbeläge stetig zu. Der Asphalt auf den Fahrbahnen hat die Aufgabe die durch den Verkehr bedingten Radlasten in die darunterliegenden Schichten der Straße abzuleiten. Da der gewissenhafte Umgang mit vorhandenen Ressourcen und der Umweltschutz auch ein sehr großes Thema in der Gesellschaft geworden ist und die finanziellen Mittel für Sanierungen und Neubauten oft begrenzt sind, werden ständig Alternativen und Innovationen gesucht, um vorhandene Asphaltmischkonzepte zu verbessern und langlebiger zu gestalten. (1)

Um den Asphalt für verschiedene Anwendungsbereiche und Belastungen beständig zu machen, werden dem Bindemittel Bitumen bestimmte Additive und Zusätze beigefügt. So werden dem Bitumen beispielsweise Polymere beigemischt, damit die Gebrauchseigenschaften des fertigen Asphalts verbessert werden. Diese Polymere, wie beispielsweise das häufig eingesetzte Styrol-Butadien-Styrol (SBS), haben aufgrund der hohen Nachfrage in verschiedensten Bereichen der Industrie einen Kostenanstieg erfahren. Daher begann man in der Forschung schon vor einigen Jahrzehnten alternative Modifizierungen zu testen, welche nachhaltig und kostengünstig sind. Gummimodifiziertes Bitumen stellt eine ressourcenschonende und preisgünstige Alternative dar, da der verwendete Gummi aus alten Pkw- und Lkw-Reifen gewonnen wird. Ergebnisse in der Forschung zeigen, dass Gummimodifizierte Bitumen sehr hohe elastische Eigenschaften und eine hohe Verformungsbeständigkeit aufweisen und daher vergleichbar mit dem SBS-Polymermodifizierten Bitumen sind. (2) (3) (4)

In den USA hat Charles McDonald, ein Werkstoffingenieur in der Stadt Phoenix im Bundesstaat Arizona, bereits in den frühen 1960er Jahren damit begonnen, das Bitumen mit rezyklierten Autoreifen zu modifizieren und im Asphalt zu verarbeiten. Anfangs wurde der Gummimodifizierte Asphalt nur für Oberflächenbehandlungen bei Rissen in den Asphaltdeckschichten eingesetzt. In weiterer Folge wurde der Asphalt auch in Deckschichten und Binderschichten eingebaut. Im Jahr 1991 wurde mit dem sogenannten Interaction Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA), ein bundesstaatliches Gesetz in den USA, eingeführt, welches ab dem Jahr 1994 dazu verpflichtete, eine Mindestmenge von rezykliertem Altreifengummi in den Asphaltbelag bestimmter Straßen einzubauen. Dieses Gesetz wurde im Jahr 1995 wieder aufgehoben, doch viele Bundesstaaten der USA setzen bis heute weiterhin Gummimodifizierten Asphalt auf ihren Straßen ein, insbesondere Arizona, Kalifornien und Texas. (2) (3)

In Deutschland wird seit den 1950er Jahren an Bindemitteln mit Gummimodifiziertem Bitumen geforscht und seit einigen Jahren auf ausgewählten Streckenabschnitten und auf Teststrecken mit Gummimodifiziertem Asphalt eingesetzt. In Österreich hingegen gibt es vergleichsweise erst sehr wenige Forschungsarbeiten zu Gummimodifiziertem Bitumen. (3) (5)

1.2 Frühere Forschungsarbeiten

In früheren Forschungsarbeiten kam man zu dem Ergebnis, dass sowohl Gummimodifizierte, als auch SBS-Polymermodifizierte Bitumen deutlich bessere Gebrauchseigenschaften als herkömmliche Bitumen vorweisen, jedoch Unterschiede in der Leistung durch die Höhe des dem Bitumen beigemischten Gummiantteils der Gummimodifizierten Bitumen entstehen. Die eingesetzte Menge an Altreifen-Gummi im Bitumen muss höher sein als die der SBS-Polymere, damit die Eigenschaften vergleichbar sind. (4) (5)

1.3 Zielsetzung

Die wesentliche Aufgabe dieser Diplomarbeit ist es, unter der Anwendung von nationalen und internationalen Richtlinien und Empfehlungen, herauszufinden welchen Einfluss die Gummimodifizierung auf das Bitumen nimmt und wie sich das Gummimodifizierte Bitumen im Vergleich zu Polymermodifizierten Bitumen verhält. Dadurch sollen Rückschlüsse gezogen werden, ob der Einsatz von Gummimodifiziertem Bitumen, langfristig als Alternative zu Polymermodifizierten Bitumen in Österreich vorstellbar ist und wo die Vor- und Nachteile dieser Modifizierungsart liegen.

Im ersten Teil der Diplomarbeit werden die für die Gummimodifizierung notwendigen Grundlagen erläutert und beschrieben und es wird auf die aktuellen Regelwerke im deutschsprachigen Raum eingegangen. In weiterer Folge wird das Prüfprogramm beschrieben. Für die Gummimodifizierung wird ein Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 mit einem Gummimodifizierten Bitumengranulat zu einem RmB 20/60-55 modifiziert. Als Vergleich dazu wird ein PmB 25/55-65 verwendet. Zuerst werden die beiden Bindemittel mit Hilfe von konventionellen und gebrauchsverhaltensorientierten Bindemittelprüfungen geprüft und analysiert, im Anschluss daran werden die beiden Bindemittel herangezogen, um damit Asphaltmischgut herzustellen und mit Hilfe von gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfungen getestet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es mit Hilfe von diversen Bindemittelprüfverfahren und drei unterschiedlichen Asphaltprüfverfahren Erkenntnisse bezüglich der Gummimodifizierung zu erlangen, die Auswirkungen auf den Asphalt im Einbauzustand zu analysieren und mit dem Polymermodifizierten Bitumen zu vergleichen. Darauf aufbauend sollen Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen zur Gummimodifizierung abgegeben werden.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen dieser Arbeit. Die verschiedenen Bestandteile für die Zusammensetzung des fertigen Asphalts werden erläutert und näher beschrieben, insbesondere die Gummimodifizierung des Bitumens. Im Anschluss wird auf den Asphalt und seine verschiedenen Arten eingegangen.

2.1 Bitumen

2.1.1 Definition

Bitumen ist ein aus Erdöl gewonnenes klebriges, dunkelfarbiges und schwerflüchtiges Gemisch, welches aus verschiedenen organischen Substanzen besteht. Das viskoelastische Verhalten ändert sich mit der Temperatur. Bei Umgebungstemperatur ist Bitumen nahezu fest und hochviskos. Dadurch, dass es schwerflüchtig ist, ist es praktisch geruchlos und äußerst beständig gegen die Einwirkung vieler Chemikalien und auch Wasser. Deswegen wird es im Hoch- und Tiefbau auch als Abdichtungsmaterial eingesetzt. (6) (7)

In Tabelle 1 sind die folgenden, ausgewählten Begriffe nach ÖNORM EN 12597 definiert.

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen nach ÖNORM EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel (8)

Begriff	Definition
Bindemittel	Material, das zum Kleben an Körnungen dient und die Kohäsion des Mischgutes sicherstellt
Bitumen	Nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich ist, bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos und nahezu fest
Straßenbaubitumen	Bitumen zur Ummantelung von Körnungen und/oder Recyclingasphalt, das hauptsächlich zur Herstellung von Asphalt und für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen und im Wasserbau verwendet wird
Modifiziertes Bitumen	Bitumenhaltiges Bindemittel, dessen rheologische Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung eines oder mehrerer chemischer Zusätze modifiziert worden ist
Polymermodifiziertes Bitumen	Mit einem oder mehreren organischen Polymeren modifiziertes Bitumen

Straßenbaubitumen sind jene Bitumensorten, die für den Bau und zur Erhaltung von Straßen eingesetzt werden und sind durch die Nadelpenetration bei 25°C definiert. In Kapitel 3.3.1 ist die Nadelpenetration und die darauffolgende Bezeichnung der Straßenbaubitumen beschrieben. (7)

Auf die modifizierten und polymermodifizierten Bitumen wird später in den Kapiteln 2.1.6 und 2.2 näher eingegangen.

2.1.2 Herkunft

Bitumen wird mit Hilfe von Destillation aus dem Erdöl (Rohöl) gewonnen (siehe Abbildung 1). Im ersten Schritt werden durch die fraktionierte Destillation dafür die niedrigsiedenden Bestandteile wie Benzin, Diesel, Heizöl, Erdgas und Kerosin gewonnen. Die anschließende Vakuumdestillation entzieht dem Erdölrückstand weitere Produkte wie Schmieröl und Gas. Der am Ende verbliebene Anteil, als Destillationsrückstand, ist das (Destillations)bitumen, welches wirtschaftlich nicht weiter aufbereitet werden kann. (6) (7)

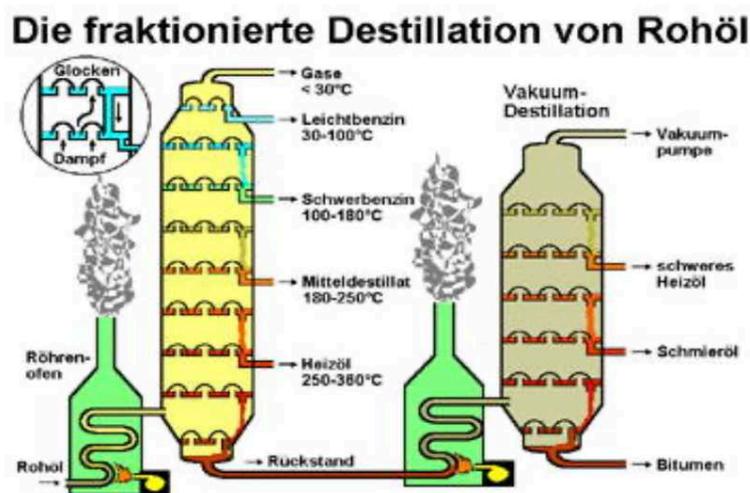


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Destillation von Rohöl (6)

In der Natur kommt Bitumen auch als sogenanntes „Naturbitumen“ im Naturasphalt vor. Dieser Naturasphalt kommt beispielsweise auf Trinidad vor und hat dort etwa einen 55 M-% hohen Bitumengehalt. Gebildet wird er durch Druck von zwei aneinanderstoßenden Lithosphärenplatten auf lagerndes Erdölvorkommen. (9)

2.1.3 Chemische Zusammensetzung

Bitumen ist ein Gemisch aus einer großen Anzahl von verschiedenen hochmolekularen Kohlenwasserstoffen und Kohlenwasserstoffderivaten, darüber hinaus ein wenig Schwefel, Sauerstoff und Stickstoff (siehe Tabelle 2). Aufgrund der geographischen Herkunft des Rohöls gibt es verschiedene Zusammensetzungen nach Art und Menge der Substanzen, wobei sie durch die große Anzahl der aufbauenden Stoffe annähernd gleiche Gebrauchseigenschaften aufweisen. Darüber hinaus ist es schwach sauer, wodurch es bestens an basischem Gestein haftet. (7) (9)

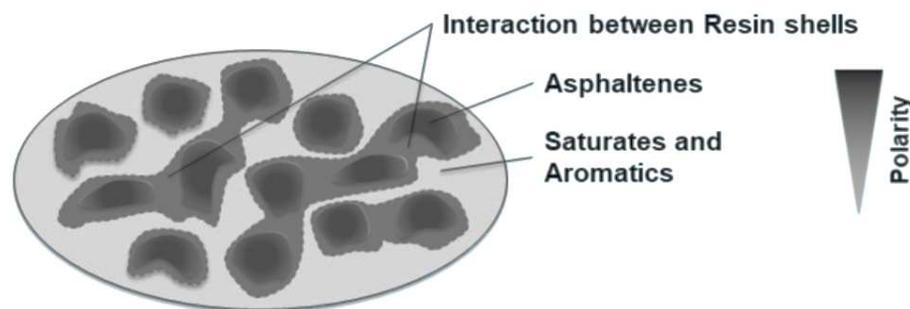
Tabelle 2: Hauptbestandteile von Bitumen (7) (9)

Chemisches Element	Abkürzung des chem. Elements	Masseanteil [%]
Kohlenstoff	C	80 - 88
Wasserstoff	H	7 - 11
Sauerstoff	O	1 - 12
Stickstoff	N	< 1,5
Schwefel	S	0,5 - 7
Sonstiges	-	< 0,1

Die Eigenschaften des Bitumens beruhen auf einem kolloidalen System: eine disperse Phase (Asphaltene umgeben von einem Erdölharzmantel) ist in einer kontinuierlich zusammenhängenden kohärenten Phase (hochsiedende Öle) in einer stabilen Verteilung dispergiert. Das Dispersionsmittel und die Erdölharze werden auch Maltene genannt. Die dispergierten, nahezu kugelförmigen Kolloidteilchen bezeichnet man als Mizellen. Durch den steigenden Asphaltengehalt kommen, im normalerweise niederviskosen Kolloidsystem, deutlich erkennbare elastische Eigenschaften zum Vorschein. Aus dem Sol wird durch den höheren Asphaltengehalt ein Gel. (7) (10)

Um die Zusammensetzung zu bestimmen, gibt es verschiedene Methoden, wie zum Beispiel die Dünnschichtchromatographie und der Flammenionisationsdetektor oder die Säulenchromatographie. Das Bitumen wird so nach der Polarität der Anteile aufgetrennt, den sogenannten SARA-Fraktionen. (7) (9)

- Gesättigte (Saturates)
- Aromaten (Aromatics)
- Harze (Resins)
- Asphaltene (Asphaltenes)

**Abbildung 2:** Mikrostruktur – vereinfachtes Strukturmodell von Bitumen (9)

Anhand der Abbildung 2 erkennt man, dass die Polarität der Anteile abnimmt, je weiter sie vom „Asphaltenzentrum“ entfernt sind. (9)

2.1.4 Eigenschaften

Eine der wichtigsten Eigenschaften von Bitumen ist die Konsistenz. Sie ist stark temperaturabhängig und bestimmt die Randbedingungen bei der Verarbeitung und das Verhalten des Asphalts nach dem Einbau, bei

den vorherrschenden Umgebungsbedingungen. Durch Erwärmen wird Bitumen langsam weicher, im hohen Temperaturbereich, zwischen 150 – 200°C, flüssigkeitsähnlich. Hingegen dazu erscheint Bitumen im tiefen Temperaturbereich äußerlich spröde und hart. Diese Erscheinung ist reversibel. Bitumen bekommt dadurch den Charakter eines thermoplastischen Werkstoffes. (7) (10)

Die Grundlage zur Verarbeitung von Bitumen ist das thermoviskose Verhalten. Für jeden Arbeitsvorgang hat Bitumen einen bestimmten Viskositätsbereich, der von der Bitumensorte abhängt. Härtere Bitumen müssen heißer verarbeitet werden als weiche. Die für die Belastbarkeit erforderliche Konsistenz wird nach dem Abkühlen auf Umgebungstemperatur erreicht. (7) (10)

Bei Bitumen handelt es sich um einen viskoelastischen Werkstoff. Die Steifigkeit eines Bitumens hängt von seiner Viskosität (=Maß für die Zähigkeit eines Stoffes) ab, wird durch die Bitumensorte ausgedrückt und ist temperaturabhängig. Der Verformungswiderstand von Bitumen ändert sich darüber hinaus auch abhängig von der Zeitdauer einer Belastung. Bei spontaner Belastung folgt das Bitumen durch sowohl elastische als auch viskose Verformungsanteile. Bei kürzerer Belastungsdauer überwiegt der elastische Anteil und die von der äußeren Belastung bewirkte Verformung bewegt sich nach Entlastung vollständig zurück. Bei größerer Belastungsdauer steigt der viskose Anteil, welcher zeitabhängig und irreversibel ist. (7) (9)

Aufgrund seines viskoelastischen Verhaltens, hat Bitumen die Eigenschaft sich einer aufgezwungenen Beanspruchung durch viskose Verformungen zu entziehen. Dieses Vermögen wird Relaxation genannt. Der Spannungsabbau erfolgt zeitabhängig und die Geschwindigkeit des Spannungsabbaus hängt von der Viskosität des Bitumens ab. Durch die Relaxation ist es möglich, dass der Asphalt bei starker Abkühlung in Verbindung mit verhinderter thermischer Verkürzung nicht reißt. Die dabei entstehenden Zugspannungen können durch das Relaxationsvermögen des Bitumens abgebaut werden, solange sie nicht zu groß werden. Dies ermöglicht eine fugenlose Herstellung von Asphaltstraßen. (7)

2.1.5 Alterung

Während der Lebensdauer von Asphaltsschichten kommt es zu äußeren Einwirkungen auf das Bitumen, wodurch sich das viskoelastische Materialverhalten ändert. Bei gleichzeitigem Einwirken von Sauerstoff, kurzwelliger UV-Strahlung, Wärme und zusätzlicher mechanogener Belastungen kommt es im Bitumen zu destillativen und oxidativen Veränderungen seiner stofflichen Zusammensetzung und bewirkt einen Alterungsprozess. Durch diese Alterung treten eine Verhärtung und Versprödung ein. Dadurch wird die Relaxationsfähigkeit des Materials reduziert. (7) (9)

Man unterscheidet die folgenden Alterungsstufen:

- Ungealtert
- Kurzzeitalterung
- Langzeitalterung

Ungealtertes Bitumen nennt man auch Frischbitumen, dieses ist das aus der Raffinerie unverwendete, gebrauchsfertige Bitumen. (7) (10)

Bei der Kurzzeitalterung, nach Heißlagerung, dem Pumpvorgang, dem Mischvorgang mit dem Asphalt, dem Transport und Asphalteinbau, kommt es zur Verdunstung verbliebener niedrigsiedender Komponenten und zu einer schnellen Oxidation bei hohen Temperaturen. (7) (9) (10)

Die Langzeitalterung kombiniert die Kurzzeitalterung mit einer langjährigen Liegezeit (5 – 10 Jahre) auf der Straße. Dabei führt eine langsame Oxidation zu Änderungen in der kolloidalen Struktur. (7) (9) (10)

In Abbildung 3 ist der schematische Verlauf der Bitumenalterung dargestellt. In der Realität ist der Alterungsverlauf von den jeweiligen Umgebungseinflüssen und der eingesetzten Bitumensorte abhängig. (9)

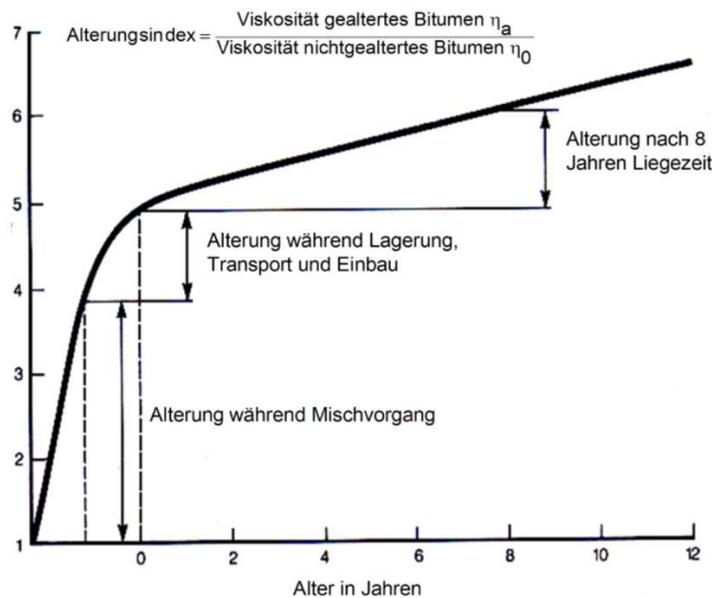


Abbildung 3: Darstellung des schematischen Verlaufs der Bitumenalterung (9)

Im Labor wird die Feldalterung des Bitumens durch den Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) und das Pressure Ageing Vessel (PAV) simuliert. In Kapitel 3.3.3 wird die Bitumenalterung im Labor näher beschrieben. (9)

2.1.6 Polymermodifiziertes Bitumen (PmB)

Bei polymermodifizierten Bitumen handelt es sich um Bitumen, deren rheologische Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung eines oder mehrerer organischer Polymere modifiziert wurden. (9)

Als Modifikationsmittel werden vorzugsweise thermoelastische Kunststoffe, wie zum Beispiel Styrol-Butadien-Styrol (SBS) verwendet. Durch diese Zusätze wird vor allem das Temperatur-Viskositäts-Verhalten beeinflusst. Die Einmischung erfolgt durch einen konventionellen Mischer oder Hochschermischer. (9)

Die Vorteile von polymermodifizierten Bitumen gegenüber herkömmlichen Bitumen bestehen darin, dass der Erweichungspunkt höher wird und sich die Konsistenz hin zu einem härteren Bitumen verschiebt. Die Plastizitätsspanne vergrößert sich, wodurch sowohl das Tieftemperaturverhalten verbessert als auch die Temperaturempfindlichkeit deutlich geringer wird. Die weiteren Vorteile sind eine günstigere Langzeitalterung und eine verbesserte Verformungsbeständigkeit im Gegensatz zu herkömmlichen Straßenbaubitumen. (7) (9)

2.1.7 Bitumenprüfungen

Die Anforderungen an Straßenbaubitumen sind in Österreich in der EN 12591 und der ÖNORM B 3610 (nationale Umsetzung der EN 12591) und für Polymermodifiziertes Bitumen in der EN 14023 und der ÖNORM B 3613 (nationale Umsetzung der EN 14023) geregelt. Man unterscheidet nach konventionellen und gebrauchungsverhaltenorientierten Prüfmethode. (9)

Konventionelle Prüfmethode

Die konventionellen Prüfmethode werden auch empirische Prüfmethode genannt, und sind einfach durchzuführende und kostengünstige Prüfungen, um ein Bitumen zu beschreiben. Sie treffen keine Aussage über die tatsächlichen Materialparameter, wie zum Beispiel den Phasenwinkel, die Viskosität oder die Steifigkeit. Die Beanspruchungen in der Realität, wie etwa die Klimabedingungen oder die Art der Belastung, können mit diesen Methoden nicht getestet werden. (9) (11)

Zu den konventionellen Prüfmethode gehören:

- Penetration
- Erweichungspunkt Ring und Kugel
- Brechpunkt nach Fraaß
- Bestimmung der Duktilität
- Bestimmung der elastischen Rückstellung

Für diese Diplomarbeit wurden in weiterer Folge die Penetration, der Erweichungspunkt Ring und Kugel und die Bestimmung der elastischen Rückstellung durchgeführt. Diese Prüfmethode werden im Kapitel 3.3.1 näher beschrieben.

Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode (GVO)

Das Ziel der gebrauchsvorhaltensorientierten Prüfmethode ist das Bitumen bei den für die Praxis relevanten Temperaturen und Belastungen zu prüfen und die leistungsorientierten physikalischen Kenngrößen des Bitumens, über seine Gebrauchseigenschaften als Bindemittel im Asphalt, zu definieren. (6) (9) (11)

Diese Bitumenprüfungen wurden im Zuge des SHRP-Programms (Strategic Highway Research Program) unter dem Namen SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) in Amerika entwickelt. Das Ziel war es das Gebrauchsverhalten von Asphalt, durch Kenntnis über die chemische Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften von Bitumen und Asphalt, zu verbessern. Charakterisiert wird das Bitumen bei SUPERPAVE durch den Performance Grade (PG), der sich aus dem High Performance Grade (obere Prüftemperatur) und dem Low Performance Grade (untere Prüftemperatur) zusammensetzt. (6) (9) (11)

Zu den gebrauchsvorhaltensorientierten Prüfmethode nach SUPERPAVE zählen:

- Rotationsviskosimeter
- Dynamisches Scherrheometer
- Biegebalkenrheometer
- Direct Tension Test

Für diese Diplomarbeit sind der Rotationsviskosimeter, das Dynamische Scherrheometer und der Biegebalkenrheometer herangezogen worden. Die Prüfmethode werden im Kapitel 3.3.2 näher beschrieben.

2.2 Gummimodifizierung

Gummimodifiziertes Bitumen besteht aus einer Modifizierung, aus einem geeigneten Gummigranulat und Gummimehl, und einem Normbitumen gemäß EN 12591. Durch die Gummimodifizierung soll, ähnlich dem Polymermodifizierten Bitumen, eine erhöhte Elastizität, eine bessere Wärmestandfestigkeit, ein besseres Kälteverhalten, eine bessere Haftung am Gestein (Adhäsion), eine bessere Kohäsion, eine erhöhte

Alterungsresistenz und ein verbessertes Ermüdungsverhalten erreicht werden. Weitere Zielsetzungen bei der Verwendung von Gummimodifiziertem Bitumen sind dauerhaft griffige Asphaltsschichten und lärm-mindernde Asphalte. Aufgrund der besonders guten Alterungseigenschaften durch das gummimodifizierte Bitumen erhofft man sich auf Dauer langlebige Asphalte und dahingehend erheblich wirtschaftliche Vorteile. (5) (12)

2.2.1 Herstellung Gummigranulat

Bei der Herstellung des Gummigranulats tritt der Recyclinggedanke in den Vordergrund. Das Gummigranulat und -mehl wird meist aus Altreifen gewonnen. Die Zusammensetzung der Reifen variiert meist nach dem Reifentyp (Pkw-, Lkw-, Sommer- oder Winterreifen) und dem Hersteller. Die hauptsächlichen Bestandteile der Reifen sind Synthetikgummi, Naturgummi, Stahldrähte und Textilfasern. Bei den Reifen gibt es leichte Abweichungen im Prozentsatz des eingesetzten Natur- und Synthetikgummis, jedoch wird nicht angenommen, dass dadurch Unterschiede bei den Eigenschaften des Gummimodifizierten Bitumens entstehen. (2) (5)

Für das Recycling des Reifens ist es notwendig, den Gummi von den Textilfasern und den Stahldrähten zu trennen, um das Gummigranulat und -mehl zu erhalten. Der Unterschied zwischen dem Granulat und dem Mehl liegt in der Partikelgröße (Korngröße). Alle Partikel, die einen Durchmesser von mehr als 1 mm haben bezeichnet man als Granulat, jene bei denen der Durchmesser kleiner als 1 mm ist, als Mehl. Für die Gummizerkleinerung und die Aufbereitung auf die gewünschte Korngröße stehen zwei Verfahren zur Verfügung: die Warmvermahlung und die Kaltvermahlung. (5) (13)

Warmmahlverfahren (ambiante Vermahlung)

Die Reifen werden bei Umgebungstemperatur mit Schneidmessern in Stücke zerkleinert. Ein Magnetabscheider trennt die eisenhaltigen Teile ab, das Überkorn wird abgesiebt und durch weitere Granulatoren zerkleinert und zerrissen. Es entstehen Partikel, welche durch ein 75 µm Sieb durchgehen bis hin zum Gummigranulat von 1 – 6 mm Größe. Im letzten Schritt entfernt ein Windsichter die Textilreste und das Gummigranulat und -mehl steht für seinen weiteren Einsatz zur Verfügung. (2) (13) (14)

Kaltmahlverfahren (kryogene Vermahlung)

Bei der kryogenen Vermahlung werden die Reifen anfangs, wie beim Warmmahlverfahren, in Stücke von einer Größe von etwa 50 mm zerschnitten. Danach werden die Reifenstücke mit flüssigem Stickstoff auf bis zu minus 100°C abgekühlt, wodurch die elastischen Reifenteile verspröden. In weiterer Folge werden die Reifenstücke mit Spezialmühlen zerkleinert, wodurch Gummimehl und -granulat in etwa den gleichen Größen wie beim Warmmahlverfahren entsteht. Die Stahl- und Textilreste können danach abgeschieden werden. (2) (13)

Der stofflich relevante Hauptunterschied der beiden Verfahren liegt in der Oberflächenstruktur der Gummipartikel. Durch das Zerkleinern im Warmmahlverfahren wird die Oberfläche der Partikel deutlich rauer und die Oberfläche wird vergrößert. Beim Kaltmahlverfahren hingegen haben die Gummipartikel eine kubische Form mit einer glatten Oberfläche. Neben der Mischtemperatur ist auch die Oberfläche der Gummipartikel entscheidend für die Reaktionsgeschwindigkeit mit dem Bitumen. Daher muss man für die weitere Steuerung des Reaktionsprozesses des Gummis mit dem Bitumen das Gummimehl/-granulat sorgfältig auswählen. (2)

Im Gummimehl können nach den jeweiligen Mahlprozessen Ruß, Zink, Silica und Schwefel enthalten sein. (15)

2.2.2 Reaktionsablauf Gummi mit Bitumen

Den Reaktionsablauf bei der Vermischung von heißem Bitumen mit dem Gummimehl nennt man Bitumen-Gummi-Interaktion. Die leichter flüchtigen Maltene lösen sich aus der Bitumenphase und reagieren mit dem Elastomeranteil der Gummipartikel. Das führt zu einem Aufquellen der Gummipartikel bis zu der doppelten Ausgangsgröße. In weiterer Folge kommt es in einem Quellvorgang zu einer Gelbildung aus Asphaltene, Maltene und Elastomeren, wobei kleine Teile des Gummis als reine Gummipartikel, in seiner ursprünglichen Form, in der gummi-modifizierten Bitumenmatrix übrigbleiben. Diese reinen Gummipartikel dienen als innere Bewehrung der Bitumenmatrix und sind für den Anstieg der Viskosität des Gummibitumens verantwortlich. Wird die Reaktionszeit zu lange gehalten, kommt es allerdings zu einer Depolymerisation, der Gummi wird zerstört, und die Viskosität des Gummibitumens sinkt wieder. (5) (12) (16)

Anhand der Abbildung 4 wird der oben beschriebene Reaktionsablauf vereinfacht dargestellt.

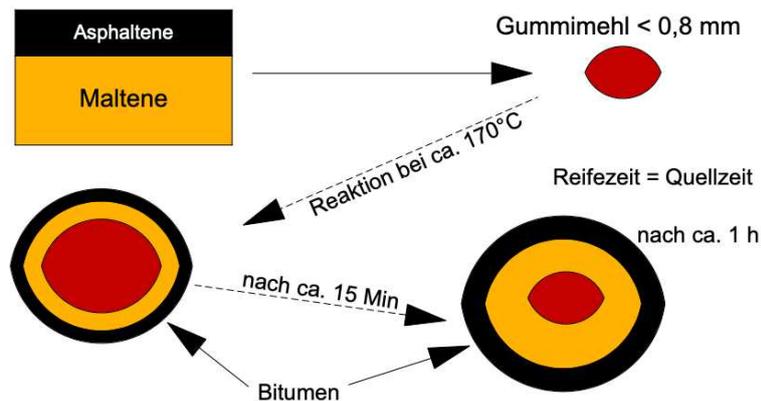


Abbildung 4: Vereinfachter Reaktionsablauf der Gummimodifikation (16)

Um den beschriebenen Reifeprozess zu verbessern, können dem Gummimehl Additive, wie zum Beispiel Öle, beigemischt werden. Öle erleichtern das Anlösen und Quellen des Gummimehls. (15)

2.2.3 Modifizierungsverfahren

Bei Herstellung von Gummimodifizierten Asphalten wird nach dem Nass- und dem Trockenverfahren unterschieden.

Nassverfahren (WET) – Modifizierung des Bitumens

Das Nassverfahren besitzt die längste Tradition zur Herstellung von Gummimodifiziertem Asphalt. Das Gummimehl wird dem Bitumen in einem Mischbehälter bei einer Temperatur von etwa 180°C beigemischt und für 45 – 60 Minuten lang gemischt und anschließend für etwa ein bis zwei Stunden in einem Rührwerk tank gelagert, damit der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Quellprozess stattfindet. Die Temperatur und die Zeit hängen von der Bitumensorte und der Menge der beigemischten Gummipartikel ab. Die Menge unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Mahlfeinheit des Gummimehls und vom jeweiligen

Verwendungszweck von etwa 10 – 20 M-%, bezogen auf das Bitumen. Das auf diese Art hergestellte Gummimodifizierte Bitumen sollte zeitnah verarbeitet werden, da es nur bedingt lagerstabil ist. (2) (5) (15)

Das Nassverfahren kann im Werk oder direkt vor Ort am Asphaltmischwerk in speziellen mobilen Aufbereitungsanlagen erfolgen. (2) (15)

Bei der Mischung im Werk wird ein feineres Gummimehl (Partikelgröße bis 0,6 mm) verwendet, damit die Lagerstabilität verbessert und ein Absetzen der Partikel verhindert wird. Für die Lagerzeit im Rührwerk tank ist die Rührwerkgeschwindigkeit und Paddelanordnung so zu wählen, dass keine Entmischung stattfindet. Der Transport zum Asphaltmischwerk erfolgt durch Bitumentankwagen bei einer Temperatur von etwa 180°C. Aufgrund der sehr hohen Viskosität des gebrauchsfertigen Gummimodifizierten Bitumens sind die Pumpen und Rohrleitungen ausreichend zu dimensionieren. (2) (15)

Trockenverfahren (DRY) – Modifizierung des Asphalts

Beim Trockenverfahren findet keine Modifikation des Bitumens statt, da das Gummimehl oder Gummimodifizierte Bitumengranulate, inklusive eventueller Additive, direkt während der Asphaltherstellung, noch vor dem Bitumen, im Mischer beigemischt werden. Somit wird der Asphalt direkt modifiziert. (2) (5) (15)

Gummimodifizierte Bitumengranulate sind im Nassverfahren hergestellte Gummimodifizierte Bitumen, die anschließend granuliert werden, um im Trockenverfahren zur Asphaltherstellung beigemischt zu werden. Die Größe der Partikel von Gummimodifizierten Bitumengranulaten reicht bis zu etwa 20 mm. (14) (15)

Die Mischtemperatur beträgt maximal 170°C. Für das Trockenverfahren wird, typischerweise, durch das Kaltmahlverfahren hergestelltes Gummigranulat bzw. -mehl verwendet. Im Gegensatz zum Nassverfahren kann der Reifeprozess nicht durch den Mischvorgang sichergestellt werden, deswegen wird eine Lagerungszeit von etwa einer Stunde im Mischgutsilo oder Transportfahrzeug angeschlossen. Erst danach darf das Asphaltmischgut eingebaut werden. (2) (5) (15)

Das Trockenverfahren eignet sich besonders zur Herstellung von Kleinmengen, da bei größeren Produktionsmengen ausreichend Logistik für die Zugabe vorzuhalten ist, um die erforderliche Gleichmäßigkeit und Mischleistung zu erhalten. (15)

2.2.4 Regelwerke

In Österreich gibt es keine Regelwerke, die den Umgang mit Gummimodifiziertem Bitumen oder Asphalten bestimmen. In Deutschland hingegen gibt es die „Technischen Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen“ aus dem Jahr 2010 und die „Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten“ aus dem Jahr 2012.

Technische Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen (TL RmB-StB By 10)

Die TL RmB-StB By 10 hat in Deutschland keine bundesweite Gültigkeit, da sie nicht von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) herausgegeben wurde. Es handelt sich um ein Regelwerk, das als technische Mindestbedingung in geeigneten Bauverträgen empfohlen wird und wurde gemeinsam von Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung erarbeitet. (17)

Die Technischen Lieferbedingungen enthalten Anforderungen an

- *Gebrauchsfertige Gummimodifizierte Bitumen und*
- *Gummimodifizierte Bitumengranulate und*
- *Gummimodifizierte Bitumen aus Bitumen und Gummimodifiziertem Bitumengranulat*

zur Herstellung von Verkehrsflächen aus Asphaltmischgut in Heißverarbeitung. Gummimodifizierte Bindemittel können alternativ zu Polymermodifizierten Bindemitteln eingesetzt werden. (14)

Die in Tabelle 3 beschriebenen Begriffe finden in den TL RmB-StB By 10 Anwendung und legen Anforderungen an diese fest.

Tabelle 3: Begriffsbestimmungen nach TL RmB-StB By 10 (14)

Gummimodifizierte Bitumen (Rubber Modified Bitumen, RmB)	Sind mit Gummimehl modifizierte Straßenbaubitumen.
Gebrauchsfertige Gummimodifizierte Bitumen (Rubber Modified Ready for Use, RmB R)	Sind Bindemittel, die an der Asphaltmischanlage ohne weitere Behandlung zur Herstellung von Asphaltmischgut verwendet werden können.
Gummimodifizierte Bitumengranulate (Granulate Rubber Modified, GRM)	Sind mit Gummimehl aufbereitete Bitumen, welche nach der Aufbereitung granuliert werden.
Gummimodifizierte Bitumen mit Gummimodifizierten Bitumengranulaten (Rubber Modified Bitumen with Granulate, RmB G)	Sind mit Gummimodifizierten Bitumengranulaten aufbereitete Bitumen.
Gummimehle	Sind aus geeigneten Gummiprodukten durch Mahlen bei Umgebungstemperatur gewonnene Produkte.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden Gummimodifizierte Bitumengranulate (GRM) zur Gummimodifizierung verwendet. In den Technischen Lieferbedingungen sind zwei Sorten von Gummimodifizierten Bitumengranulaten angegeben: GRM 40/15 und GRM 40/20. Zur Gummimodifizierung kommt das GRM 40/15 für diese Arbeit zum Einsatz.

Die Bezeichnung GRM 40/15 bedeutet, dass das Gummimodifizierte Bitumengranulat einen Gummimehlanteil von 40 M-% besitzt, wobei 15% davon im Bitumen angelöst sind. Der Bitumengehalt entspricht 50 M-%, 10 M-% entfallen auf den Füllergehalt. Die Größe des Bitumengranulats ist bei beiden Sorten von 0 – 20 mm angegeben. (14)

Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten (E GmBA)

Die E GmBA sind von der FGSV als Dokument der Kategorie R 2 im Jahr 2012 veröffentlicht worden. Die Kategorie R 2 bedeutet, dass es sich um ein Regelwerk der 2. Kategorie handelt, welche Merkblätter und Empfehlungen umfasst, welche von der FGSV zur Anwendung als Stand der Technik empfohlen werden. (18)

Der Anwendungsbereich der E GmBA umfasst die Herstellung von Mischgut für Asphaltsschichten sowie bitumenhaltige Zwischenschichten und Abdichtungen aus Bitumenschichten bei einer Modifizierung mit Gummimehl. Weiter behandeln die Empfehlungen die Modifizierung von Bitumen mit Gummimehl im Nassverfahren, und auch die direkte Modifikation des Asphalts im Asphaltmischer im Trockenverfahren. (15)

Die E GmBA beinhalten Anforderungen an die jeweiligen Modifizierungsverfahren: die Lagerung, die Herstellung, den Transport und den Einbau. Für das additivierte Gummimehl und das Gummimodifizierte Bitumen sind ebenfalls eigene Eigenschaften und Richtwerte angegeben. (15)

Die E GmBA sind im Gegensatz zu den Technischen Lieferbedingungen weiterentwickelt, da sie Anforderungen an die Modifizierungsverfahren selbst stellen und umfangreichere Richtwerte für das Gummimodifizierte Bitumen beinhaltet. Die Technischen Lieferbedingungen schreiben für den Einsatz von Gummimodifizierten Bitumengranulaten fertige Produkte (GRM 40/15, GRM 40/20) vor und geben auch die Zusammensetzung auf den einzusetzenden Masse-Prozentsatz im Gummimodifizierten Bitumen an den Anwender vor. Die Empfehlungen hingegen geben nur die Eigenschaften und Richtwerte an, welche das Gummimodifizierte Bitumen als fertiges Endprodukt erreichen soll. (14) (15)

2.3 Gesteinskörnung

Aufgrund der hohen Beanspruchung unter Verkehrslasten sind an die stofflichen Eigenschaften der Gesteinskörnung Anforderungen zu stellen. Diese Anforderungen sind in der ÖNORM EN 13043 geregelt. Sie unterscheiden sich in natürlichen (Kies, Sand, Schotter, Splitt), rezyklierten und industriell hergestellten Gesteinskörnungen. Bei rezyklierten Gesteinskörnungen handelt es sich um solche, welche schon zuvor als Baustoff verwendet wurden. Als industriell hergestellte Gesteinskörnungen werden in Deutschland und Österreich beispielsweise Hochofenschlacken verwendet. (7)

Die Lieferkörnungen werden mit den Korngrößen d und D (Unter- und Überkornanteile) sowie der entsprechenden Qualitätsklasse und den in der ÖNORM 13043 vorgegebenen geometrischen, physikalischen, chemischen und weiteren Anforderungen gehandelt. (7)

2.4 Asphalt

Asphalt ist ein Gemisch, welches aus dem Bindemittel Bitumen, Gesteinskörnungen und Hohlräumen zusammengesetzt ist. Das Mischungsverhältnis und die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile (Bitumen, Gesteinskörnung) ist für die Werkstoffkennwerte des Asphalts verantwortlich. Im Straßenbau bestehen Asphalte in der Regel aus 4-7 M-% Bitumen und 93-96 M-% Gestein. (7) (9)

Die Aufgabe der Gesteinskörnungen ist die Stützfunktion des Asphalts aus den Druckbelastungen durch den Verkehr und das Ableiten der Belastungen in die darunterliegenden Schichten. Daher muss die Gesteinskörnung in ihrer Korngrößenzusammensetzung (mittels Sieblinie) auf die zu erwartenden Belastungen abgestimmt sein. (7) (9)

Das Bitumen verleiht der Asphaltbefestigung die notwendige Zugfestigkeit und dichtet darunterliegende Schichten vor eindringendem Wasser ab. Außerdem verleiht es dem Asphalt das für die Temperatureinwirkungen so wichtige viskoelastische Materialverhalten. Da die Volumenvergrößerung von Bitumen in etwa 20x größer ist als jene des Gesteins, benötigt Bitumen den Hohlraumgehalt um sich ohne Verringerung der Festigkeit ausdehnen zu können. Daher darf der Hohlraumgehalt von 2 M-% im Asphalt nicht unterschritten werden. (7) (9)

Anhand von Abbildung 5 erkennt man, dass Asphalt sich im niedrigeren Temperaturbereich elastisch verhält und mit immer weiter steigender Temperatur nichtlinear elastisch. Im hohen Temperaturbereich ist der Asphalt geprägt von viskosem und nichtlinear elastischem Verhalten. (9)

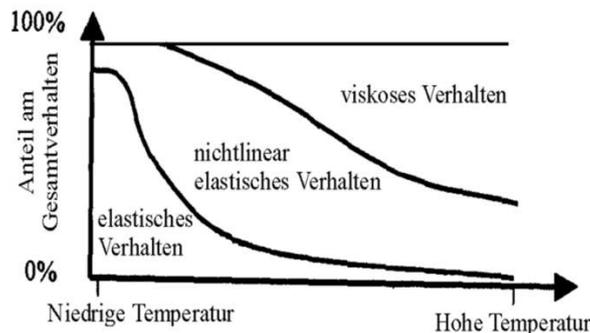


Abbildung 5: Asphalt-Materialverhalten im Allgemeinen (9)

Der Einfluss des Bindemittels im Asphalt ist neben der Temperatur auch von der Belastungsfrequenz abhängig. Daraus folgt, dass sich das Bindemittel im niedrigen Temperaturbereich und/oder bei hohen Frequenzen wie ein nahezu idealer Festkörper verhält, also elastisch und bei hohen Temperaturen und/oder niedrigen Frequenzen wie eine Flüssigkeit, also viskos. Bei hohen Temperaturen und/oder niedrigen Frequenzen tritt jedoch der Einfluss des Bindemittels zurück und das Gesteinskorngerüst wirkt zur Kraftübertragung. (19)

2.4.1 Einteilung nach der Funktion

Asphalt kann anhand seiner Funktion eingeteilt werden. Man unterscheidet nach:

- Tragschicht (trag/base): die Verkehrsbelastung wird verteilt und in den Untergrund abgetragen. Die Tragschicht ist ungeeignet für die dauerhafte und direkte Aufnahme des Verkehrs.
- Binderschicht (bin): wurde früher auch „hochstandfeste Tragschicht“ genannt. Die Binderschicht wird bei hochbelasteten Aufbauten zur weiteren Lastverteilung, ausschließlich mit modifiziertem Bitumen, ausgeführt.
- Deckschicht (deck/surf): dient dem Schutz der Tragschicht und dient der direkten Aufnahme des Verkehrs. Die Deckschicht hat besondere Anforderungen an die Polierbarkeit und Griffbarkeit.
- Tragdeckschicht: vereint, nur im untergeordneten Straßennetz, die Funktionen der Trag- und Deckschicht.

Die wesentlichen Unterschiede der aufgezählten Asphaltarten bestehen vor allem im Größtkorn, der Schichtdicke, dem Hohlraumgehalt und dem Bindemittelgehalt. (9)

In dieser Diplomarbeit wurde ausschließlich Asphalt behandelt, der als Deckschicht eingesetzt wird.

2.4.2 Einteilung nach der Einbautemperatur

Asphaltmischgüter können aufgrund ihrer Einbautemperatur eingeteilt werden, man unterscheidet folgende Mischgüter:

- Kaltmischgut ($< 30^{\circ}\text{C}$)
- Warmmischgut ($40 - 120^{\circ}\text{C}$)
- Temperaturabgesenkte Asphalte ($100 - 130^{\circ}\text{C}$)
- Heißmischgut ($> 130^{\circ}\text{C}$ bis über 200°C)

Das Standardverfahren für die Herstellung des Asphalts ist die des Heißmischguts. (9)

2.4.3 Arten und Eigenschaften

Asphaltbeton (AC)

In der Deckschicht wird überwiegend Asphaltbeton eingesetzt. Asphaltbeton ist darüber hinaus auch in Trag- und Binderschichten einsetzbar. Er wird als Heißmischgut eingebaut und verdichtet. (7) (9)

Es handelt sich um einen sehr dichten Asphalt, wodurch ein Hohlraumgehalt von etwa 2,5% in Deckschichten erreicht werden sollte. Der Hohlraumgehalt kann über die Kornform beeinflusst werden, je höher der Anteil der gebrochenen Körner, desto mehr Hohlraum entsteht. Die Sieblinie der Korngrößenverteilung hat im optimalen Fall die Form einer Parabel, der sogenannten Fuller-Parabel, wodurch die dichteste Packung der Körner entsteht (siehe Abbildung 6). (7) (9)

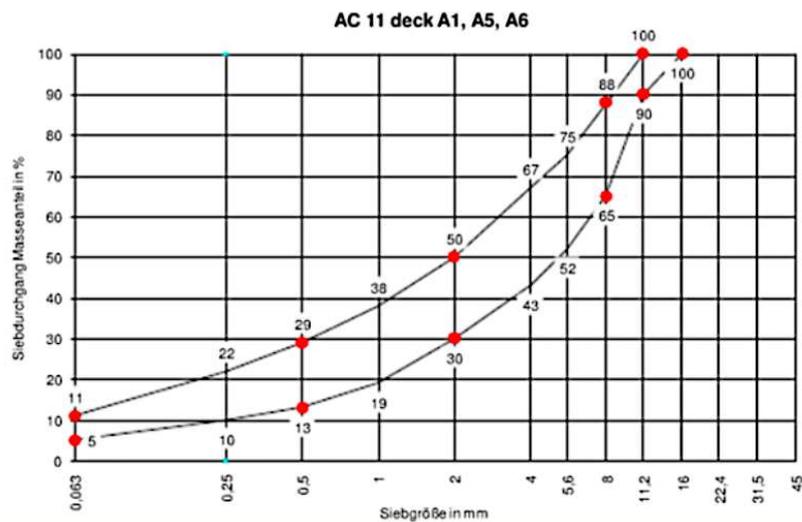


Abbildung 6: Grafische Darstellung der Sieblinie eines AC 11 (9)

Der Bindemittelgehalt ist mit 3,5 – 4 M-% der geringste Bindemittelgehalt aller Asphaltarten.

Splittmastixasphalt (SMA)

Der Splittmastixasphalt zeichnet sich durch sein Gesteinskorngemisch mit Ausfallskörnung (Sand und Feinsplitt) und hohem Splittanteil aus. Splittmastixasphalte besitzen in ihrer obersten Kornklasse rund 50 M-% und einen Füllergehalt von rund 10 M-% (siehe Abbildung 7). (7) (9)

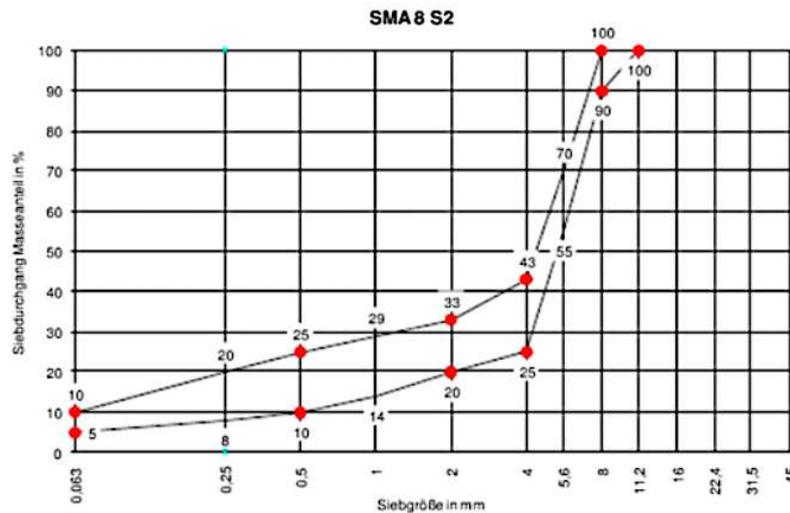


Abbildung 7: Grafische Darstellung der Sieblinie eines SMA 8 (9)

Die Hohlräume des grobkörnigen Splittgerüsts werden weitgehend durch Mastix (Bitumen + Füller) ausgefüllt. Der Bindemittelgehalt liegt in der Regel bei über 6,0 M-% und ist damit vergleichsweise sehr hoch. Um einer Entmischung während der Herstellung, des Transports, des Einbaus und der Verdichtung entgegenzuwirken sind stabilisierende Zusätze, wie z.B. organische und mineralische Faserstoffe sowie der Einsatz eines relativ harten Bindemittels notwendig. (7) (9)

Der Splittmastixasphalt zeichnet sich durch seine hohe Tragfähigkeit und guter Makrotextur aus und wird als Deckschicht im hochrangigen Straßennetz eingesetzt. (9)

Offenporiger Asphalt (PA)

Der offenporige Asphalt weist eine ausgeprägte Ausfallskörnung der Sandfraktion mit verformungsresistentem Monokorngerüst auf. Der Anteil der groben Gesteinskörner dominiert die Zusammensetzung. Es entsteht ein großer Hohlraumgehalt von 17 – 25 V-%, wobei die Hohlräume miteinander verbunden und von außen zugänglich sind. Der Mindestbindemittelanteil liegt bei 5,5 – 6,5 M-%. Es werden Bindemittel mit hoher Viskosität und Alterungsbeständigkeit (PmB) verwendet und - ähnlich dem Splittmastixasphalt - durch die Zugabe von Bindemittelträgern stabilisiert. (7) (9)

Wie auch beim Splittmastixasphalt, weist der offenporige Asphalt eine hohe Tragfähigkeit und gute Makrotextur auf und wird ebenfalls als Deckschicht eingesetzt. Die Anwendung beschränkt sich auf Autobahnabschnitte, die besondere Anforderungen an den Lärmschutz stellen, da er den Schall teilweise absorbiert und zu tieferen, weniger störenden Frequenzen verschiebt. (7) (9)

Gussasphalt (MA)

Gussasphalt entsteht im Unterschied zu den vorherigen Asphaltarten durch Vergießen und nicht durch Verdichten. Er besitzt keine technisch relevanten Hohlräume und einen hohen Bitumen- (7,5 – 10 M-%) und Füllergehalt (20 – 32 M-%). Aufgrund der Verformungsstabilität werden harte Bindemittel verwendet. Gussasphalt kommt bei hochbeanspruchten Verkehrsflächen im Hoch- und Tiefbau sowie zur Abdichtung zum Einsatz. (9)

3 Materialien und Methoden

3.1 Ausgangsstoffe

3.1.1 Bitumensorten

Es werden drei verschiedene Bitumensorten ausgewählt, um einen Vergleich zwischen dem Gummimodifizierten und dem Polymermodifizierten Bitumen zu erhalten. Dafür werden zwei verschiedene Straßenbaubitumen als Grundbitumen, welche mit Gummi modifiziert werden, verwendet. Im Vergleich dazu wird ein Polymermodifiziertes Bitumen herangezogen. Die ausgewählten Sorten sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Liste der verwendeten Bitumensorten

Bitumensorte	Laborcode
50/70	B005A
50/70	B1034A
PmB 25/55-65	B528A

In weiterer Folge wird das Straßenbaubitumen 50/70 (1034A) als 50/70 bezeichnet, das PmB 25/55-65 als PmB und das Gummimodifizierte Bitumen mit RmB, um den Textlesefluss zu erleichtern. Bei Verwendung des Straßenbaubitumens 50/70 (B005A) wird explizit darauf hingewiesen.

3.1.2 Fasern und Recyclingprodukte

Für die Gummimodifizierung kommt das Produkt GRM 40/15 der Firma CTS Bitumen GmbH zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein im Nassverfahren hergestelltes Gummimodifiziertes Bitumen aus Gummimehl und Basisbitumen, welches im weiteren Produktionsprozess unter Zugabe von Füllstoffen und weiteren Additiven und Inhibitoren granuliert wurde. (20)

Zur Herstellung des SMA 11 S3 mit dem Polymermodifizierten Bitumen kommt das Produkt VIATOP Premium zur Anwendung. Hierbei handelt es sich um eine pelletierte Mischung aus 90 M-% Naturfasern und 10 M-% Bitumen 50/70. (21)

3.1.3 Gestein

Die für die Asphalt-Probekörper benötigte Gesteinskörnung trägt die Handelsbezeichnung Loja und kommt von der Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH. Der Gesteinsbruch liegt im südwestlichen Teil des Waldviertels, etwa 2 km nordöstlich des Ortes Persenbeug. Laut Leistungserklärung des Herstellers handelt es sich bei dem Gestein um einen Porphyrit und Kersantit. (22) (23)

3.1.4 Füller

Zur Herstellung der Asphalt-Probekörper wird als Fremdfüller Kalksteinmehl eingesetzt.

3.2 Herstellung des Gummimodifizierten Bitumens

Das Gummimodifizierte Bitumen wird nach der vorgegebenen Zusammensetzung der TL RmB-StB By 10 hergestellt. Um das RmB G 20/60-55 zu erhalten wird das 50/70 Straßenbaubitumen im Nassverfahren mit 22 M-% GRM 40/15 erzeugt:

Das Straßenbaubitumen wird in einem Kübel im Trockenschrank auf 180°C erhitzt und danach im Kübel in ein vorgeheiztes Sandbad mit Wärmemanschette bei 180°C gestellt. Mit Hilfe eines Flügelrührers wird das Gummimodifizierte Bitumengranulat bei anfangs 200 U/min portionsweise innerhalb von 5 Minuten beigemischt (siehe Abbildung 8). Während des Mischvorgangs wird die Umdrehungszahl von 200 U/min kontinuierlich auf 1.200 U/min erhöht. Nach weiteren 5 Minuten wird die Umdrehungszahl auf konstant 1.500 U/min gesteigert und das Gummi-Bitumen-Gemisch für weitere 25 Minuten durchmischt. Nach Abschluss des Mischvorgangs kommt das nun Gummimodifizierte Bitumen für eine Stunde bei 170°C in den Trockenschrank, um in weiterer Folge zum Asphalt verarbeitet zu werden.



Abbildung 8: Veranschaulichung des Mischvorgangs zur Herstellung des RmB

3.3 Bitumenprüfungen

Die Bitumenprüfungen werden jeweils für das 50/70, das RmB und das PmB durchgeführt. Dabei wird das RmB mit dem 50/70 und dem PmB verglichen. Der Vergleich mit dem 50/70 dient dazu, um den Einfluss der Gummimodifizierung auf das Grundbitumen festzustellen, der Vergleich mit dem PmB, um die beiden modifizierten Bitumen direkt voneinander zu unterscheiden.

3.3.1 Empirische Prüfverfahren

Nadelpenetration (Pen) - EN 1426

Die Penetration eines Bindemittels ist ein Maß für die Bitumenhärte. Das Ergebnis des Versuchs ist die Eindringtiefe einer Nadel in eine Bitumenprobe in einem Wasserbad bei konstanter Temperatur von 25°C während einer Belastungsdauer von 5 Sekunden. Der Mittelwert aus drei Einzelprüfungen ergibt das Ergebnis. Die Eindringtiefe der Nadel in das Bitumen wird in 1/10 mm angegeben und ist die Grundlage für die Einteilung der im Straßenbau verwendeten Bitumensorten. (7) (9) (24)

Bitumen mit der Bezeichnung 50/70 besitzen eine Nadelpenetration (Pen) zwischen 50 1/10 mm und 70 1/10 mm. (7)

Abbildung 9 stellt die schematische Darstellung der Nadelpenetration dar. (9)

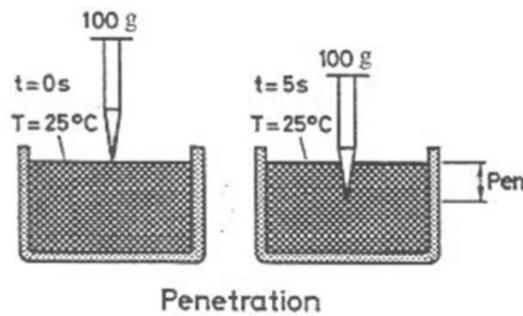


Abbildung 9: Skizzenhafte Darstellung der Nadelpenetration (9)

Erweichungspunkt Ring und Kugel (RuK) - ON EN 1427

Der Erweichungspunkt nach Ring und Kugel gibt die obere Grenze der Gebrauchsspanne (knetbarer Bereich) eines Bitumens an. (9)

Das Bitumen wird hierbei in zwei geschulterte Ringe aus einer Kupfer-Zink-Legierung gegossen und mit kontrollierter Temperaturänderung in einem Flüssigkeitsbad (Wasser oder Glycerol) eingelegt. Auf die beiden Bitumenschichten wird jeweils eine Stahlkugel aufgelegt. Die Erwärmungsgeschwindigkeit des Flüssigkeitsbads beträgt $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Es wird die Temperatur bestimmt, bei der die Verformung des Bitumens unter dem Gewicht der Stahlkugel 25,4 mm erreicht. Diese Temperatur wird als Erweichungspunkt (EP_{RuK}) in $^{\circ}\text{C}$ angegeben. Der Versuch ist in Abbildung 10 skizziert. (7) (9) (25)

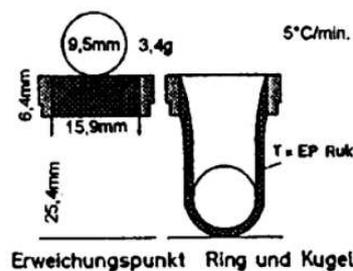


Abbildung 10: Skizzenhafte Darstellung des Versuchs mit Ring und Kugel (9)

Mit steigender „Weichheit“ des Bitumens nimmt der Wert der Nadelpenetration überproportional zu. Daher gilt im Allgemeinen: je niedriger der EP_{RuK} , desto höher ist der Pen-Wert eines Bitumens. (7)

Für das 50/70 und das RmB wird Wasser als Medium im Flüssigkeitsbad verwendet, da der zu erwartende EP_{RuK} unter 80°C liegt. Beim PmB wird aufgrund seines Mindestwerts von 65°C für den EP_{RuK} Glycerol verwendet, da aus Erfahrung angenommen wird, dass der EP_{RuK} über 80°C liegt. Sollte der EP_{RuK} für das PmB unter 80°C liegen, so wird der Versuch mit Wasser wiederholt.

Elastische Rückstellung - EN 13398

Die Elastische Rückstellung oder Rückformung gibt das Maß für den Modifizierungsgrad des modifizierten Bitumens an. (9)

Das Bitumen wird dafür in eine spezielle Gießform (siehe Abbildung 11) gegossen und bei konstanter Prüftemperatur von 25°C in einem Wasserbad mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 mm/min bis auf eine Länge von 200 mm gedehnt. Bei dieser ausgezogenen Länge wird der erzeugte Bitumenfaden in der Mitte zerschnitten, um zwei Halbfäden zu erhalten. Nach der Zeit von 30 Minuten für die Rückformung wird die Verkürzung der beiden Halbfäden gemessen und als prozentueller Wert in Bezug auf die Dehnlänge angegeben. Dieser, auf die Ausziehlänge bezogene Wert, ergibt die elastische Rückstellung in Prozent. Sollte der Bitumenfaden reißen bevor die Ausziehlänge von 200 mm erreicht ist, so ist mit dem Wert zu rechnen, bei dem der Bitumenfaden gerissen ist. Die Prüfung erfolgt an mindestens zwei Probekörpern pro Versuch. (7) (26)

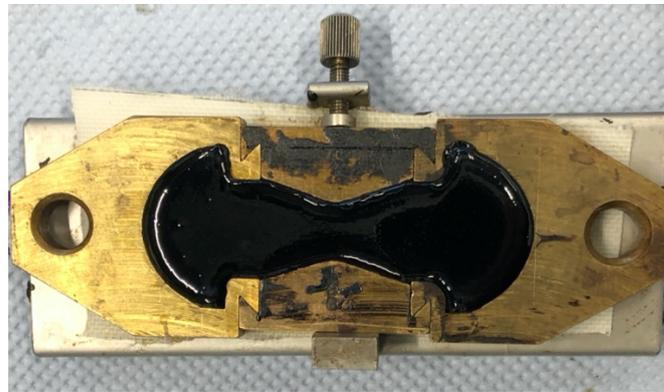


Abbildung 11: Ansicht einer mit Bitumen gefüllten Gießform

Die Formel für die Berechnung der elastischen Rückstellung lautet:

$$R_E = \frac{d}{L} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 1}$$

R_E = Wert der elastischen Rückstellung

d = Abstand zwischen den Halbfäden [mm]

L = Ausziehlänge [mm]

Der Versuch der Elastischen Rückstellung wird nur für die beiden modifizierten Bitumen (RmB, PmB) durchgeführt.

3.3.2 Gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfungen (GVO)

Dynamisches Scherrheometer (DSR) - EN 14770

Mit dem Dynamischen Scherrheometer wird das viskoelastische Materialverhalten von Bitumen untersucht. Dafür wird das Bitumen kraftschlüssig zwischen zwei parallelen temperierbaren Platten aufgetragen. Das Bitumen wird dafür vor Versuchsbeginn in Silikonformen eingegossen. Die obere Platte hat einen Durchmesser von 8 oder 25 mm und führt während des Versuchs oszillierende Bewegungen aus, die untere

Platte stellt das Peltierelement dar. Der Versuch wird bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen durchgeführt (mittels Temperatur- und Frequenzsweep). Als relevante Parameter werden der komplexe Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenwinkel δ abgeleitet. Der komplexe Schubmodul $|G^*|$ setzt sich aus einem Realteil G' (elastischer Anteil) und einem Imaginärteil G'' (viskoser Anteil) zusammen. Ein hoher Schubmodul $|G^*|$ bedeutet, dass das Bitumen schwer verformbar ist, ein niedriger $|G^*|$ weist auf leichte Verformbarkeit des Bitumens hin. Der Phasenwinkel δ beschreibt die Phasenverschiebung der resultierenden Deformation infolge der aufgetragenen Scherspannung und hat einen Winkel von 0° bis 90° . Bei einem Winkel von 0° ist das Materialverhalten elastisch, bei 90° viskos. (6) (9) (11) (27)

Das Versuchsprinzip des DSR ist in Abbildung 12 dargestellt.

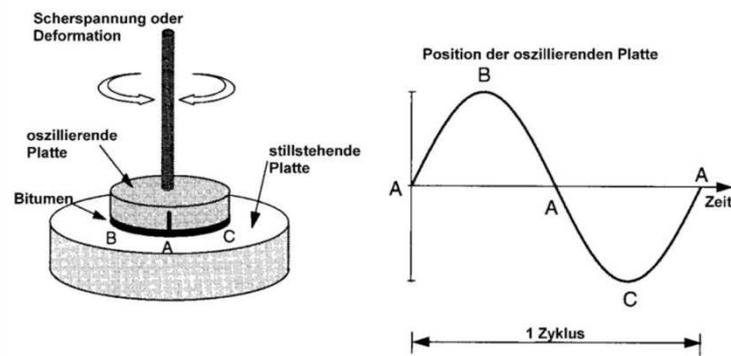


Abbildung 12: Versuchsprinzip des Dynamischen Scherrheometers (9)

Die Formeln zur Berechnung des komplexen Schubmoduls lauten:

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

$$\gamma = \frac{\alpha \cdot r}{h} \quad \text{Gleichung 3}$$

$$|G^*| = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Gleichung 4}$$

τ = Scherspannung [Pa]

M = maximal aufgebrachtes Drehmoment [Nm]

r = Plattenradius [m]

γ = Deformation []

α = Verdrehwinkel [rad]

h = Messspalt [m]

$|G^*|$ = komplexer Schubmodul [Pa]

Die Formel zur Berechnung des Phasenwinkels lautet:

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360^\circ \quad \text{Gleichung 5}$$

$$t = \frac{1}{f} \quad \text{Gleichung 6}$$

δ = Phasenwinkel [°]

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

t = Zeit für eine Schwingung [s]

f = Frequenz [Hz]

Der DSR-Versuch wird mit den folgenden Prüfparametern durchgeführt:

- Prüffrequenzen: 0,1 Hz, 0,3 Hz, 1,0 Hz, 1,59 Hz, 3,0 Hz, 5,0 Hz, 10,0 Hz
- Prüftemperaturen bei 8 mm Prüfplatte: -4°C, 0°C, 4°C, 10°C, 16°C, 22°C, 28°C, 34°C, 40°C
- Prüftemperaturen bei 25 mm Prüfplatte: 40°C, 46°C, 52°C, 58°C, 64°C, 70°C, 76°C, 82°C

Der Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenwinkel δ werden automatisch von einem am DSR angeschlossenen Computer berechnet.

Biegebalkenrheometer (BBR) - EN 14771

Mit dem Biegebalkenrheometer wird das Tieftemperaturverhalten des Bitumens bestimmt. Bei diesem Drei-Punkt-Biegeversuch wird die Durchbiegung in der Mitte eines Balkens aus Bitumen gemessen. Eine konstante Last wird in der Mitte des Biegebalkens für eine festgelegte Belastungsdauer (240 s) aufgebracht und die Durchbiegung als Funktion der Zeit gemessen. Der Bitumenbalken ist während der gesamten Zeit bei einer vorbestimmten Temperatur in einem Flüssigkeitsbad aus 95 prozentigem Ethanol eingelegt. Die Steifigkeit des Probekörpers wird durch die Durchbiegung ermittelt. Neben der Steifigkeit wird auch der Absolutwert (m-Wert), die Steigung der Kurve des Logarithmus der Steifigkeit gegen den Logarithmus der Zeit, errechnet. Der m-Wert beschreibt die Relaxationsfähigkeit des Bitumens. Je geringer die Steifigkeit und je höher der m-Wert, desto besser ist das Tieftemperaturverhalten des Bitumens. (9) (11) (28)

Das Versuchsprinzip des BBR ist in Abbildung 13 zu sehen.

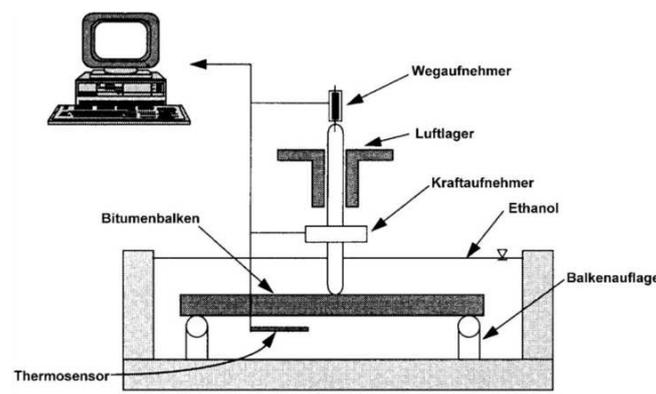


Abbildung 13: Versuchsprinzip des Biegebalkenrheometers (9)

Die Formel zur Berechnung der Steifigkeit lautet:

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot f(t) \cdot I} \quad \text{Gleichung 7}$$

S = Steifigkeit [Pa]

P = Auflast [N]

l = Abstand zwischen den Auflagern [m]

f = Durchbiegung [m]

I = Trägheitsmoment [m⁴]

Der BBR-Versuch wird an den jeweiligen Bitumen mit Doppel- oder Dreifachbestimmung bei den folgenden Temperaturen durchgeführt: -12°C, -18°C, -24°C, -30°C.

Die Steifigkeit und der m-Wert werden automatisch von einem an den BBR angeschlossenen Computer berechnet.

Rotationsviskosimeter (RV) - EN 13302

Dieser Versuch dient zur Bestimmung der dynamischen Viskosität des Bitumens und ist wichtig für die weitere Verarbeitbarkeit beim Pumpen, Mischen und Einbau. (9)

Das Drehmoment, das auf eine Spindel aufgebracht wird, um eine konstante Drehgeschwindigkeit (üblicherweise 20 Umdrehungen pro Minute) zu erreichen ist ein Maß für die dynamische Viskosität der Probe. Hierfür wird ein koaxiales Zylindersystem verwendet: ein äußerer Zylinder steht still, während ein innerer Zylinder (Spindel) in der Bitumenprobe rotiert. Üblicherweise wird der Versuch bei verschiedenen Prüftemperaturen (Temperatursweep) durchgeführt. Ein hoher Wert für die dynamische Viskosität bedeutet einen hohen Energieeinsatz beim Pumpen oder schlechte Mischbarkeit bei der Asphaltherstellung mit der Gesteinskörnung. (9) (11) (29)

Das Versuchsprinzip des RV ist in Abbildung 14 dargestellt.

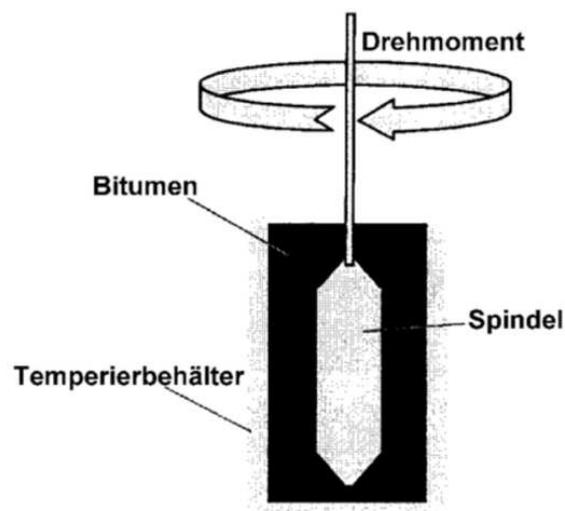


Abbildung 14: Versuchsprinzip der Rotationsviskosimetrie (9)

Die Formel für die Berechnung der dynamischen Viskosität lautet:

$$\eta = \frac{M_d}{\omega} \cdot \frac{A}{M} \quad \text{Gleichung 8}$$

η = dynamische Viskosität [Pa.s]

M_d = Drehmoment [Nm]

A = Formfaktor [m^{-3}] (A ist abhängig von der Form der Spindel)

M = Geometriefaktor [1/rad] (M ist abhängig vom Radius der Spindel (=Rotor) und dem Radius des Bechers (=Stator))

Der RV-Versuch wird an den Bitumenproben bei den folgenden Prüftemperaturen mit 20 U/min durchgeführt: 120°C, 125°C, 130°C, 135°C, 150°C, 165°C, 180°C.

Die dynamische Viskosität wird direkt über einen an den RV angeschlossenen Computer berechnet.

3.3.3 Bitumenalterung

Die Bitumenalterung wird nur für das 50/70 Grundbitumen durchgeführt, um das RTFOT-gealterte Bitumen mit dem DSR, und das PAV-gealterte Bitumen mit dem BBR zu messen und den Upper-PG und Lower-PG nach SUPERPAVE zu berechnen.

Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) – EN 12607-1

Das Ziel des RTFOT ist es, die Kurzzeitalterung des Bitumens im Labor zu simulieren, um es danach weiter mit anderen Methoden zu prüfen. Bei diesem Versuch wird das Bitumen zu je 35g in sogenannte „RTFOT-Flaschen“ gefüllt. Diese Flaschen werden in eine Trommel in einen Ofen, mit einer konstanten Lufttemperatur von 163°C, horizontal eingelegt. Die Trommel rotiert während des Versuchs langsam, sodass sich in den horizontal liegenden Flaschen ein ständig fließender Bitumenfilm bildet. Dadurch wird eine möglichst große Oxidationsoberfläche erzeugt. Die Oxidation wird durch einen vorgewärmten Luftstrahl verstärkt und es kommt zu einer Masseänderung des Bitumens durch die destillativen und oxidativen Einflüsse im Ofen. Die Alterungszeit des Bitumens im Ofen beträgt 75 min. (9) (30)

Das Versuchsprinzip ist in Abbildung 15 veranschaulicht.

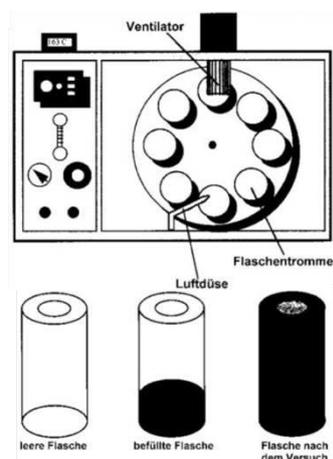


Abbildung 15: Versuchsprinzip des RTFOT (9)

Pressure Ageing Vessel (PAV) – EN 14769

Das Ziel des PAV-Versuchs ist es, die Bitumenveränderung während einer Asphaltgedauer von 5 – 10 Jahren zu simulieren (Langzeitalterung). Für diesen Versuch muss die Bitumenprobe bereits durch den RTFOT-Versuch kurzzeitgealtert sein. Das Bitumen wird für den PAV-Versuch gleichmäßig auf Blechschalen (50g pro Blechschale) verteilt und in den Druckkessel eingesetzt. Der Innenraum des Druckkessels wird auf eine Temperatur von 90°C – 110°C erhitzt und mit einem Druck von 2,1 MPa beaufschlagt. Durch die Temperatur und den hohen Druck erfährt das Bitumen eine beschleunigte Oxidation. Der Druck sorgt außerdem dafür, dass es zu keinem Verlust von flüchtigen Bitumenbestandteilen kommt. Die übliche Alterungsdauer des Bitumens beim PAV-Versuch beträgt 20 h. (9) (31)

Das Versuchsprinzip ist in Abbildung 16 dargestellt.

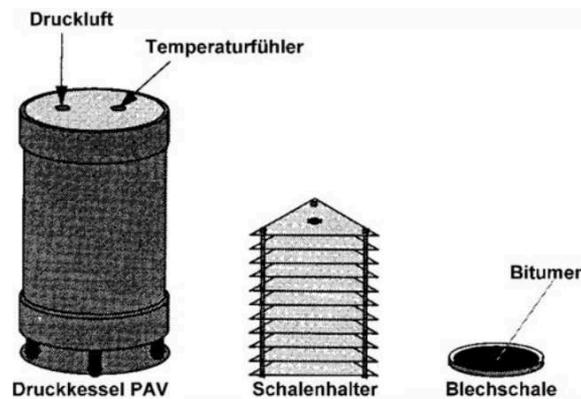


Abbildung 16: Versuchsprinzip des PAV (9)

3.4 Asphaltkonzept

Die Wahl der Asphaltmischgüter fällt auf einen AC 11 deck A1 und SMA 11 deck S3. Die Zusammensetzung des Asphaltmischguts wird nach ÖNORM B 3580-1 (AC 11) und nach ÖNORM B 3584-1 (SMA 11) gewählt. Die verwendeten Materialien sind die in Kapitel 3.1 beschriebenen Ausgangsstoffe.

Die Bezeichnungen der verwendeten Asphaltmischgüter lauten:

- AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS
- SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS
- AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS
- SMA 11 deck PmB 25/65, S3, GS

In Tabelle 5 - Tabelle 8 sind die Masseanteile der einzelnen Komponenten für das jeweilige Asphaltmischgut aufgelistet.

Tabelle 5: Mischgutzusammensetzung AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS

Material	Handelsbezeichnung	Laborcode	Masse-%
Bitumen	RmB G 20/60-55	B1037A	5,60
Füller	Kalksteinmehl	F135	7,00
0/2	Loja	G900	33,50
2/4	Loja	G926	13,50
4/8	Loja	G902	20,00
8/11	Loja	G903	20,40
			100,00

Tabelle 6: Mischgutzusammensetzung SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS

Material	Handelsbezeichnung	Laborcode	Masse-%
Bitumen	RmB G 20/60-55	B1037A	5,90
Füller	Kalksteinmehl	F135	6,45
0/2	Loja	G900	21,84
2/4	Loja	G926	0,00
4/8	Loja	G902	14,88
8/11	Loja	G903	50,93
			100,00

Tabelle 7: Mischgutzusammensetzung AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS

Material	Handelsbezeichnung	Laborcode	Masse-%
Bitumen	PmB 25/55-65	B528A	5,90
Füller	Kalksteinmehl	F135	6,98
0/2	Loja	G900	33,39
2/4	Loja	G926	13,46
4/8	Loja	G902	19,94
8/11	Loja	G903	20,34
			100,00

Tabelle 8: Mischgutzusammensetzung SMA 11 deck PmB 25/55-65, S3, GS

Material	Handelsbezeichnung	Laborcode	Masse-%
Bitumen	PmB 25/55-65	B528A	6,20
Zusatz	VIATOP Premium	S260	0,20
Füller	Kalksteinmehl	F135	6,37
0/2	Loja	G900	21,35
2/4	Loja	G926	0,74
4/8	Loja	G902	15,65
8/11	Loja	G903	49,50
			100,00

Die Sieblinien der einzelnen Mischgüter befinden sich im Anhang.

3.5 Probekörperherstellung

Für die Durchführung der Asphaltprüfungen werden die Probekörper (PK) zuerst in Platten hergestellt und dann in die jeweilige Prüfkörperdimension geschnitten. Tabelle 9 zeigt die Probekörper, welche für die Asphaltprüfungen benötigt werden.

Tabelle 9: Auflistung der hergestellten Asphaltprobekörper

Asphaltart	PK-Bezeichnung	Plattenabmessungen [mm]	PK-Abmessungen [mm]	Anzahl PK
AC 11 deck RmB	K753	500 x 260 x 68,2	225 x 60 x 60	8
AC 11 deck RmB	T883	500 x 260 x 126,6	h = 200, DN = 100	4
AC 11 deck RmB	E1144	500 x 260 x 67	500 x 60 x 60	3
SMA 11 deck RmB	K755	500 x 260 x 68,2	225 x 60 x 60	8
SMA 11 deck RmB	T888	500 x 260 x 126,6	h = 200, DN = 100	4
SMA 11 deck RmB	E1149	500 x 260 x 67	500 x 60 x 60	3
AC 11 deck PmB	K757	500 x 260 x 68,2	225 x 60 x 60	8
AC 11 deck PmB	T892	500 x 260 x 126,6	h = 200, DN = 100	4
AC 11 deck PmB	E1154	500 x 260 x 67	500 x 60 x 60	3
SMA 11 deck Pmb	K758	500 x 260 x 68,2	225 x 60 x 60	8
SMA 11 deck Pmb	T893	500 x 260 x 126,6	h = 200, DN = 100	4
SMA 11 deck Pmb	E1155	500 x 260 x 67	500 x 60 x 60	3

Die vorbereiteten Mischgutkomponenten werden im Wärmeschrank auf die jeweilige Mischtemperatur vorgeheizt, danach in einem Gegenlaufzwangsmischer nach EN 12697-35 gemischt und anschließend mit einem Walzsegmentverdichter nach EN 12697-33 zu Platten verdichtet. Aus den jeweiligen Platten werden die Probekörper entweder geschnitten oder herausgebohrt. Bei der Herstellung wird ein Teil der verschiedenen Mischgüter für die Bestimmung der Rohdichte, welche für die Bestimmung der Probekörperkenn- daten erforderlich ist, verwendet. Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt mittels Pyknometer nach EN 12697-5, Verfahren A.

Für die Berechnung des Hohlraumgehalts der einzelnen Probekörper, nach EN 12697-8, wird die Raum- dichte der einzelnen Probekörper benötigt. Diese wird für jeden Probekörper nach EN 12697-6, Verfahren B: Raumdichte-gesättigte Oberfläche (SSD), bestimmt. Die Maße der Probekörper werden nach EN 12697- 29 bestimmt. Die detaillierten Probekörperkennwerte der einzelnen Probekörper befinden sich im Anhang.

3.6 Asphaltprüfungen

Nach der Herstellung, Beschriftung und Ermittlung der Kenndaten aller Probekörper wird das Prüfpro- gramm der Asphaltprüfungen durchlaufen. Bei dem Prüfprogramm handelt es sich um drei strukturelle GVO Prüfverfahren, welche im Kapitel 3.6.1 genauer beschrieben sind.

3.6.1 Strukturelle GVO Prüfverfahren

Beständigkeit gegen Kälterisse - Abkühlprüfung (TSRST) - EN 12697-46

Beim Abkühlversuch werden die kältebedingten (kryogenen) Zugspannungen aufgrund von Abkühlung ermittelt. Es wird die Temperatur ermittelt, bis zu der ein Asphaltmischgut diese kryogenen Zugspannungen aufnehmen kann, bevor der Probekörper durch einen Riss versagt. Dieses Reißen wird nach EN 12697-46 als Ausfall bezeichnet. Für die Prüfung wird der Probekörper der Länge nach, spannungsfrei, in die Prüf- maschine eingebaut, während des Versuchs konstant gehalten und einer Temperaturabsenkung mit kon- stanter Rate unterzogen. Durch die Temperaturabsenkung kommt es aufgrund des verhinderten thermischen Schrumpfens im Probekörper zu kryogenen Spannungen, die bis zu seinem Bruch (Ausfall) führen. Die Ergebnisse sind der Verlauf der kryogenen Spannung über der Temperatur $\sigma_{kry}(T)$ und die Ausfallspannung $\sigma_{kry,Ausfall}$ bei der Ausfalltemperatur $TSRST_{max}$. (9) (32) (33)

Die Starttemperatur der Prüfung beträgt 10°C und die Abkühlrate beträgt 10 K/h. Pro Asphaltmischgut werden drei Probekörper in Form von Einzelprüfungen geprüft und deren Ergebnisse als Mittelwert als Prüfergebnis ermittelt. Es werden die Probekörper mit der Bezeichnung Kxxx verwendet.

Das Prinzip des TSRST ist in Abbildung 17 dargestellt.

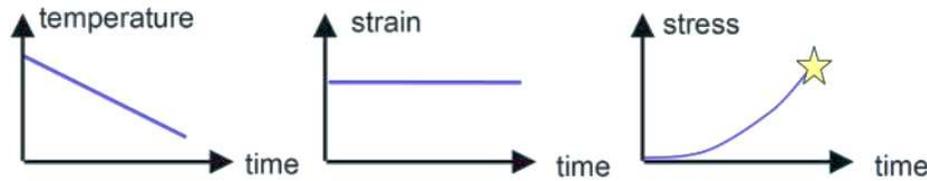


Abbildung 17: Versuchsprinzip des TSRST (9)

Beständigkeit gegen bleibende Verformungen – zyklisch triaxiale Druckschwellprüfung (TCCT) - EN 12697-25

Mit der zyklisch triaxialen Druckschwellprüfung wird die Beständigkeit des Asphaltmischguts gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen ermittelt. Der zylindrische Probekörper, welcher zuvor auf die Prüftemperatur temperiert wurde, wird zwischen zwei planparallelen Lastplatten eingebaut. Zur Behinderung der Querdehnung wird der Probekörper einem konstanten Seitendruck σ_c ausgesetzt. Dieser wird von einem zyklischen Axialdruck $\sigma_a(t)$ überlagert. Bei der Prüfung wird die Änderung der Höhe des Probekörpers gemessen und daraus die bleibende Verformung (Gesamtaxialverformung) als Funktion der Anzahl an Lastwechsel bestimmt. Die Ergebnisse werden als Kriechkurve dargestellt und daraus die Kriech-eigenschaften des Probekörpers errechnet. Hierzu wird an den quasilinearen Teil der Kriechkurve eine Gerade durch Regression folgender Form angepasst:

$$\varepsilon_n = A_1 + B_1 \cdot n \quad \text{Gleichung 9}$$

ε_n ist die bleibende Gesamtaxialverformung des Probekörpers nach n Lastwechsel in Prozent. Unter der Kriechrate f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$] versteht man die mit 10^4 erweiterte Steigung der Linearen B_1 . (9) (32) (34)

Pro Asphaltmischgut werden drei Einzelprüfungen durchgeführt. Das Gesamtergebnis ist der Mittelwert dieser drei Einzelprüfungen. Es werden die Probekörper mit der Bezeichnung Txxx verwendet.

Die Prüfbedingungen werden nach EN 13108-20 festgelegt und sind für die Deckschicht folgendermaßen definiert:

- Prüftemperatur: 50°C
- Prüffrequenz: 3 Hz
- Stützdruck: 150 kPa
- Axialspannungsamplitude: 300 kPa
- Lastwechselanzahl: 25.000

Steifigkeitsverhalten - 4-Punkt-Biegebalken (4-PBB) - EN 12697-26

Mit dem 4-PBB werden die temperatur- und frequenzabhängige dynamische Steifigkeit (dynamischer E-Modul $|E^*|$) nach EN 12697-26 und die Ermüdungsbeständigkeit nach EN 12697-24 des Asphaltmischguts untersucht. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird die Steifigkeitsprüfung durchgeführt. Der prismatische Asphaltprobekörper wird einer periodischen, weggesteuerten 4-PBB-Biegeprüfung mit

freier Rotation und horizontaler Translation an allen Belastungs- und Reaktionspunkten unterworfen. Die mittigen Lastpunkte werden in vertikaler Richtung senkrecht zur Längsachse des Probekörpers bewegt und erzeugen eine dadurch eine Biegung. Die Endlager halten den Probekörper in seiner vertikalen Lage fest. Die ausgeübte periodische Verschiebung erfolgt symmetrisch zum Nullpunkt und ist sinusförmig, die Verschiebungsamplitude muss konstant als Funktion der Zeit sein. Während der Prüfung wird die Kraft, die für die Verformung des Probekörpers erforderlich ist, als Funktion der Zeit gemessen und daraus der Steifigkeitsmodul des Asphaltmischguts berechnet. Das Ergebnis der Prüfung ist der Betrag der dynamischen Steifigkeit $|E^*|$ [MPa] und der Phasenwinkel φ in Abhängigkeit der Frequenz. Die dynamische Steifigkeit $|E^*|$ setzt sich aus seinem elastischen Anteil E_1 und viskosen Anteil E_2 zusammen, welche ebenfalls als Ergebnis ermittelt werden. (9) (32) (35)

Das Versuchsprinzip ist in Abbildung 18 dargestellt.

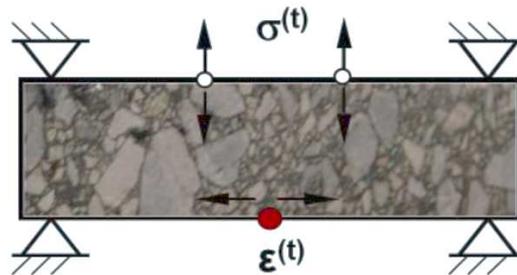


Abbildung 18: Versuchsprinzip des 4-PBB (9)

Der Abstand der äußeren Befestigungspunkte, welche den Probekörper mit Klemmen in seiner Lage halten, beträgt zueinander 480 mm, der Abstand der inneren Befestigungspunkte, ebenfalls durch Klemmen an den Probekörper befestigt, beträgt 160 mm zueinander. Die Steifigkeitsprüfung schädigt den Probekörper nicht. Daher wird die horizontale Dehnung an der Unterseite des Probekörpers mit $35 \mu\text{m/m}$ begrenzt. Die Prüftemperatur beträgt während der Prüfung konstant 20°C . (32)

Pro Asphaltmischgut werden drei Einzelprüfungen durchgeführt. Das Gesamtergebnis ist der Mittelwert dieser drei Einzelprüfungen. Es werden die Probekörper mit der Bezeichnung Exxxx verwendet.

4 Auswertung und Interpretation der Prüfungsergebnisse

4.1 Ergebnisse der Bitumenprüfungen

4.1.1 Nadelpenetration

Die Messergebnisse der Nadelpenetration sind in Tabelle 10 angeführt. Die gerundeten Messwerte sind graphisch in Abbildung 19 dargestellt.

Tabelle 10: Nadelpenetration der untersuchten Bitumenproben

Bitumen	Ergebnis [1/10 mm]	1. Messung [1/10 mm]	2. Messung [1/10 mm]	3. Messung [1/10 mm]
RmB	39	38,3	39,4	38,8
50/70	63	63,1	62,8	62,8
PmB	33	33,7	32,8	32,2

Die Wiederholpräzision nach EN 1426 ist bei allen Bitumenproben eingehalten worden, die Abweichung aller Proben ist kleiner als 4% vom Mittelwert. Der Penetrationswert entspricht nach EN 12591, EN 14023, TL RmB-StB By 10 und E GmBA bei allen Bitumenproben der jeweiligen Sorte. Durch die Ergebnisse der Penetration wird ersichtlich, dass das 50/70 Bitumen durch die Gummimodifizierung deutlich härter wird und dadurch der Wert der Nadelpenetration des RmB stark abnimmt. Das PmB ist aufgrund seines niedrigeren Penetrationswerts härter als das RmB.

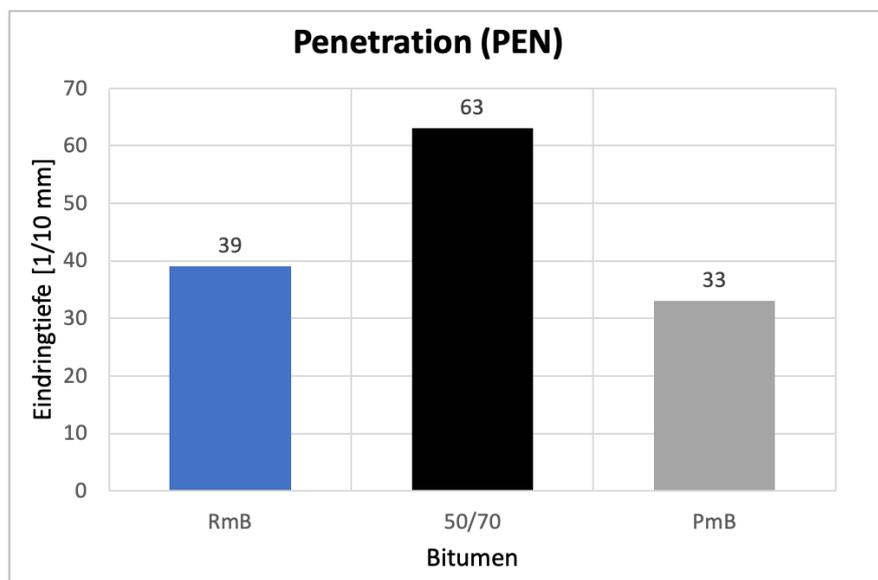


Abbildung 19: Nadelpenetration der untersuchten Bitumenproben

4.1.2 Erweichungspunkt Ring und Kugel

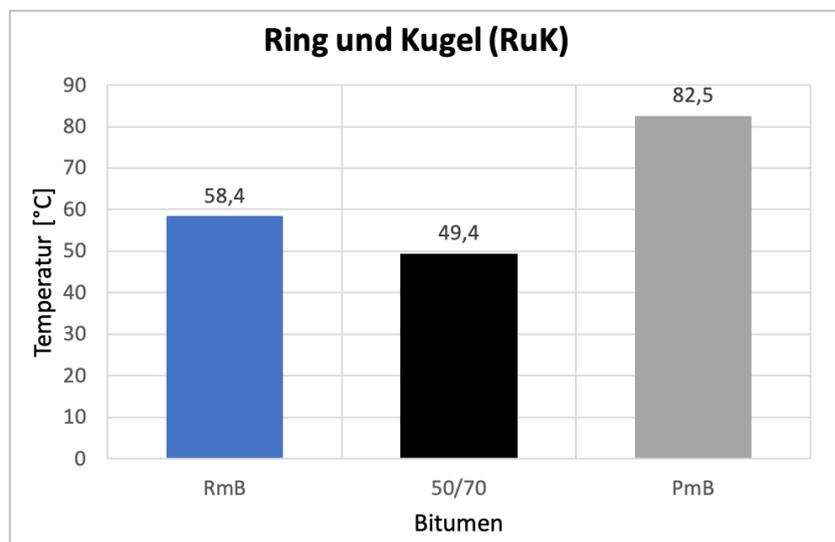
Die Messergebnisse aus der Prüfung des Erweichungspunkts mit Ring und Kugel sind in Tabelle 11 angeführt. Die gerundeten Messwerte sind graphisch in Abbildung 20 dargestellt.

Tabelle 11: Erweichungspunkt nach Ring und Kugel der untersuchten Bitumenproben

Bitumen	Ergebnis [°C]	1. Messung [°C]	2. Messung [°C]
RmB	58,4	58,16	58,51
50/70	49,4	49,39	49,25
PmB	82,5	83,07	82,23

Wie schon in Kapitel 3.3.1 angeführt, wurde für die Prüfung des 50/70 und des RmB destilliertes Wasser als Badflüssigkeit verwendet, für das PmB Glycerol. Da das Ergebnis des EP_{RuK} für das PmB über $80^{\circ}C$ liegt, muss keine zusätzliche Messung im destillierten Wasser durchgeführt werden. Die Wiederholpräzision nach EN 1427 ist eingehalten, da die Abweichung aller Proben kleiner als $1^{\circ}C$ (bzw. beim PmB kleiner als $1,5^{\circ}C$) ist. Der EP_{RuK} liegt beim 50/70 mit $49,4^{\circ}C$ innerhalb des von der EN 12591 festgelegten Bereichs ($46^{\circ}C - 54^{\circ}C$). Die Messungen des RmB mit einem EP_{RuK} von $58,4^{\circ}C$ (die TL RmB-StB By 10 und E GmBA legen beide einen Mindestwert EP_{RuK} von $55^{\circ}C$ für die Sorte fest) und des PmB mit einem EP_{RuK} von $82,5^{\circ}C$ (die EN 14023 legt einen Mindestwert von $65^{\circ}C$ für diese Sorte fest) liegen beide im geforderten Bereich.

Aufgrund der Ergebnisse des Erweichungspunkts nach Ring und Kugel wird ersichtlich, dass der EP_{RuK} des 50/70 niedriger ist als der des RmB und das RmB somit härter ist. Das PmB ist aufgrund seines höheren EP_{RuK} härter als das RmB. Das entspricht den Ergebnissen der Nadelpenetration, denn je höher der EP_{RuK} , desto niedriger ist der Penetrationswert.

**Abbildung 20:** Erweichungspunkt nach Ring und Kugel der untersuchten Bitumenproben

4.1.3 Elastische Rückstellung

Die Messergebnisse aus der Prüfung der Elastischen Rückstellung sind in Tabelle 12 angeführt.

Tabelle 12: Elastische Rückstellung der untersuchten Bitumenproben

Bitumen	Ausziehlänge L [mm]	Lichte Weite d [mm]	El. Rückstellung [%]	Mittelwert [%]
PmB	200	165	82,5	83
	200	167	83,5	
RmB	135	x	x	x
	137	x	x	

Anhand der Ergebnisse der elastischen Rückstellung wird sichtbar, dass das RmB die Ausziehlänge von 200 mm nicht erreichen konnte und die Proben bei 135 bzw. 137 mm gerissen sind. Laut den TL-RmB-Stb By 10 und den E GmBA ist bei vorzeitigem Reißen des Fadens die Ausziehlänge anzugeben. In Abbildung 21 ist das vorzeitige Reißen der Gummimodifizierten Bitumenproben bei Versuchsdurchführung zu sehen (rechte zwei Proben). Im Vergleich dazu verhält sich das PmB deutlich elastischer, lässt sich auf die gesamte Ausziehlänge von 200 mm ziehen und erreicht einen Wert von 83% für die elastische Rückstellung.

**Abbildung 21:** Versuchsdurchführung der Elastischen Rückstellung

In Abbildung 22 sind die Formen etwa einen Tag nach Versuchsdurchführung der elastischen Rückstellung zu sehen. Es ist ersichtlich, dass sich das PmB (linke Seite) deutlich weiter zurückgeformt hat als das RmB (rechte Seite).



Abbildung 22: Bitumenformen einen Tag nach der Versuchsdurchführung

4.1.4 Dynamisches Scherrheometer (DSR)

Die DSR-Prüfungen werden an den Bitumenproben auf zwei verschiedene Arten durchgeführt:

DSR -4°C/+40°C und DSR +40°C/82°C.

DSR -4°C/+40°C

Bei dieser DSR-Prüfung wird eine Platte mit einem Durchmesser von 8 mm verwendet, der Plattenabstand beträgt 2 mm und die Schwingungen haben eine konstante Frequenz von 1,59 Hz. Der Temperaturbereich reicht von -4°C bis +40°C.

In Abbildung 23 ist der komplexe Schubmodul $|G^*|$ in Abhängigkeit von der Temperatur graphisch dargestellt. Der Schubmodul $|G^*|$ sinkt bei allen Bitumenproben mit Erhöhung der Temperatur. Das 50/70 Bitumen hat bei -4°C den höchsten und bei 40°C niedrigsten Schubmodul aller Bitumenproben. Das RmB hat bei -4°C einen niedrigeren $|G^*|$ als das 50/70, bei etwa 20°C ist $|G^*|$ bei beiden Proben gleich groß und mit zunehmender Temperatur bis 40°C ist der $|G^*|$ des RmBs höher. Im Vergleich zwischen RmB und PmB weist das PmB von -4°C bis etwa 20°C einen geringeren und von etwa 20°C bis 40°C einen höheren Schubmodul als das RmB auf.

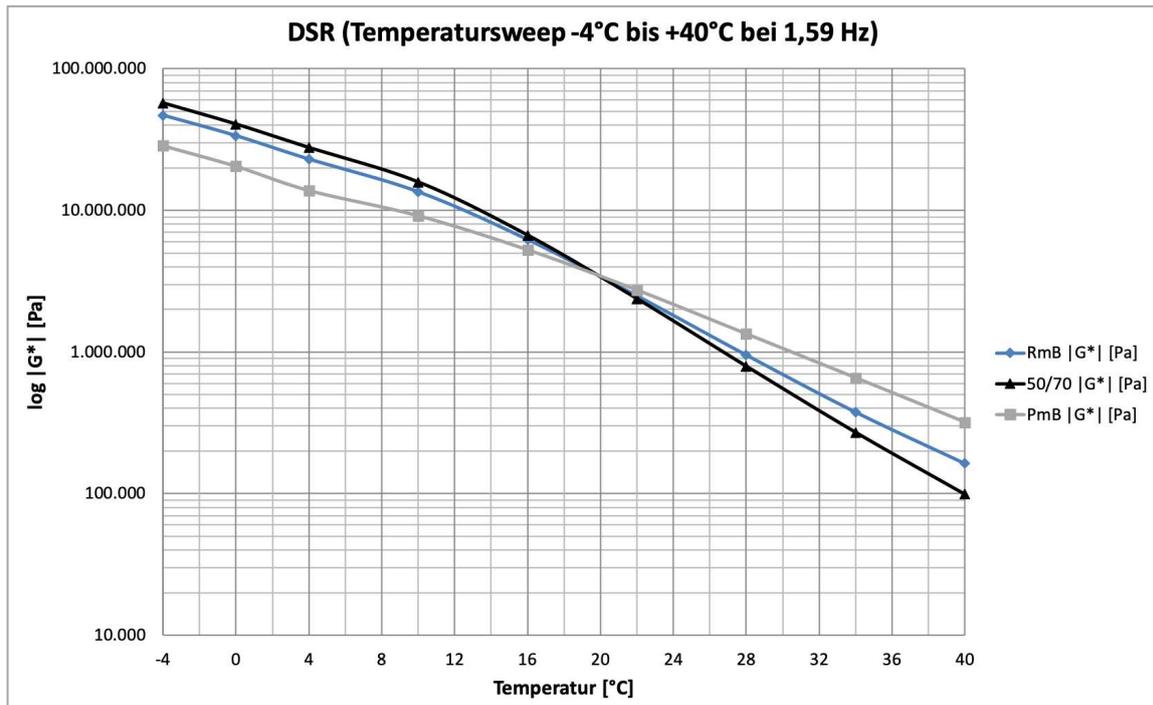


Abbildung 23: Komplexer Schubmodul der untersuchten Bitumenproben (DSR -4°C/+40°C)

In Abbildung 24 ist der Phasenverschiebungswinkel δ in Abhängigkeit von der Temperatur graphisch dargestellt. Das 50/70 hat über den gesamten Temperaturbereich den größten Phasenverschiebungswinkel, es weist bei -4°C ein δ von 34,2° auf und steigt mit zunehmender Temperatur stetig bis auf einen Winkel von 77,3° bei 40°C an. Das RmB hingegen hat bei -4°C einen Winkel δ von 30,9°, dieser wird bei höherer Temperatur nicht so groß wie der des 50/70. Bei 40°C ist δ beim RmB 61° groß und weist damit ein geringeres viskoses Verhalten als das 50/70 auf. Das PmB besitzt bei -4°C einen Winkel δ von 33,5° und hat bis etwa 8°C einen größeren Phasenverschiebungswinkel als das RmB. Bei Temperaturen über 8°C hat das PmB einen geringeren Phasenverschiebungswinkel als das RmB und bei 40°C hat der Winkel δ einen Wert von 57,5°.

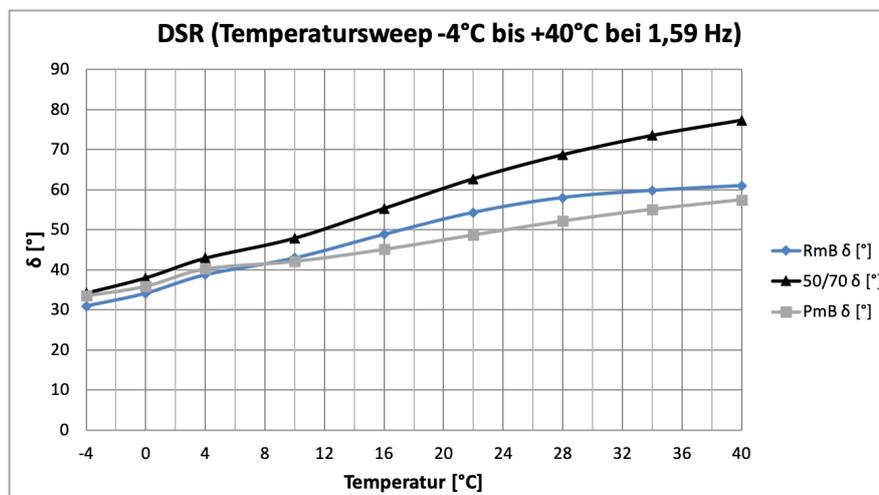


Abbildung 24: Phasenverschiebungswinkel der untersuchten Bitumenproben (DSR -4°C/+40°C)

DSR +40°C/+82°C

Bei dieser DSR-Prüfung wird eine Platte mit einem Durchmesser von 25 mm verwendet, der Plattenabstand beträgt 1 mm und die Schwingungen haben eine konstante Frequenz von 1,59 Hz. Der Temperaturbereich reicht von +40°C bis +82°C.

In Abbildung 25 ist der komplexe Schubmodul $|G^*|$ in Abhängigkeit von der Temperatur graphisch dargestellt. Der Schubmodul $|G^*|$ sinkt bei allen Bitumenproben mit Erhöhung der Temperatur. Das 50/70 weist im gesamten Temperaturbereich den niedrigsten Schubmodul auf. Die Differenz des Schubmoduls zwischen dem RmB und 50/70 wird mit zunehmender Temperatur stetig größer. Beim Vergleich zwischen dem RmB und dem PmB erkennt man, dass das PmB über den gesamten Temperaturbereich einen größeren Schubmodul aufweist und die Verläufe der beiden Kurven des Schubmoduls annähernd gleich sind. Dies deutet auf ein günstigeres Verhalten des PmB hin, da bei niedrigen Temperaturen niedrige Steifigkeiten auch zu niedrigeren Spannungen führen und die Rissneigung dadurch geringer ist. Bei hohen Temperaturen sind höhere Steifigkeiten zu bevorzugen, da so höhere Verformungswiderstände erreicht werden.

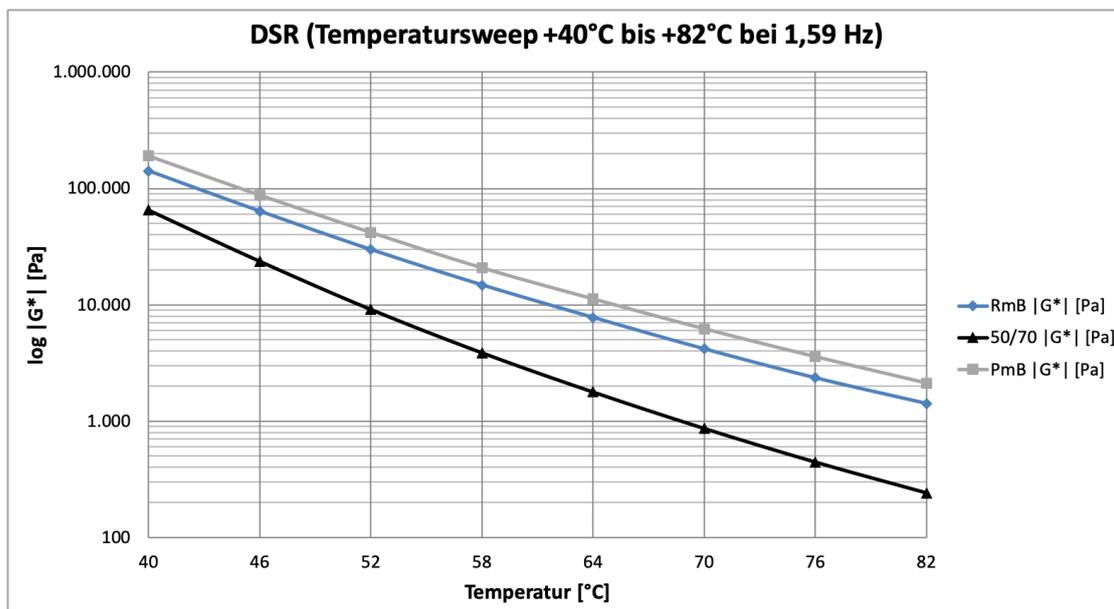


Abbildung 25: Komplexer Schubmodul der untersuchten Bitumenproben (DSR +40°C/+82°C)

In Abbildung 26 ist der Phasenverschiebungswinkel δ in Abhängigkeit von der Temperatur graphisch dargestellt. Das 50/70 Bitumen weist im gesamten Temperaturbereich überwiegend viskoses Verhalten auf und hat bei 82°C mit einem δ von 89,9° den größten Winkel aller Bitumenproben. Das RmB hingegen hat im gesamten Temperaturbereich deutlich kleinere δ als das 50/70. δ steigt beim RmB im Temperaturbereich von 40°C bis 76°C an, hat jedoch bei 82°C ($\delta=72,6^\circ$) einen niedrigeren Wert als bei 76°C ($\delta=74,1^\circ$). Das PmB hat im Vergleich zum RmB im gesamten Temperaturbereich einen kleineren Phasenverschiebungswinkel, dieser steigt stetig mit zunehmender Temperatur an.

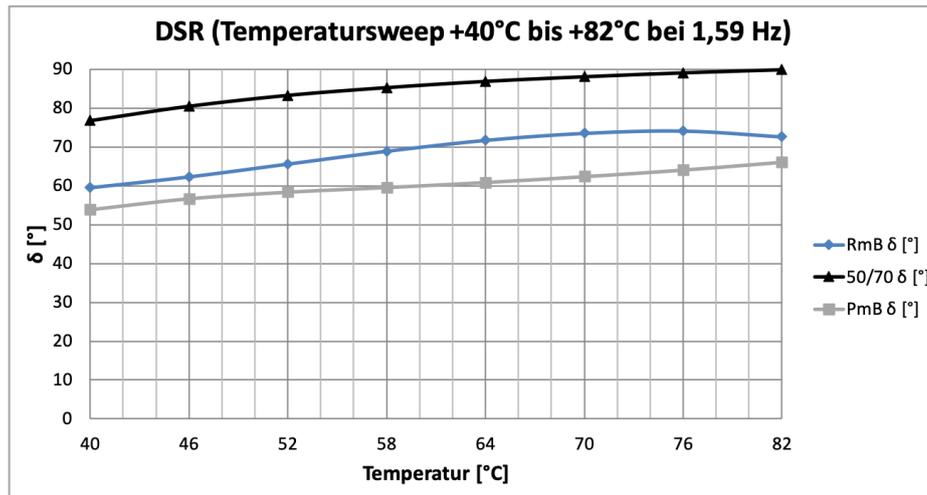


Abbildung 26: Phasenverschiebungswinkel der untersuchten Bitumenproben (DSR +40°C/+82°C)

Für die Berechnung des upper PG nach SUPERPAVE wurde zusätzlich RTFOT-gealtertes Bitumen des 50/70 Bitumen geprüft. Den upper PG (min(T)) erhält man durch Berechnung der Formel $|G^*|/\sin \delta$. Die Temperatur, bei der der Wert für ungealtertes Bitumen noch $\geq 1,0$ kPa (für RTFOT-gealtertes Bitumen $\geq 2,2$ kPa) ist, ist der upper PG. In Tabelle 13 ist der upper PG durch die Berechnung der angegebenen Formel für die jeweiligen Bitumen dargestellt und markiert. Somit erhält man für das RmB und PmB einen upper PG von 82°C und für das 50/70 64°C.

Tabelle 13: Berechnung des upper PG nach SUPERPAVE für die ausgewählten Bitumenproben

Temperatur [°C]	$ G^* /\sin(\delta)$ [kPa]			
	RmB	50/70	50/70 RTFOT	PmB
40	163,7	67,2	108,0	235,4
46	71,9	24,1	39,0	104,9
52	32,7	9,2	14,8	49,1
58	15,9	3,9	6,3	24,1
64	8,2	1,8	2,8	12,8
70	4,4	0,9	1,3	7,0
76	2,4	0,4	0,7	4,0
82	1,5	0,2	0,3	2,3

4.1.5 Biegebalkenrheometer (BBR)

Die Messergebnisse aus der Prüfung mit dem Biegebalkenrheometer sind in Tabelle 14 angeführt. Der Verlauf der Steifigkeit (S) und m-Wert über die Temperatur sind in der Abbildung 27 und Abbildung 28 graphisch dargestellt.

Tabelle 14: BBR-Ergebnisse der untersuchten Bitumenproben

Bitumen	Temperatur [°C]	Steifigkeit [MPa]	m-Wert @ 60s [-]	1. Messung		2. Messung		3. Messung	
				S	m-Wert	S	m-Wert	S	m-Wert
RmB	-18	157	0,325	165	0,318	148	0,332	x	x
	-24	266	0,278	266	0,252	266	0,303	x	x
	-30	412	0,237	384	0,222	440	0,252	x	x
50/70	-18	178	0,378	174	0,388	182	0,368	x	x
	-24	334	0,294	315	0,275	354	0,312	x	x
	-30	479	0,277	497	0,283	462	0,270	x	x
50/70 PAV	-12	133	0,35	125	0,400	126	0,332	147	0,318
	-18	249	0,313	245	0,321	266	0,304	236	0,314
	-24	429	0,259	412	0,257	447	0,260	x	x
	-30	731	0,192	617	0,201	847	0,183	x	x
PmB	-12	62	0,419	57	0,413	68	0,415	62	0,430
	-18	113	0,363	116	0,364	105	0,355	118	0,370
	-24	219	0,314	242	0,315	209	0,306	205	0,321
	-30	360	0,244	420	0,251	330	0,235	330	0,245

Für die Bestimmung der Steifigkeit und des m-Werts wurde zusätzlich zu den drei allgemein untersuchten Bitumenproben noch das PAV-gealterte 50/70 Bitumen verwendet. Die Steifigkeit und der m-Wert wurden bei allen Bitumenproben bei einer Versuchsdauer von 60 Sekunden bestimmt.

Mit zunehmender Temperatur nimmt die Steifigkeit aller Bitumenproben ab. Das 50/70 Bitumen weist im Originalzustand eine geringere Steifigkeit als das PAV-gealterte 50/70 Bitumen auf. Das RmB hat bei allen Prüftemperaturen des BBR-Versuchs eine geringere Steifigkeit als das 50/70, bei der höchsten der beiden Proben gemessenen Temperatur von -18°C ist die Differenz jedoch am geringsten. Das PmB weist über den gesamten Temperaturbereich eine geringere Steifigkeit als das RmB auf, der Verlauf der beiden Kurven ist im untersuchten Bereich jedoch annähernd parallel.

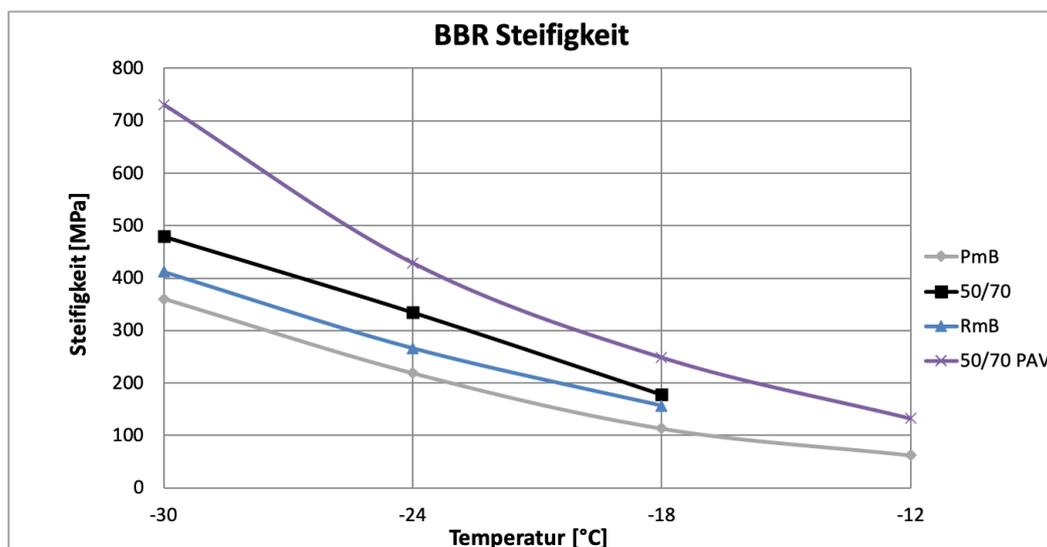


Abbildung 27: Steifigkeit der untersuchten Bitumenproben

Bei allen Bitumenproben steigt der m-Wert bei Temperaturzunahme. Das 50/70 hat im Originalzustand aufgrund seines höheren m-Werts ein größeres Relaxationsvermögen als das PAV-gealterte 50/70 Bitumen.

Das RmB hat im Vergleich zum 50/70 ein niedrigeres Relaxationsvermögen im untersuchten Temperaturbereich. Bei -30°C liegen die m-Werte des RmB (0,237) und des PmB (0,244) sehr nahe beieinander, jedoch nimmt der m-Wert des PmB im untersuchten Bereich bei Erhöhung der Temperatur stärker zu als der m-Wert des RmB. Das PmB weist im gesamten Untersuchungsbereich ein besseres Relaxationsvermögen als das RmB auf.

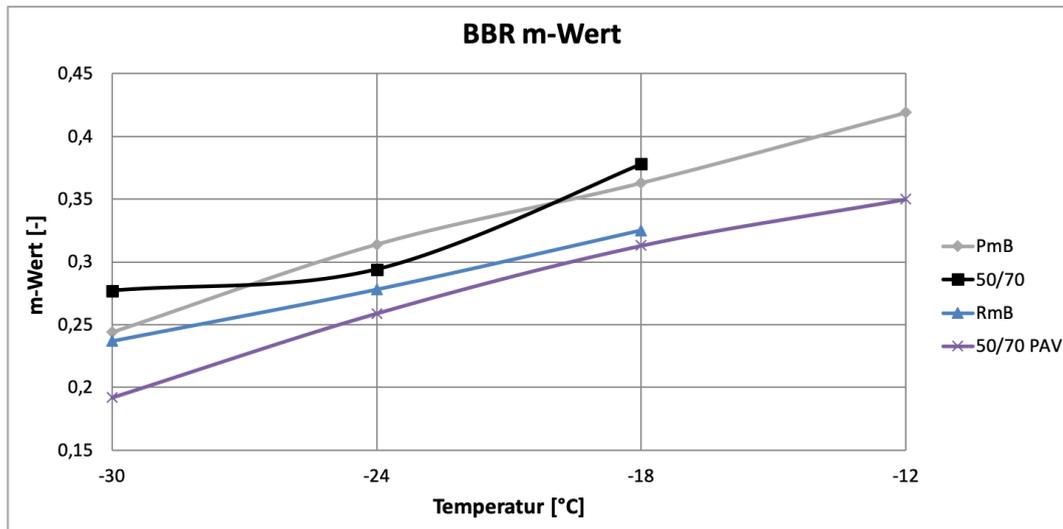


Abbildung 28: m-Wert der untersuchten Bitumenproben

Für die Berechnung des lower PG nach SUPERPAVE ist für das 50/70 die Temperatur ($\max(T)$) der PAV-gelalterten Bitumenprobe maßgebend, bei der die Steifigkeit ≤ 300 MPa und der m-Wert $\geq 0,3$ beträgt. Um den lower PG zu erhalten müssen von $\max(T)$ noch einmal 10°C abgezogen werden, somit erhält man für das 50/70 einen lower PG von -28°C .

4.1.6 Rotationsviskosimeter (RV)

Die Messergebnisse aus der Prüfung mit dem Rotationsviskosimeter sind in Tabelle 15 angeführt. Die gerundeten Messwerte sind graphisch in Abbildung 29 dargestellt.

Tabelle 15: Rotationsviskosimeter-Ergebnisse der untersuchten Bitumenproben

Temperatur [°C]	Dynamische Viskosität [mPa.s]		
	RmB	50/70	PmB
120	9.233	1.017	5.717
125	5.508	762	4.096
130	4.296	582	2.979
135	3.338	450	2.200
150	1.767	227	979
165	1.058	128	529
180	708	80	325

Die Versuche werden für das PmB und 50/70 mit einer Spindel des Typs SC4-21 (große Spindel) und für das RmB mit einer Spindel des Typs SC4-27 (kleine Spindel) bei konstanter Drehgeschwindigkeit von 20 U/min durchgeführt.

Die Viskosität ist bei allen Bitumenproben stark temperaturabhängig und sinkt bei Erhöhung der Temperatur. Das 50/70 Bitumen hat eine Viskosität von 1.017 mPa.s bei 120°C und sinkt auf 80 mPa.s bei 180°C. Die Gummimodifizierung führt zu einer Erhöhung der Viskosität im Vergleich zum Ausgangsbitumen. Das RmB weist eine Viskosität von 9.233 mPa.s bei 120°C und 708 mPa.s bei 180°C auf, das entspricht einer Zunahme der Viskosität von rund 900%. Das PmB weist im gesamten Temperaturbereich eine geringere Viskosität als das RmB auf.

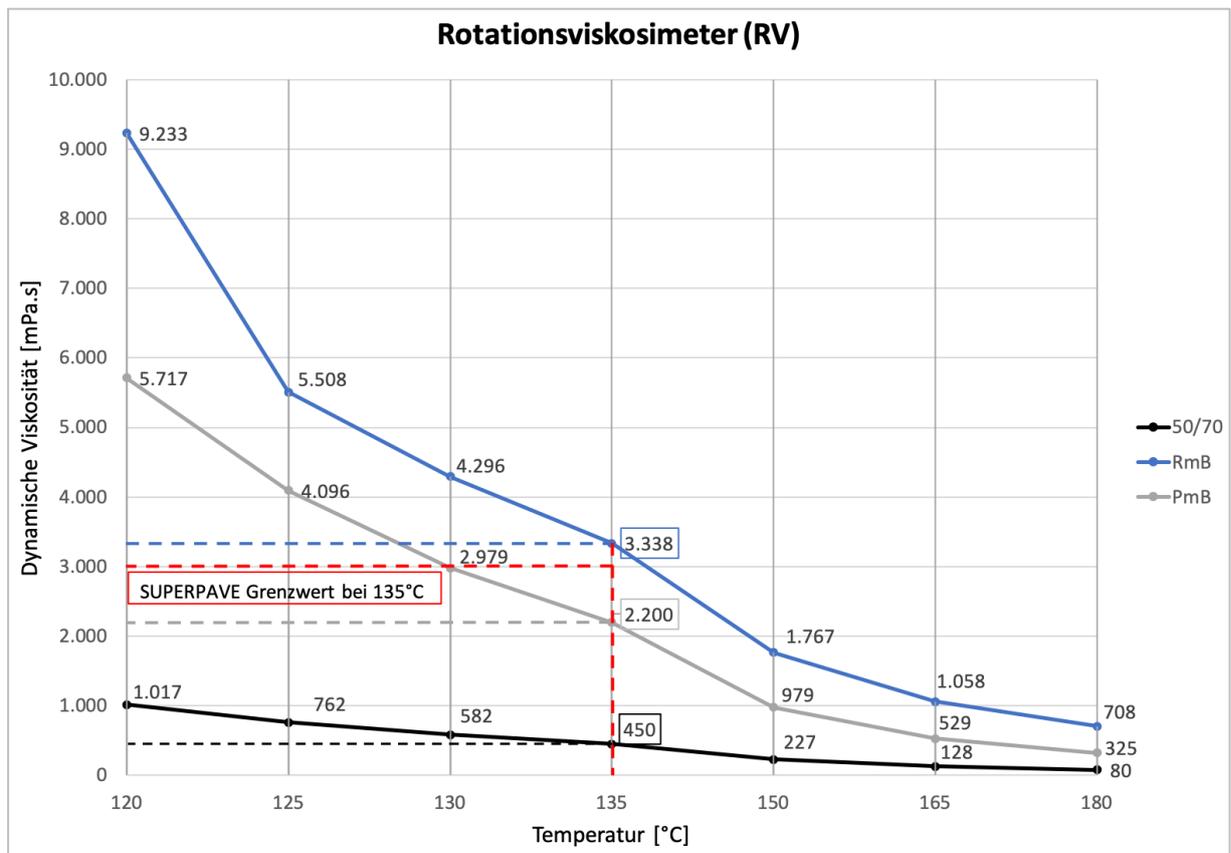


Abbildung 29: Temperatur-Viskositätskurven der untersuchten Bitumenproben

Für die Klassifizierung nach SUPERPAVE muss das ungealterte Bitumen bei einer Prüftemperatur von 135°C einen Wert ≤ 3.000 mPa.s aufweisen. Das trifft für das 50/70 und das PmB zu, für das RmB ist der Wert mit 3.338 mPa.s über dem geforderten Grenzwert.

4.1.7 Klassifizierung nach SUPERPAVE

Durch die gebrauchsvorhaltensorientierten Bitumenprüfungen ergeben sich für die untersuchten Bitumenproben folgende Werte nach SUPERPAVE (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: PG-Werte nach SUPERPAVE für die untersuchten Bitumenproben

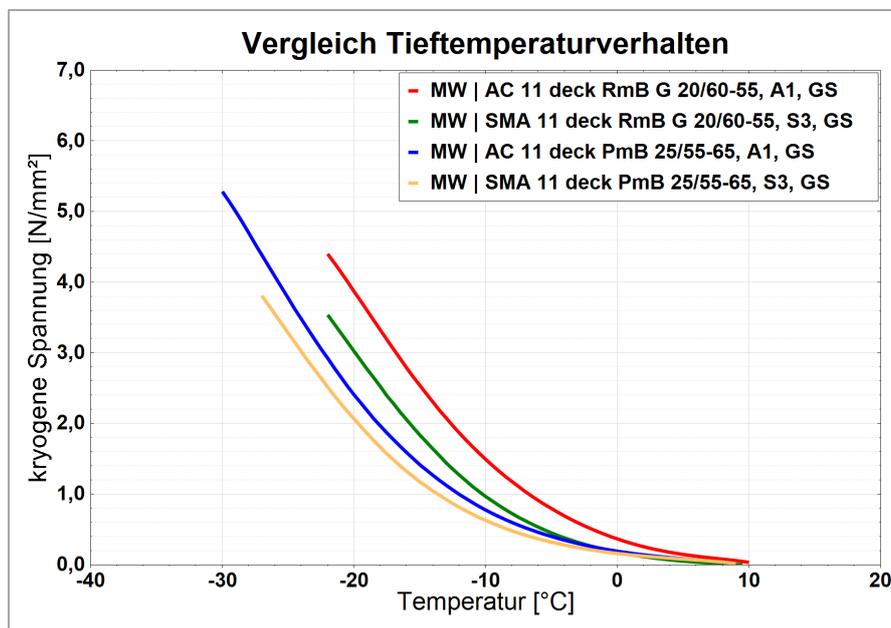
Bitumen	Upper PG [°C]	Lower PG [°C]	PG
RmB	82	x	x
50/70	64	-28	64-28
PmB	82	x	x

Da der lower PG für das RmB und PmB nicht berechnet wurde, wird nur der upper PG der beiden ungealterten Bitumenproben angegeben. Das RmB überschreitet jedoch den Grenzwert der dynamischen Viskosität bei 135°C und erfüllt somit nicht die Anforderung nach SUPERPAVE. Für das 50/70 ergibt sich aus den durchgeführten Bitumenprüfungen der PG 64-28.

4.2 Ergebnisse der Asphaltprüfungen

4.2.1 Abkühlprüfung (TSRST)

Die Messergebnisse aus der Abkühlprüfung sind in der Abbildung 30 und Abbildung 31 graphisch dargestellt. Die detaillierten Messergebnisse der geprüften Probekörper befinden sich im Anhang. Für den Vergleich der beiden SMA 11 Mischgüter wurden RmB und PmB Probekörper mit ähnlichem Hohlraumgehalt ausgewählt.

**Abbildung 30:** TSRST-Abkühlkurven der geprüften Mischgüter

Die in Abbildung 30 dargestellten Kurven beschreiben die kryogenen Spannungen der einzelnen Mischgüter beim Abkühlversuch. Die mit dem RmB modifizierten Asphaltmischgüter weisen von der Versuchstarttemperatur an eine höhere kryogene Spannung auf, als die mit dem PmB modifizierten Asphaltmischgüter. Die $TSRST_{max}$ beträgt bei beiden RmB modifizierten Asphaltmischgütern $-22,5^{\circ}C$ und ist damit deutlich höher (ungünstiger) als die der PmB modifizierten Mischgüter. Der AC 11 RmB hat beim Ausfall eine Bruchspannung von $4,5 N/mm^2$, der AC 11 PmB $5,6 N/mm^2$. Bei den SMA 11 Mischgütern ist der

Unterschied der Bruchspannung geringer als bei den AC 11 Mischgütern, jedoch ist die Spannung des PmB Mischguts ($4,1 \text{ N/mm}^2$) höher als die des RmB modifizierten Mischguts ($3,7 \text{ N/mm}^2$). Im Tieftemperaturverhalten zeigen die RmB Mischgüter eine geringere Rissbeständigkeit als die PmB Mischgüter.

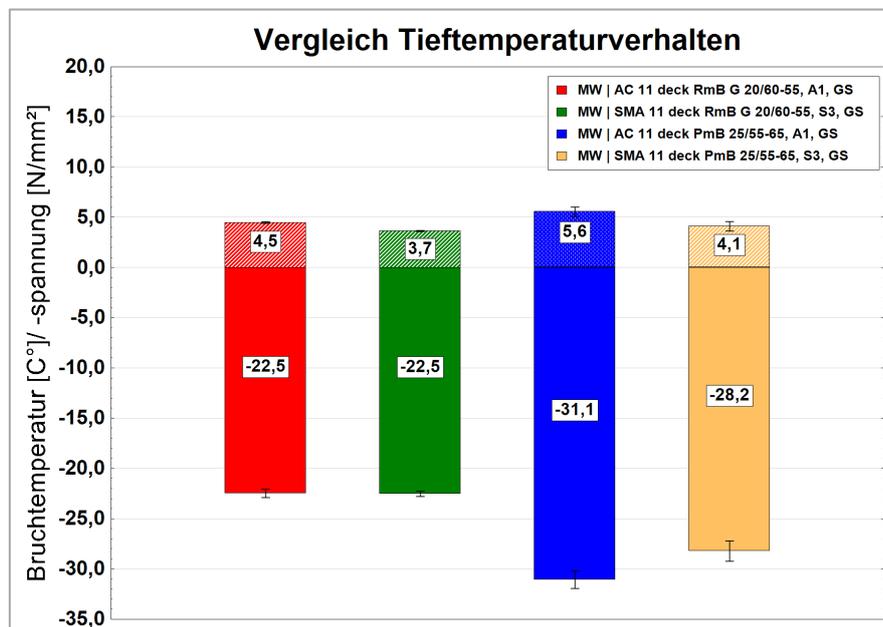


Abbildung 31: TSRST-Ergebnisse der geprüften Mischgüter im direkten Vergleich

Da dieses Prüfgerät ein sehr leistungsstarkes Prüfmaschinenaggregat besitzt, werden die Ergebnisse um $2,5^\circ\text{C}$ nach unten korrigiert, um mit dem aktuellen Bewertungshintergrund in Österreich vergleichbar zu sein. Die korrigierten und gerundeten Bruchtemperaturen sind in Tabelle 17 angegeben und laut EN 13108-1 eingestuft.

Tabelle 17: TSRST-Ergebnisse

Mischgut	Mittlere, korrigierte Bruchtemperatur [°C]	Einstufung lt. EN 13108-1
AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS	-25,0	TSRST _{max-25,0}
SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS	-25,0	TSRST _{max-25,0}
AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS	-33,6	TSRST _{max-30,0}
SMA 11 deck PmB 25/55-65, S3, GS	-30,7	TSRST _{max-30,0}

4.2.2 Zyklisch triaxiale Druckschwellprüfung (TCCT)

Die Messergebnisse aus der zyklisch triaxialen Druckschwellprüfung sind in der Abbildung 32 und Abbildung 33 graphisch dargestellt. Die detaillierten Messergebnisse der geprüften Probekörper befinden sich im Anhang. Für diesen Versuch wurden die Probekörper des AC 11 RmB mit dem 50/70 (B005A) Bitumen modifiziert und geprüft.

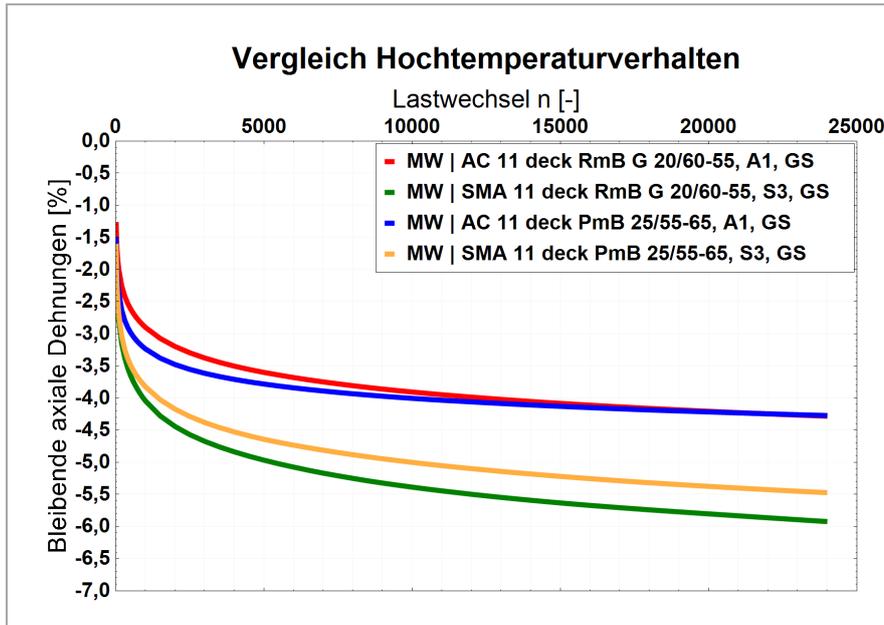


Abbildung 32: TCCT-Kriechkurven der geprüften Mischgüter

Die in Abbildung 32 dargestellten Kriechkurven beschreiben die bleibenden axialen Stauchungen der Mischgüter in Abhängigkeit der Anzahl der Lastwechsel n . Die bleibenden Verformungen sind bei den beiden AC 11 Mischgütern deutlich geringer als die der SMA 11 Mischgüter und haben nach 25.000 Lastwechseln etwa gleich große bleibende Verformungen. Bei den beiden SMA 11 hingegen weist das RmB Mischgut eine größere bleibende axiale Dehnung auf als das PmB Mischgut.

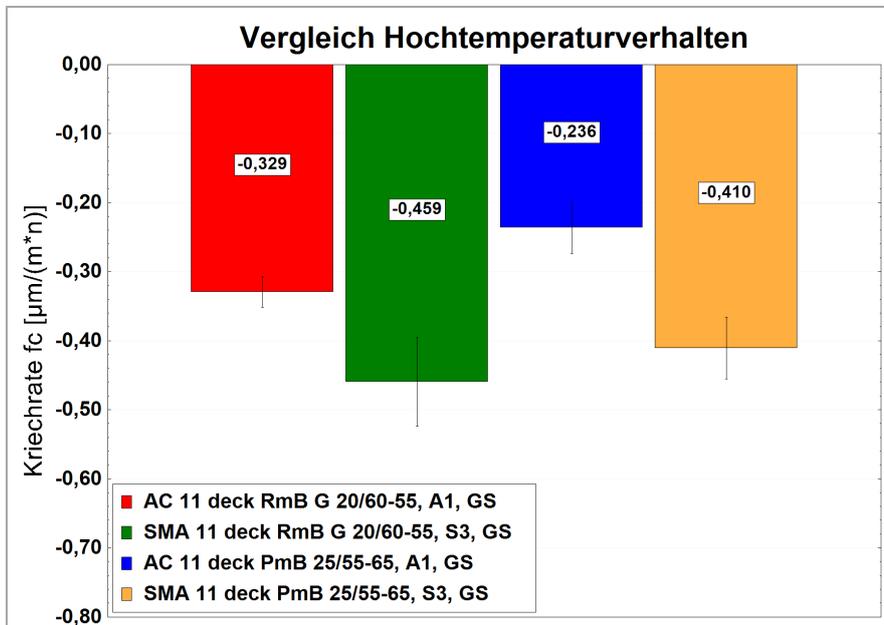


Abbildung 33: TCCT-Ergebnisse der geprüften Mischgüter im direkten Vergleich

Die Kriechrate f_c der RmB Mischgüter ist im Vergleich zu den PmB Mischgütern höher, das bedeutet, dass die Beständigkeit der RmB Mischgüter gegen bleibende Verformungen im Hochtemperaturbereich geringer ist.

Die mittleren Kriechraten sind in Tabelle 18 angegeben und laut EN 13108-1 eingestuft.

Tabelle 18: TCCT-Ergebnisse

Mischgut	Mittlere Kriechrate f_c [$\mu\text{m/n}$]	Einstufung lt. EN 13108-1
AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS	-0,3	$f_{cmax 0,4}$
SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS	-0,5	$f_{cmax 0,6}$
AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS	-0,2	$f_{cmax 0,2}$
SMA 11 deck PmB 25/55-65, S3, GS	-0,4	$f_{cmax 0,4}$

4.2.3 Steifigkeitsverhalten - 4-Punkt-Biegebalken (4-PBB)

Die Messergebnisse aus der Steifigkeitsprüfung am 4-PBB sind in der Abbildung 34 und Abbildung 35 graphisch dargestellt. Die detaillierten Messergebnisse der geprüften Probekörper befinden sich im Anhang.

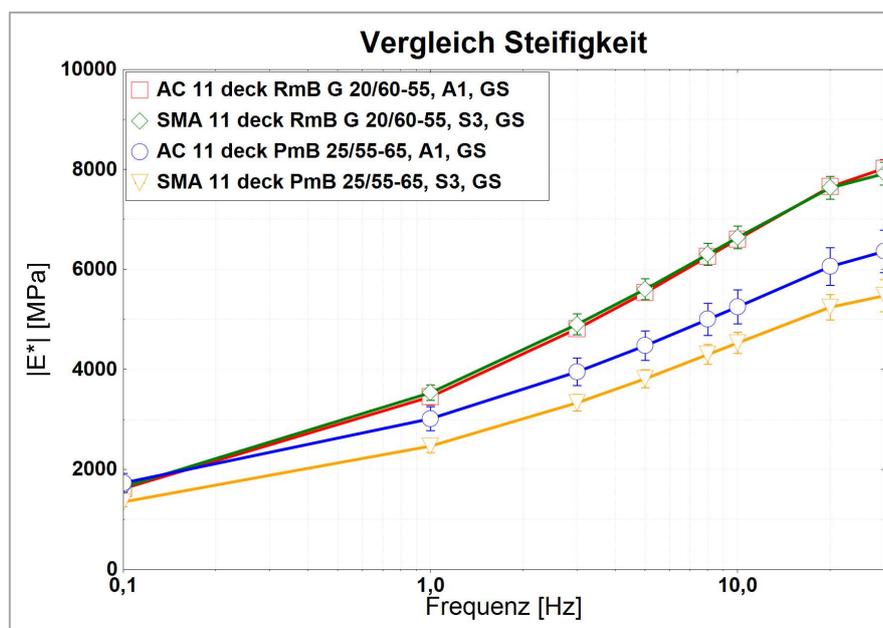


Abbildung 34: 4-PBB dynamische Steifigkeit in Abhängigkeit der Frequenz

Die in Abbildung 34 dargestellten dynamischen Steifigkeitskurven der einzelnen Mischgüter zeigen, dass die dynamische Steifigkeit mit steigender Frequenz aller Mischgüter zunimmt und dass die RmB Mischgüter ein steiferes Verhalten aufweisen als die PmB Mischgüter. Dabei zeigen die beiden RmB Mischgüter über den gesamten Frequenzbereich ein recht ähnliches Verhalten und haben eine nahezu identische dynamische Steifigkeit. Bei den PmB Mischgütern zeigt der AC 11 über den gesamten Frequenzbereich ein steiferes Verhalten als der SMA 11.

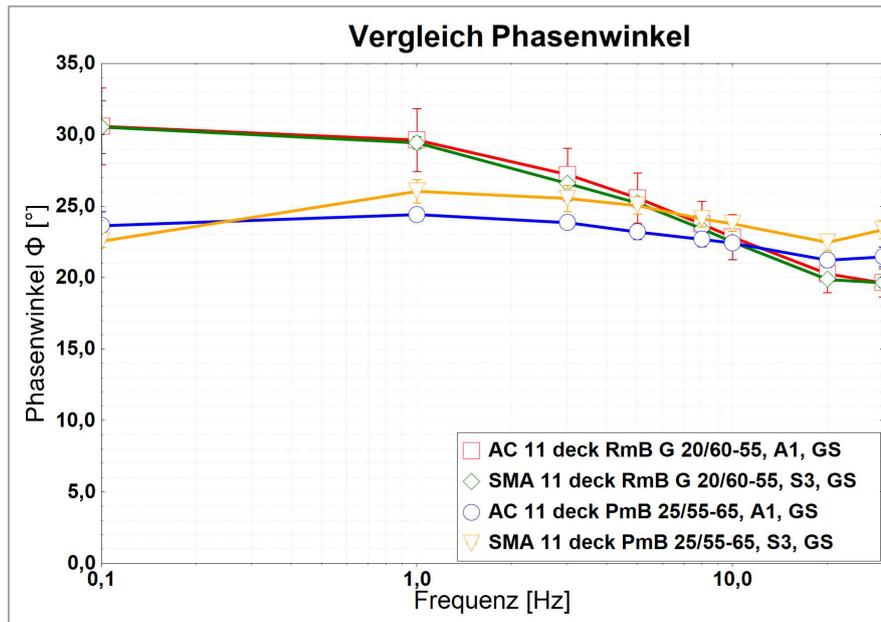


Abbildung 35: 4-PBB Phasenwinkel in Abhängigkeit der Frequenz

In Abbildung 35 ist der Phasenwinkel der einzelnen Mischgüter über die Frequenz dargestellt. Die RmB Mischgüter verhalten sich über den gesamten Frequenzbereich sehr ähnlich und weisen im Vergleich zu den PmB Mischgütern im hohen Frequenzbereich einen niedrigeren Phasenwinkel, also elastischeres Verhalten, auf. Im niederen Frequenzbereich zeigen die PmB Mischgüter elastischeres Verhalten als die RmB Mischgüter. Bei den PmB Mischgütern weist der AC 11 im Gegensatz zum SMA 11 im höheren Frequenzbereich elastischeres Verhalten auf.

Die dynamischen Moduli bei 20°C und 8 Hz sind in Tabelle 19 angegeben und laut EN 13108-1 eingestuft.

Tabelle 19: 4-PBB Steifigkeit-Ergebnisse

Mischgut	Dynamischer Modul bei 20°C und 8 Hz [MPa]	Einstufung lt. EN 13108-1
AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS	6263	S_{\min} 5500
SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS	6307	S_{\min} 5500
AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS	5005	S_{\min} 4500
SMA 11 deck PmB 25/55-65, S3, GS	4304	S_{\min} 3600

4.2.4 Klassifizierung nach ÖNORM

Die Klassifizierung nach ÖNORM B 3580-2 (AC deck) und ÖNORM B 3584-2 (SMA deck) ergibt sich aus den Ergebnissen der GVO-Prüfungen an den Deckschichtmischgütern:

- AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS Kategorie R4
- AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS Kategorie R1
- SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS Kategorie R4
- SMA 11 deck PmB 25/55-65, S3, GS Kategorie R1

4.3 Vergleich des RmB- und 50/70-Bitumens

Aufgrund der durchgeführten Bitumenprüfungen wird ersichtlich, dass sich das RmB deutlich vom 50/70 unterscheidet. Das RmB ist härter, weist einen höheren Erweichungspunkt als das 50/70 auf und die Viskosität des RmB ist deutlich höher. Aufgrund der DSR-Prüfung im hohen Temperaturbereich wird ersichtlich, dass das RmB einen höheren Schubmodul aufweist, der Phasenwinkel kleiner ist und somit ein elastischeres Materialverhalten zeigt. Das RmB hat im Tieftemperaturbereich eine geringere Steifigkeit und ein schlechteres Relaxationsverhalten als das 50/70.

Durch die vorgenommene Gummimodifizierung weist das RmB-Bitumen im Hochtemperaturbereich eine Verbesserung der Verformungsresistenz auf. Durch die Verringerung der Steifigkeit im Tieftemperaturbereich wird das Tieftemperaturverhalten in dieser Hinsicht verbessert, zeigt jedoch aufgrund der geringeren Relaxationsfähigkeit eine schlechtere Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse. Die Verarbeitbarkeit (Mischen, Pumpen, Einbau) verschlechtert sich durch seine hohe Zähigkeit deutlich.

4.4 Vergleich des RmB- und PmB-Bitumens

Der Vergleich der beiden modifizierten Mischgüter erfolgt aufgrund der durchgeführten Bitumenprüfungen. Das PmB ist aufgrund seines geringeren Penetrationswerts und höheren Erweichungspunkts härter als das RmB, aufgrund der Prüfung der elastischen Rückstellung zeigt das PmB ein elastischeres Materialverhalten. Aufgrund der DSR-Messung ist der Schubmodul des PmB höher und der Phasenverschiebungswinkel geringer und zeigt somit elastischeres Materialverhalten im Hochtemperaturbereich. Durch die BBR Messungen im Tieftemperaturbereich wird ersichtlich, dass das PmB eine geringere Steifigkeit und ein besseres Relaxationsverhalten aufweist. Die dynamische Viskosität des PmB ist geringer als die des RmB.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass PmB sowohl im Hochtemperaturbereich eine bessere Verformungsresistenz, als auch im Tieftemperaturbereich eine geringere Steifigkeit und höhere Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse, als das RmB hat. Aufgrund seiner niedrigeren Zähigkeit lässt sich das PmB einfacher verarbeiten.

4.5 Vergleich der RmB- und PmB-Asphaltemischgüter

Aus den Abkühlversuchen geht hervor, dass die mittlere Bruchtemperatur, welche als wesentliche Größe zur Charakterisierung des Tieftemperaturverhaltens angesehen wird, der PmB Mischgüter deutlich tiefer ist als die der RmB Mischgüter. Somit weisen die PmB Mischgüter ein besseres Tieftemperaturverhalten auf.

Aus der zyklisch triaxialen Druckschwellprüfung ist erkennbar, dass die bleibenden Verformungen der PmB und RmB AC 11 Mischgüter nach 25.000 Lastwechseln fast gleich groß sind, jedoch die Kriechrate dieser PmB Mischgüter geringer ist und somit eine höhere Beständigkeit gegen verbleibende Verformungen aufweisen. Bei den beiden SMA 11 Mischgütern ist die bleibende Verformung nach 25.000 Lastwechseln und die Kriechrate des RmB Mischguts größer. Die PmB Mischgüter weisen somit eine bessere Verformungsstabilität im Hochtemperaturbereich auf.

Aus den Ergebnissen der Steifigkeitsprüfung am 4-PBB geht hervor, dass die RmB Mischgüter mit steigender Frequenz eine höhere Steifigkeit als die PmB Mischgüter aufweisen. Im niederen Frequenzbereich ist der Phasenwinkel der PmB Mischgüter niedriger, wodurch der elastische Anteil höher ist als der der RmB Mischgüter. Im höheren Frequenzbereich ab 10 Hz, ist jedoch der Phasenwinkel der RmB Mischgüter niedriger und der elastische Anteil höher. Die Steifigkeitseigenschaften der RmB Mischgüter im

Mitteltemperaturbereich, bei 20°C, sind besser als die der PmB Mischgüter. Im höheren Frequenzbereich zeigen die RmB Mischgüter elastischeres Verhalten.

Aufgrund der durchgeführten Bindemittel- und Asphaltprüfungen wird ersichtlich, dass die Eigenschaften des Bindemittels den Asphalt wesentlich beeinflussen und mit den Materialeigenschaften des Asphalts im direkten Zusammenhang stehen. Die Prüfungsergebnisse des BBR weisen dem PmB eine höhere Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse zu, das steht im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus der Abkühlprüfung: die PmB Mischgüter reißen bei tieferen Temperaturen als die RmB Mischgüter. Aus den Ergebnissen der DSR Prüfung bei 1,59 Hz wird dem PmB eine bessere Verformungsresistenz und elastischeres Materialverhalten zugeschrieben. Das entspricht den ermittelten Eigenschaften der PmB Mischgüter: eine bessere Verformungsstabilität (TCCT) und bei niederen Frequenzen elastischeres Materialverhalten (Steifigkeit am 4-PBB).

5 Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit umfasst einen Teilbereich von Untersuchungen zu Gummimodifiziertem Asphaltmischgut des Forschungsbereichs für Straßenwesen an der Technischen Universität Wien. Die Grundlagen und Regelwerke der Gummimodifizierung in Bindemitteln wurden in den ersten Kapiteln genauer erläutert, um ein besseres Verständnis für das Thema zu erlangen. Es wurde ein Versuchsprogramm mit diversen Bindemittel- und gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfungen durchgeführt. Durch die Bindemittelprüfungen wurde das Ausgangsbitumen und das im Nassverfahren hergestellte Gummimodifizierte Bitumen untersucht, um den Einfluss der Gummimodifizierung auf das Bindemittel festzustellen. Parallel dazu wurde ein Polymermodifiziertes Bitumen ebenfalls untersucht, um die beiden modifizierten Mischgüter miteinander zu vergleichen. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, veränderten sich die Materialeigenschaften des Ausgangsbitumens durch die Gummimodifizierung deutlich und weisen im Hochtemperaturverhalten verbesserte Eigenschaften auf. Das Polymermodifizierte Bitumen zeigt im gesamten Temperaturbereich bessere Gebrauchseigenschaften als das Gummimodifizierte Bitumen.

Das Prüfprogramm der gebrauchsverhaltensorientierten Asphaltprüfungen umfasste Tieftemperatur-, Hochtemperatur- und Steifigkeitsversuche für Asphaltbeton- und Splittmastixasphalt-Mischgüter, die in der Deckschicht eingesetzt werden. Die Mischgüter wurden mit Gummimodifizierten und Polymermodifizierten Bindemitteln hergestellt und miteinander verglichen. Die Asphaltmischgüter mit dem Polymermodifizierten Bindemittel wiesen im Tief- und Hochtemperaturbereich günstigere Gebrauchseigenschaften auf, die Mischgüter mit dem Gummimodifizierten Bindemittel ein besseres Steifigkeitsverhalten im Mitteltemperaturbereich.

Aus den Untersuchungsergebnissen ergibt sich kein Vorteil des Gummimodifizierten Bitumens gegenüber dem Polymermodifizierten. Da die Gebrauchseigenschaften des Gummimodifizierten Bindemittels stark von dem Anteil des beigemischten Gummigranulats abhängen, bietet es sich an weitere Untersuchungen mit unterschiedlichem Bindemittelgehalt durchzuführen und diese mittels Bindemittelprüfungen miteinander zu vergleichen. In Österreich liegen zurzeit noch keine alternativen Bindemittelsysteme für offenporige Asphalte vor, daher wäre die Untersuchung des Einflusses der Gummimodifizierung in diesem Mischgut eine weitere Alternative.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Destillation von Rohöl (6)	10
Abbildung 2: Mikrostruktur – vereinfachtes Strukturmodell von Bitumen (9)	11
Abbildung 3: Darstellung des schematischen Verlaufs der Bitumenalterung (9)	13
Abbildung 4: Vereinfachter Reaktionsablauf der Gummimodifikation (16)	16
Abbildung 5: Asphalt-Materialverhalten im Allgemeinen (9)	20
Abbildung 6: Grafische Darstellung der Sieblinie eines AC 11 (9)	21
Abbildung 7: Grafische Darstellung der Sieblinie eines SMA 8 (9)	22
Abbildung 8: Veranschaulichung des Mischvorgangs zur Herstellung des RmB	24
Abbildung 9: Skizzenhafte Darstellung der Nadelpenetration (9)	25
Abbildung 10: Skizzenhafte Darstellung des Versuchs mit Ring und Kugel (9)	25
Abbildung 11: Ansicht einer mit Bitumen gefüllten Gießform	26
Abbildung 12: Versuchsprinzip des Dynamischen Scherrheometers (9)	27
Abbildung 13: Versuchsprinzip des Biegebalkenrheometers (9)	28
Abbildung 14: Versuchsprinzip der Rotationsviskosimetrie (9)	29
Abbildung 15: Versuchsprinzip des RTFOT (9)	30
Abbildung 16: Versuchsprinzip des PAV (9)	31
Abbildung 17: Versuchsprinzip des TSRST (9)	34
Abbildung 18: Versuchsprinzip des 4-PBB (9)	35
Abbildung 19: Nadelpenetration der untersuchten Bitumenproben	36
Abbildung 20: Erweichungspunkt nach Ring und Kugel der untersuchten Bitumenproben	37
Abbildung 21: Versuchsdurchführung der Elastischen Rückstellung	38
Abbildung 22: Bitumenformen einen Tag nach der Versuchsdurchführung	39
Abbildung 23: Komplexer Schubmodul der untersuchten Bitumenproben (DSR $-4^{\circ}\text{C}/+40^{\circ}\text{C}$)	40
Abbildung 24: Phasenverschiebungswinkel der untersuchten Bitumenproben (DSR $-4^{\circ}\text{C}/+40^{\circ}\text{C}$)	40
Abbildung 25: Komplexer Schubmodul der untersuchten Bitumenproben (DSR $+40^{\circ}\text{C}/+82^{\circ}\text{C}$)	41
Abbildung 26: Phasenverschiebungswinkel der untersuchten Bitumenproben (DSR $+40^{\circ}\text{C}/+82^{\circ}\text{C}$)	42
Abbildung 27: Steifigkeit der untersuchten Bitumenproben	43
Abbildung 28: m-Wert der untersuchten Bitumenproben	44
Abbildung 29: Temperatur-Viskositätskurven der untersuchten Bitumenproben	45
Abbildung 30: TSRST-Abkühlkurven der geprüften Mischgüter	46
Abbildung 31: TSRST-Ergebnisse der geprüften Mischgüter im direkten Vergleich	47
Abbildung 32: TCCT-Kriechkurven der geprüften Mischgüter	48
Abbildung 33: TCCT-Ergebnisse der geprüften Mischgüter im direkten Vergleich	48
Abbildung 34: 4-PBB dynamische Steifigkeit in Abhängigkeit der Frequenz	49
Abbildung 35: 4-PBB Phasenwinkel in Abhängigkeit der Frequenz	50

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen nach ÖNORM EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel (8)	9
Tabelle 2: Hauptbestandteile von Bitumen (7) (9)	11
Tabelle 3: Begriffsbestimmungen nach TL RmB-StB By 10 (14)	18
Tabelle 4: Liste der verwendeten Bitumensorten	23
Tabelle 5: Mischgutzusammensetzung AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS	31
Tabelle 6: Mischgutzusammensetzung SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS	32
Tabelle 7: Mischgutzusammensetzung AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS	32
Tabelle 8: Mischgutzusammensetzung SMA 11 deck PmB 25/55-65, S3, GS	32
Tabelle 9: Auflistung der hergestellten Asphaltprobekörper	33
Tabelle 10: Nadelpenetration der untersuchten Bitumenproben	36
Tabelle 11: Erweichungspunkt nach Ring und Kugel der untersuchten Bitumenproben	37
Tabelle 12: Elastische Rückstellung der untersuchten Bitumenproben	38
Tabelle 13: Berechnung des upper PG nach SUPERPAVE für die ausgewählten Bitumenproben	42
Tabelle 14: BBR-Ergebnisse der untersuchten Bitumenproben	43
Tabelle 15: Rotationsviskosimeter-Ergebnisse der untersuchten Bitumenproben	44
Tabelle 16: PG-Werte nach SUPERPAVE für die untersuchten Bitumenproben	46
Tabelle 17: TSRST-Ergebnisse	47
Tabelle 18: TCCT-Ergebnisse	49
Tabelle 19: 4-PBB Steifigkeit-Ergebnisse	50

8 Literaturverzeichnis

1. **Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.** *Gesamtverkehrsplan für Österreich.* Wien : bmvit, 2012.
2. **Bukowski John, Harman Tom.** *The Use of Recycled Tire Rubber to Modify Asphalt Binder and Mixtures.* USA : Federal Highway Administration (FHWA), 2014.
3. **Kaden Sandra, Mittmann Peter.** *Erfahrungen beim Einbau von Gummimodifizierten Asphalt.* Bonn : Deutscher Asphaltverband e.V., 2/2012. Bd. asphalt Verbandszeitschrift.
4. **Kök Baha Vural, Colak Hakan.** *Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt.* s.l. : Elsevier Ltd., 2011. Bd. Construction and Building Materials 25.
5. **Radenberg Martin, Manke Ricarda.** *Ermittlung des Bindegehaltes von Asphalt mit gummiodifiziertem Bindemittel.* Bochum : Ruhr-Universität Bochum, November 2014.
6. **Blab Ronald, Eberhardsteiner Lukas.** *Strassenbau und Strassenerhaltung VO.* Wien : TU Wien, 2019.
7. **Vollenschaar, Dieter.** *Wendehorst Baustoffkunde.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011. ISBN 978-3-8351-0225-5.
8. **ÖNORM EN 12597.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie.* Wien : Austrian Standards, 2014.
9. **Hofko, Bernhard.** *Road Pavement Materials VO.* Wien : TU Wien, 2019.
10. **Hospodka, Markus.** *Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor.* Wien : BOKU, 2013. Diplomarbeit.
11. **Maschauer, Daniel.** *Viennese Aging Procedure - Parameterstudie mit Bitumen unterschiedlicher Herkunft.* Wien : TU Wien, 2017. Diplomarbeit.
12. **Schinkinger, Thomas.** *Gummiasphalt, Vortrag anlässlich des 30. GESTRATA-Bauseminars 2004.* Wien : GESTRATA Journal, 26. Jahrgang, Folge 105 (Juli), 2004.
13. **Maurer, Patricia.** *Wertstoff Altreifen.* Leoben : Montanuniversität Leoben, 2004. Diplomarbeit.
14. **TL RmB-StB By 10.** *Technische Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen.* s.l. : Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, 2010.
15. **E GmBA.** *Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten.* Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2012.
16. **Manke, Ricarda.** *Gummimodifizierung - Möglichkeiten und Grenzen.* Oldenburg : Deutscher Asphaltverband e.V., 25. März 2014.
17. **Wilhelm, Jan.** *Gummimodifizierter Asphalt - Wo stehen wir?* Hamburg : Deutscher Asphaltverband e.V. - Informationsveranstaltung, 2018.
18. **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.** FGSV. [Online] [Zitat vom: 25.. März 2020.] <https://www.fgsv.de/wissenstransfer/rw-systematik.html>.
19. **Dragon, Ines.** *Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf die Ermüdungsbeständigkeit von Verkehrsbefestigungen aus Asphalt.* Dresden : TU Dresden, 2015. Dissertation.
20. **CTS Bitumen GmbH.** CTS Bitumen. [Online] [Zitat vom: 26. März 2020.] <https://www.cts-bitumen.de/produkte/cts-grm>.
21. **J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH + Co KG.** JRS. [Online] [Zitat vom: 26. März 2020.] https://www.jrs.de/jrs_wAssets/docs/strassenbau/produktflyer/de/viatop-premium-produktflyer.pdf.
22. **Loja Betriebs GmbH.** Loja. [Online] [Zitat vom: 26. März 2020.] <http://www.loja.at/ueberuns.html>.
23. —. Loja. [Online] [Zitat vom: 26. März 2020.] http://www.loja.at/pdf/2020Leistungserklaerungen_29.pdf.

24. **DIN EN 1426.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration.* 2015.
25. **DIN EN 1427.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren.* 2015.
26. **DIN EN 13398.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifizierten Bitumen.* 2017.
27. **DIN EN 14770.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR).* 2012.
28. **DIN EN 14771.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Biegebiegesteifigkeit - Biegebalkenrheometer (BBR).* 2012.
29. **DIN EN 13302.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der dynamischen Viskosität von bitumenhaltigem Bindemittel mit einem Viskosimeter mit rotierender Spindel.* 2018.
30. **DIN EN 12607-1.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren.* 2014.
31. **DIN EN 14769.** *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV).* 2012.
32. **Hofko Bernhard, Hadler Bernhard.** *Untersuchungen zu Gummimodifiziertem Asphaltmischgut.* Wien : TU Wien, 2020.
33. **DIN EN 12697-46.** *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen.* 2012.
34. **DIN EN 12697-25.** *Asphalt - Prüfverfahren - Teil 25: Druck-Schwellversuch.* 2016.
35. **DIN EN 12697-26.** *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit.* 2012.
36. **ÖNORM B 3580-2.** *Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Asphaltbeton Teil 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen.* Wien : Austrian Standards, 2018.
37. **ÖNORM B 3584-2.** *Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Splittmastixasphalt Teil 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen.* Wien : Austrian Standards, 2018.

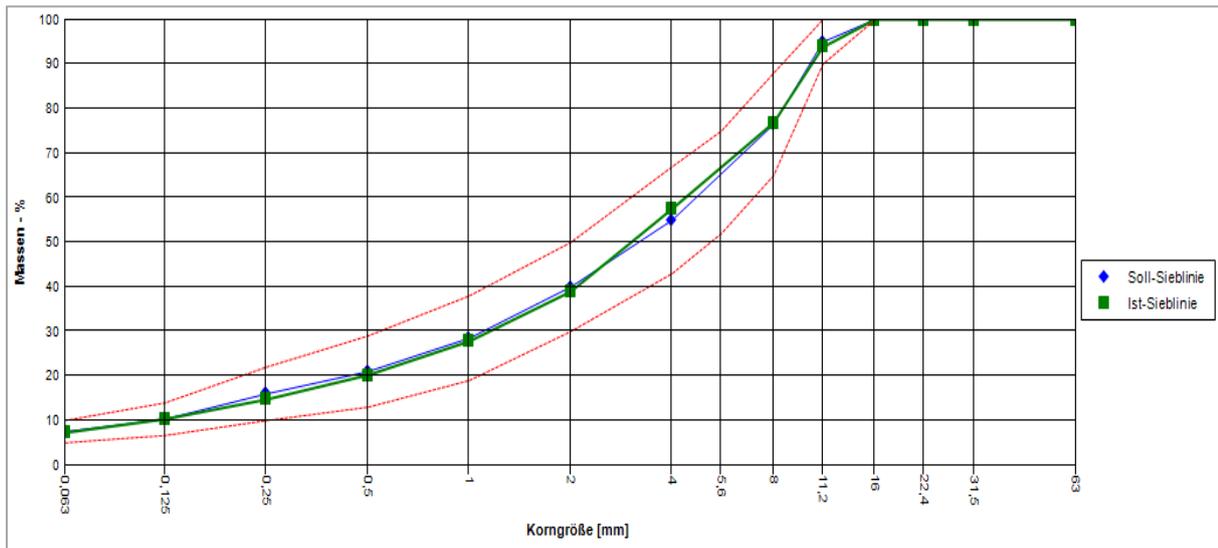
9 Anhang

Sieblinien:

Sieblinie des AC 11 deck RmB G 20/60-55, A1, GS:

Bindemittelgehalt: 5,6 M-%

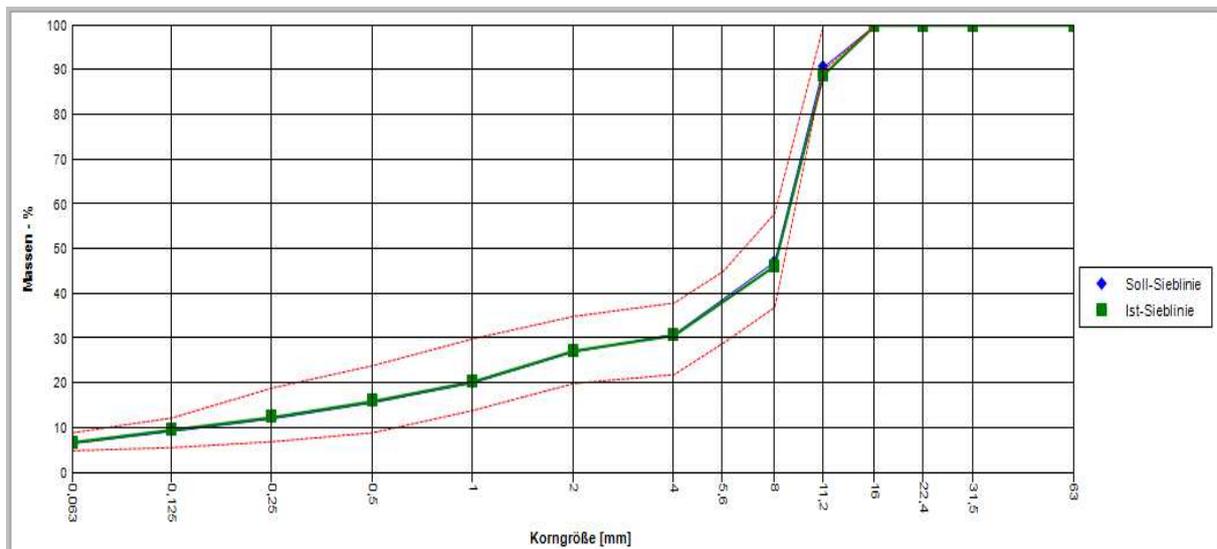
Korngröße [mm]	Ist-Sieblinie [M-%]
0,063	7,3
0,125	10,3
0,25	14,7
0,5	20,2
1	27,8
2	38,9
4	57,5
8	76,9
11,2	93,8
16	100
22,4	100
31,5	100
63	100



Sieblinie des SMA 11 deck RmB G 20/60-55, S3, GS:

Bindemittelgehalt: 5,9 M-%

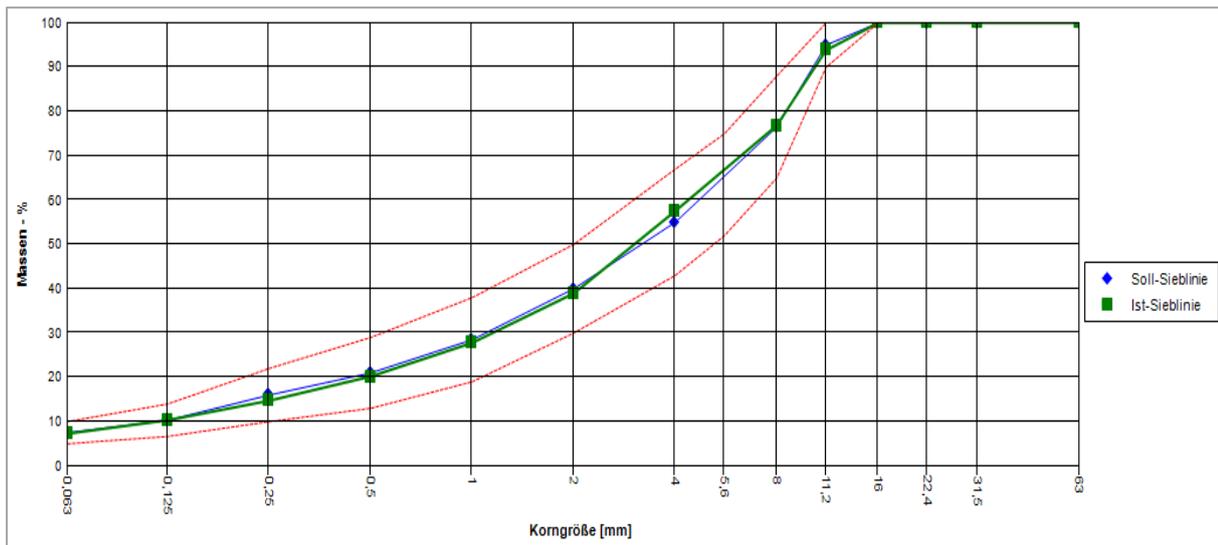
Korngröße [mm]	Ist-Sieblinie [M-%]
0,063	6,8
0,125	9,6
0,25	12,4
0,5	16
1	20,4
2	27,3
4	30,7
8	46,2
11,2	88,9
16	100
22,4	100
31,5	100
63	100



Sieblinie des AC 11 deck PmB 25/55-65, A1, GS:

Bindemittelgehalt 5,3 M-%

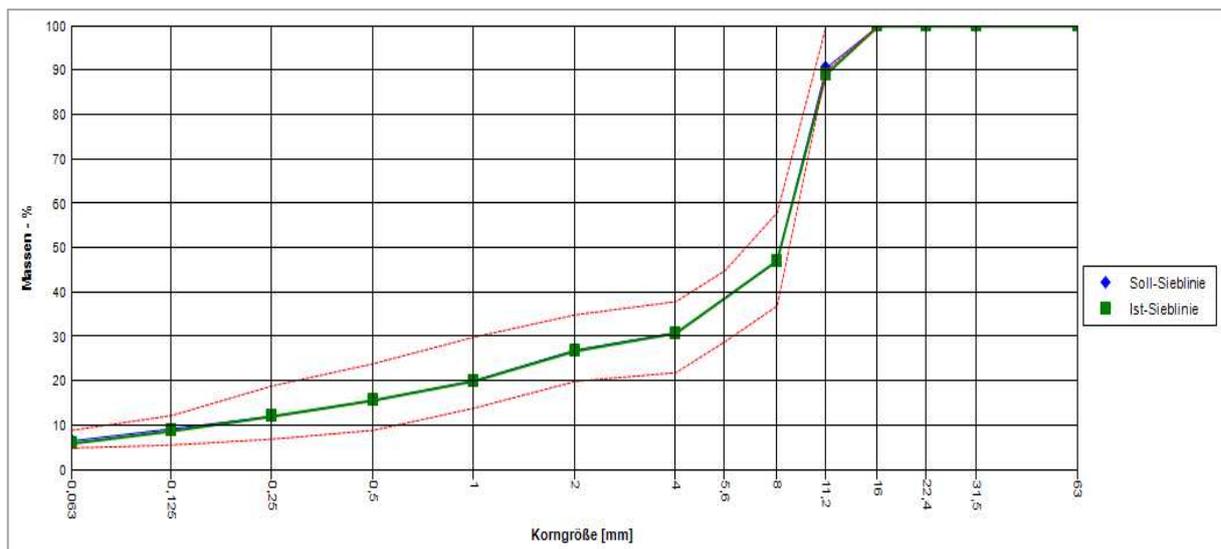
Korngröße [mm]	Ist-Sieblinie [M-%]
0,063	7,3
0,125	10,3
0,25	14,7
0,5	20,2
1	27,8
2	38,9
4	57,5
8	76,9
11,2	93,8
16	100
22,4	100
31,5	100
63	100



Sieblinie des SMA 11 deck PmB 25/65, S3, GS:

Bindemittelgehalt 5,6 M-%

Korngröße [mm]	Ist-Sieblinie [M-%]
0,063	6
0,125	8,8
0,25	12,1
0,5	15,7
1	20,1
2	26,8
4	30,9
8	47,2
11,2	89,2
16	100
22,4	100
31,5	100
63	100



Probekörper Kennwerte:

Probekörper K749

Prüfergebnisse																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Rohdichte des Mischgutes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rohdichte [Mg/m³]</td> <td>2,588</td> <td>Verfahren</td> <td colspan="4">A - Volumetrisches Verfahren</td> </tr> <tr> <td>Prüftemperatur [°C]</td> <td>25,0</td> <td>Prüfflüssigkeit</td> <td colspan="4">luftfrei gekochtes Wasser</td> </tr> </tbody> </table>							Rohdichte des Mischgutes				Rohdichte [Mg/m ³]	2,588	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren				Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Rohdichte des Mischgutes																								
Rohdichte [Mg/m ³]	2,588	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren																					
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser																					
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]																		
K749A	222,8	49,3	49,8	1318,1	2,431	6,1																		
K749B	222,9	49,0	50,4	1344,8	2,468	4,6																		
K749C	223,3	49,3	50,5	1367,4	2,484	4,0																		
K749D	223,2	49,3	50,5	1380,5	2,494	3,6																		
K749E	223,1	49,5	50,5	1379,1	2,496	3,6																		
K749F	223,0	49,7	50,3	1379,2	2,499	3,4																		
K749G	222,9	50,2	50,6	1401,3	2,498	3,5																		
K749H	222,8	50,1	50,5	1377,0	2,469	4,6																		

Probekörper K755

Prüfergebnisse																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Rohdichte des Mischgutes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rohdichte [Mg/m³]</td> <td>2,65</td> <td>Verfahren</td> <td colspan="4">A - Volumetrisches Verfahren</td> </tr> <tr> <td>Prüftemperatur [°C]</td> <td>25,0</td> <td>Prüfflüssigkeit</td> <td colspan="4">luftfrei gekochtes Wasser</td> </tr> </tbody> </table>							Rohdichte des Mischgutes				Rohdichte [Mg/m ³]	2,65	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren				Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Rohdichte des Mischgutes																								
Rohdichte [Mg/m ³]	2,65	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren																					
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser																					
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]																		
K755A	224,0	49,8	50,1	1366,9	2,484	6,3																		
K755B	224,3	49,6	50,0	1383,4	2,512	5,2																		
K755C	224,1	49,4	50,1	1381,4	2,511	5,2																		
K755D	224,0	49,8	50,1	1404,2	2,529	4,6																		
K755E	224,3	50,1	50,3	1409,3	2,520	4,9																		
K755F	223,8	50,1	49,7	1393,1	2,511	5,2																		
K755G	223,6	50,1	50,2	1397,3	2,491	6,0																		
K755H	223,5	49,9	50,1	1400,6	2,488	6,1																		

Probekörper K757

Prüfergebnisse																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Rohdichte des Mischgutes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rohdichte [Mg/m³]</td> <td>2,562</td> <td>Verfahren</td> <td>A - Volumetrisches Verfahren</td> </tr> <tr> <td>Prüftemperatur [°C]</td> <td>25,0</td> <td>Prüfflüssigkeit</td> <td>luftfrei gekochtes Wasser</td> </tr> </tbody> </table>							Rohdichte des Mischgutes				Rohdichte [Mg/m ³]	2,562	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren	Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser
Rohdichte des Mischgutes																		
Rohdichte [Mg/m ³]	2,562	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren															
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser															
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]												
K757A	225,3	51,2	48,7	1363,8	2,433	5,0												
K757B	225,6	51,1	48,6	1391,6	2,499	2,5												
K757C	225,3	51,3	49,4	1427,2	2,480	3,2												
K757D	225,6	51,4	49,4	1435,2	2,517	1,8												
K757E	225,3	51,1	49,6	1426,2	2,523	1,5												
K757F	225,2	51,2	49,6	1431,4	2,519	1,7												
K757G	224,9	51,1	49,7	1439,5	2,525	1,4												
K757H	224,7	51,0	50,1	1435,0	2,506	2,2												

Probekörper K758

Prüfergebnisse																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Rohdichte des Mischgutes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rohdichte [Mg/m³]</td> <td>2,592</td> <td>Verfahren</td> <td>A - Volumetrisches Verfahren</td> </tr> <tr> <td>Prüftemperatur [°C]</td> <td>25,0</td> <td>Prüfflüssigkeit</td> <td>luftfrei gekochtes Wasser</td> </tr> </tbody> </table>							Rohdichte des Mischgutes				Rohdichte [Mg/m ³]	2,592	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren	Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser
Rohdichte des Mischgutes																		
Rohdichte [Mg/m ³]	2,592	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren															
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser															
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]												
K758A	221,7	50,4	49,4	1301,6	2,420	6,6												
K758B	221,8	50,1	49,3	1326,7	2,463	5,0												
K758C	221,7	50,1	49,5	1352,7	2,493	3,8												
K758D	221,9	50,1	49,4	1360,7	2,497	3,7												
K758E	221,9	50,0	49,8	1365,1	2,509	3,2												
K758F	221,9	50,2	49,6	1382,5	2,522	2,7												
K758G	221,8	50,3	49,5	1378,8	2,515	3,0												
K758H	221,8	49,8	49,8	1368,6	2,511	3,1												

Probekörper T883

Prüfergebnisse					
Rohdichte des Mischgutes					
Rohdichte [Mg/m ³]	2,588	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren		
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser		
Probekörper	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke MW Verf. B+D [Mg/m ³]	Hohlraumgehalt [V%]
T883A	199,2	99,8	3816,2	2,456	5,1
T883B	198,4	99,7	3836,0	2,480	4,2
T883C	199,0	99,7	3817,7	2,463	4,8
T883D	198,1	99,7	3717,8	2,409	6,9

Probekörper T888

Prüfergebnisse					
Rohdichte des Mischgutes					
Rohdichte [Mg/m ³]	2,65	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren		
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser		
Probekörper	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraumgehalt [V%]
T888A	197,7	99,7	3764,1	2,455	7,4
T888B	199,6	99,8	3806,0	2,457	7,3
T888C	197,7	99,8	3818,5	2,478	6,5
T888D	198,6	99,8	3676,1	2,405	9,2

Probekörper T892

Prüfergebnisse					
Rohdichte des Mischgutes					
Rohdichte [Mg/m ³]	2,562	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren		
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser		
Probekörper	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Masse trocken [g]	Raumdichte Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraumgehalt [V%]
T892A	199,2	99,8	3876,1	2,486	3,0
T892B	198,7	99,7	3916,6	2,523	1,5
T892C	199,6	99,7	3923,6	2,516	1,8
T892D	199,2	99,7	3760,6	2,415	5,7

Probekörper T893

Prüfergebnisse					
Rohdichte des Mischgutes					
Rohdichte [Mg/m ³]	2,592	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren		
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser		
Probekörper	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Masse trocken [g]	Raumdichte Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraumgehalt [V%]
T893A	190,8	99,7	3518,2	2,374	8,4
T893B	197,4	99,7	3834,6	2,487	4,1
T893C	199,3	99,7	3820,7	2,453	5,4
T893D	199,3	99,7	3845,0	2,472	4,6

Probekörper E1144

Prüfresultate																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Rohdichte des Mischgutes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rohdichte [Mg/m³]</td> <td>2,596</td> <td>Verfahren</td> <td colspan="4">A - Volumetrisches Verfahren</td> </tr> <tr> <td>Prüftemperatur [°C]</td> <td>25,0</td> <td>Prüfflüssigkeit</td> <td colspan="4">luftfrei gekochtes Wasser</td> </tr> </tbody> </table>							Rohdichte des Mischgutes				Rohdichte [Mg/m ³]	2,596	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren				Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Rohdichte des Mischgutes																								
Rohdichte [Mg/m ³]	2,596	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren																					
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser																					
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraumgehalt [V%]																		
E1144A	500,0	60,2	60,0	4329,4	2,451	5,6																		
E1144B	500,0	59,6	59,0	4289,4	2,446	5,8																		
E1144C	500,0	59,8	59,4	4305,9	2,454	5,5																		

Probekörper E1149

Prüfresultate																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Rohdichte des Mischgutes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rohdichte [Mg/m³]</td> <td>2,65</td> <td>Verfahren</td> <td colspan="4">A - Volumetrisches Verfahren</td> </tr> <tr> <td>Prüftemperatur [°C]</td> <td>25,0</td> <td>Prüfflüssigkeit</td> <td colspan="4">luftfrei gekochtes Wasser</td> </tr> </tbody> </table>							Rohdichte des Mischgutes				Rohdichte [Mg/m ³]	2,65	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren				Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Rohdichte des Mischgutes																								
Rohdichte [Mg/m ³]	2,65	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren																					
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser																					
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraumgehalt [V%]																		
E1149A	500,0	60,2	60,7	4432,4	2,467	6,9																		
E1149B	500,0	60,1	60,7	4455,6	2,470	6,8																		
E1149C	500,0	60,5	60,8	4479,9	2,476	6,6																		

Probekörper E1154

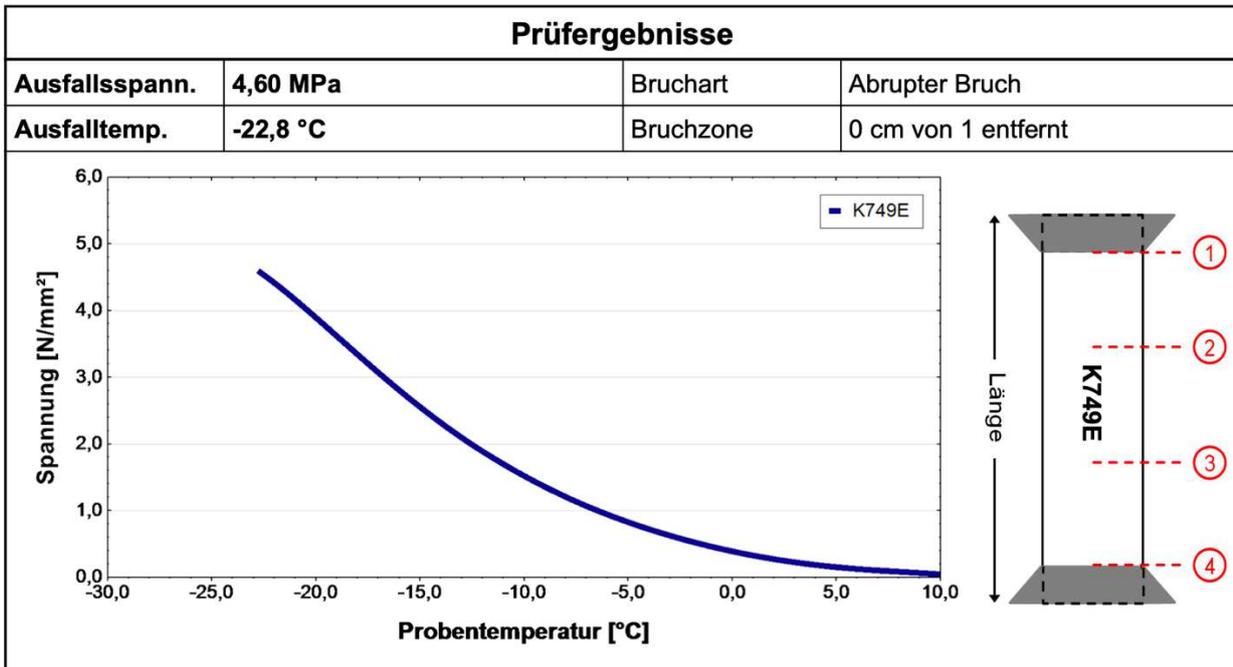
Prüfergebnisse						
Rohdichte des Mischgutes						
Rohdichte [Mg/m ³]	2,562	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren			
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1154A	500,0	59,7	60,0	4411,2	2,493	2,7
E1154B	500,0	59,7	59,5	4436,6	2,506	2,2
E1154C	500,0	59,8	59,4	4433,1	2,511	2,0

Probekörper E1155

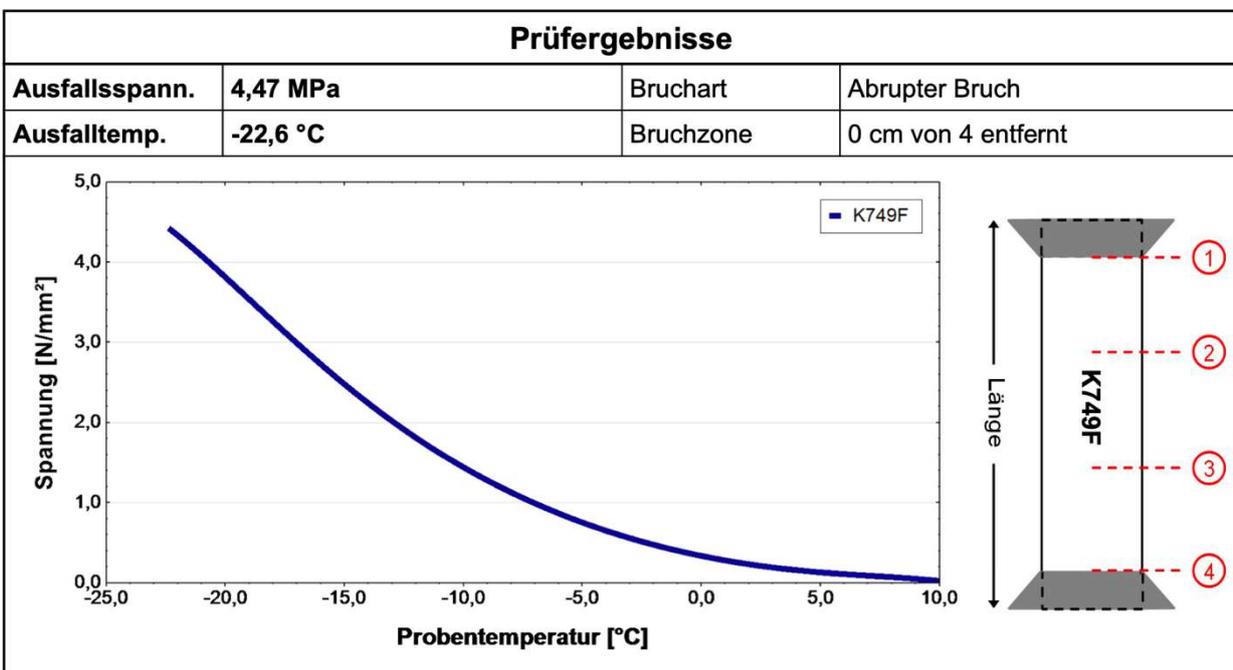
Prüfergebnisse						
Rohdichte des Mischgutes						
Rohdichte [Mg/m ³]	2,592	Verfahren	A - Volumetrisches Verfahren			
Prüftemperatur [°C]	25,0	Prüfflüssigkeit	luftfrei gekochtes Wasser			
Probekörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Masse trocken [g]	Raumdicke Verf. B [Mg/m ³]	Hohlraum- gehalt [V%]
E1155A	500,0	59,3	58,7	4252,2	2,491	3,9
E1155B	500,0	59,2	58,6	4253,5	2,493	3,8
E1155C	500,0	59,4	58,3	4262,6	2,495	3,7

TSRST-Ergebnisse

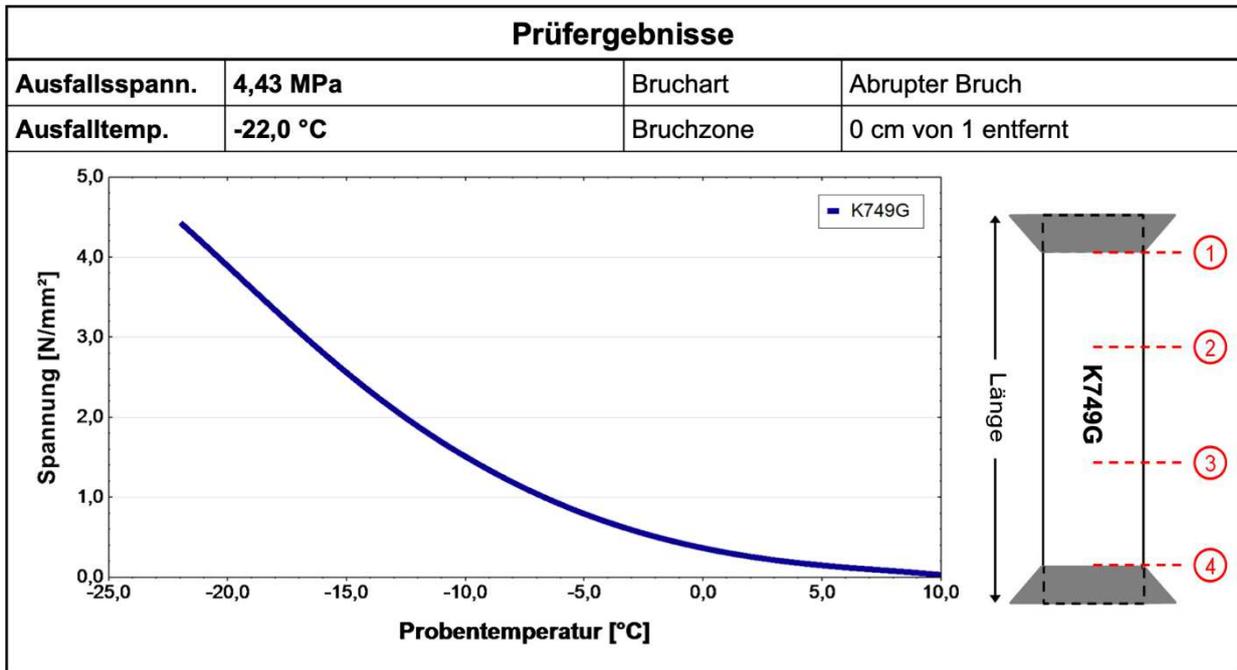
Probekörper K749E



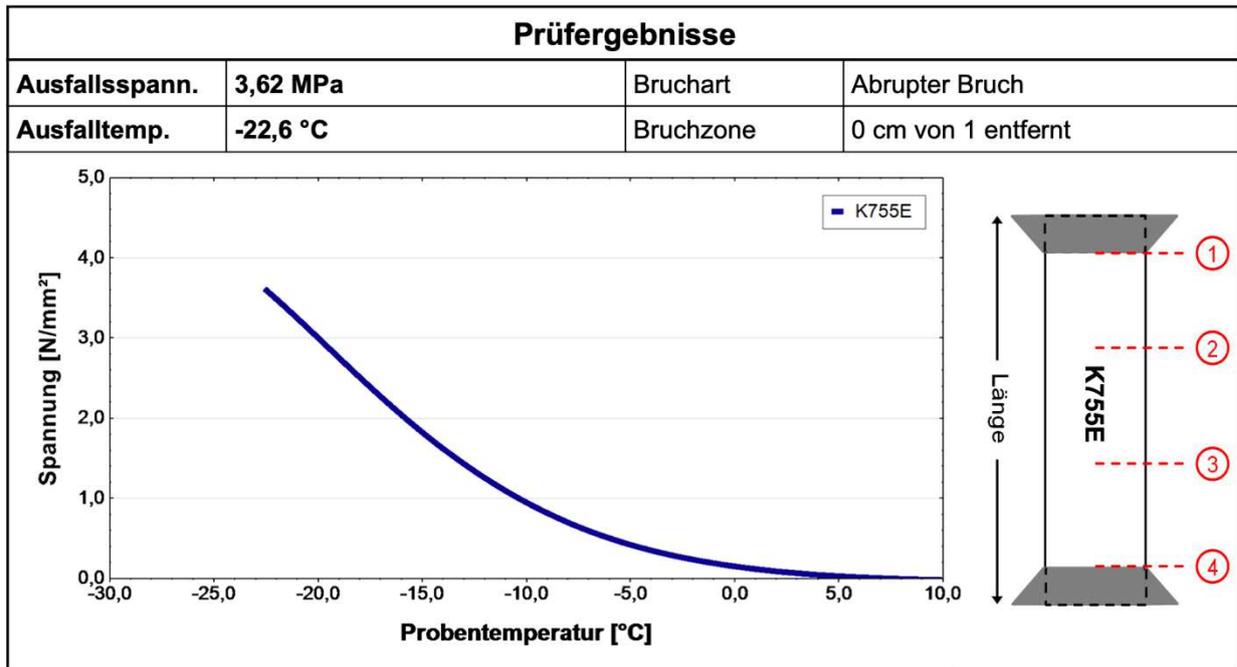
Probekörper K749F



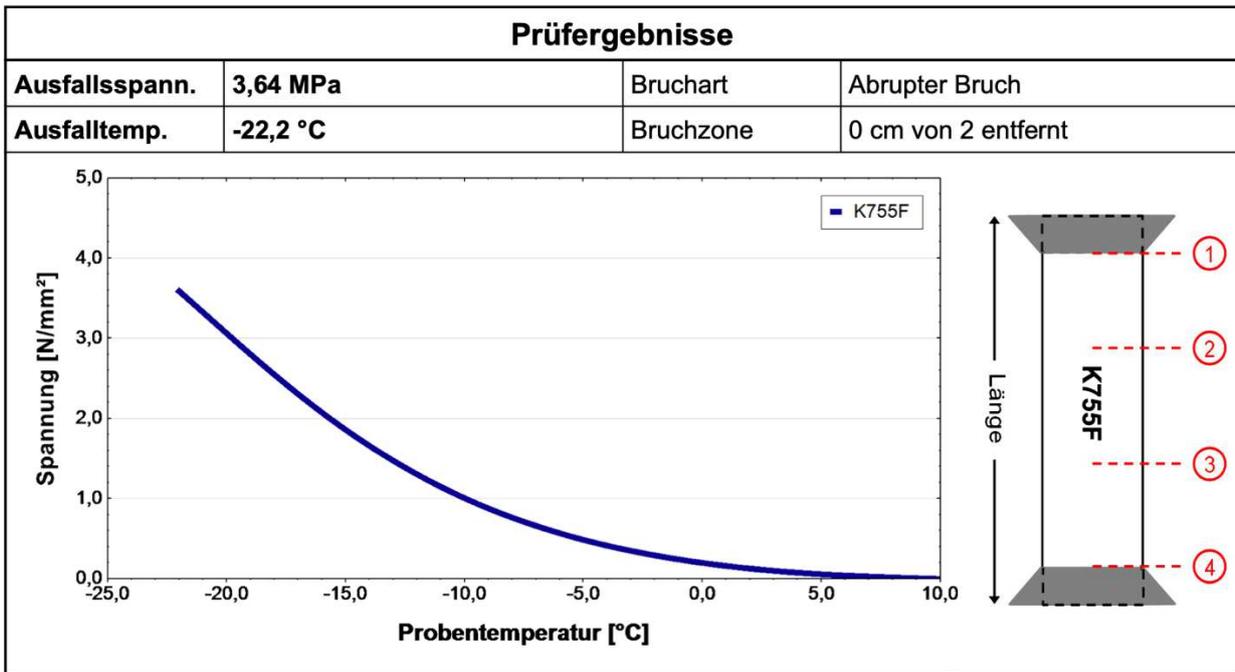
Probekörper K749G



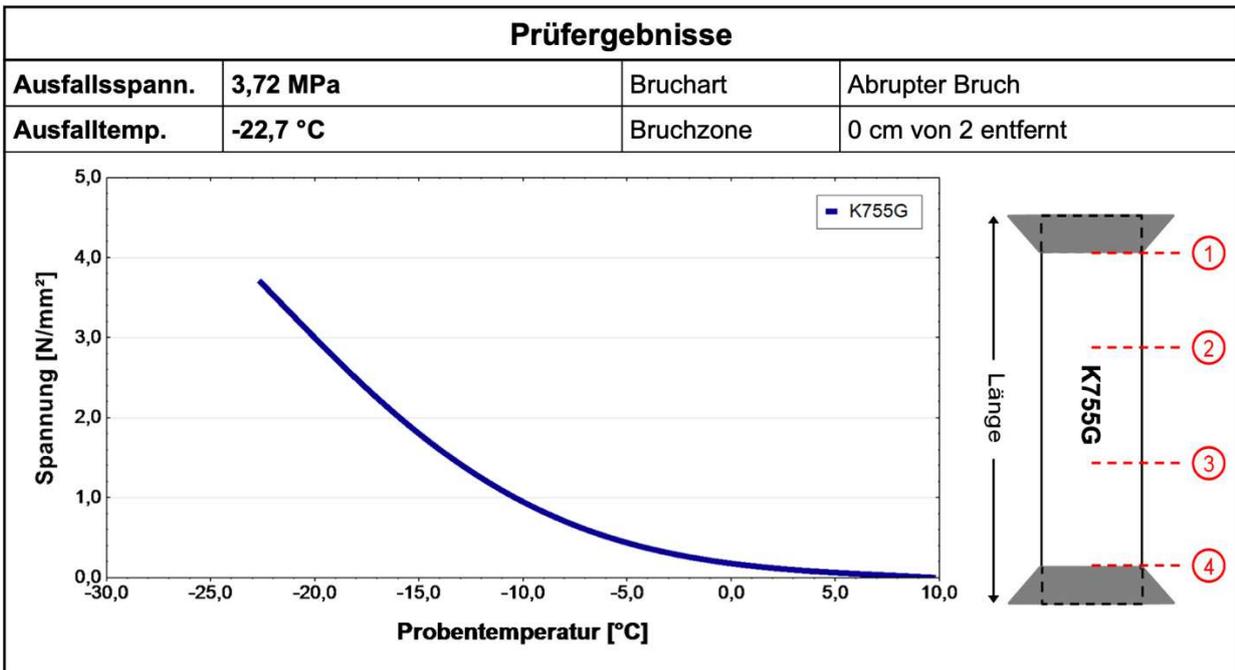
Probekörper K755E



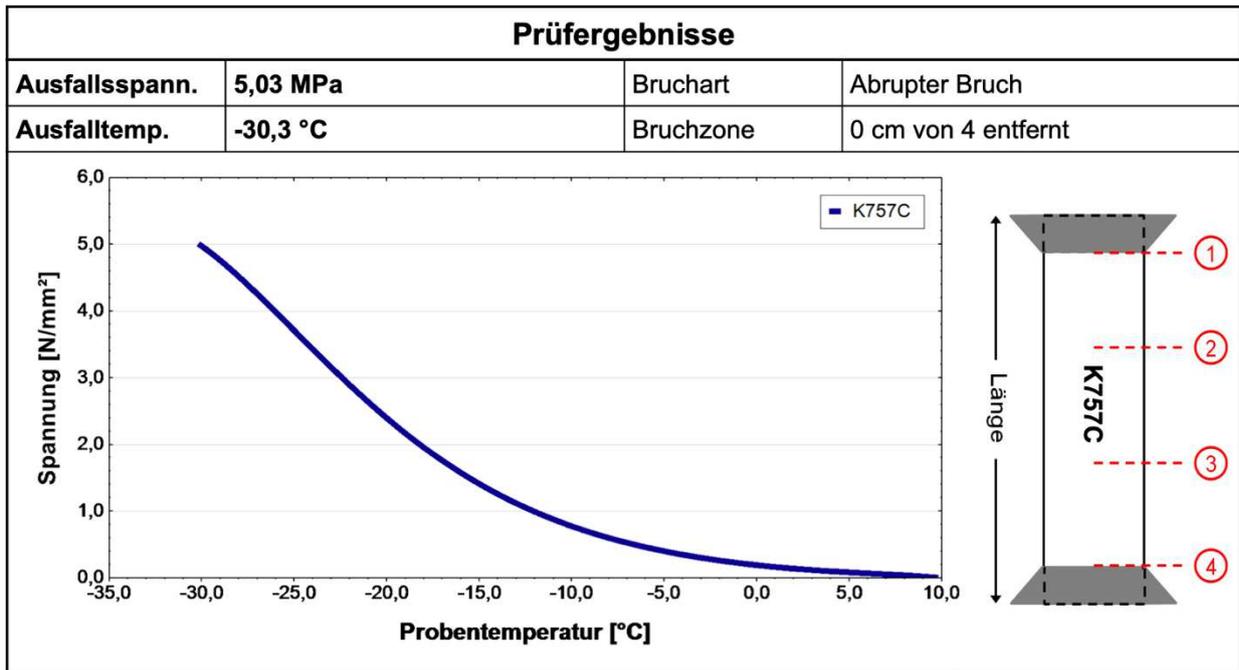
Probekörper K755F



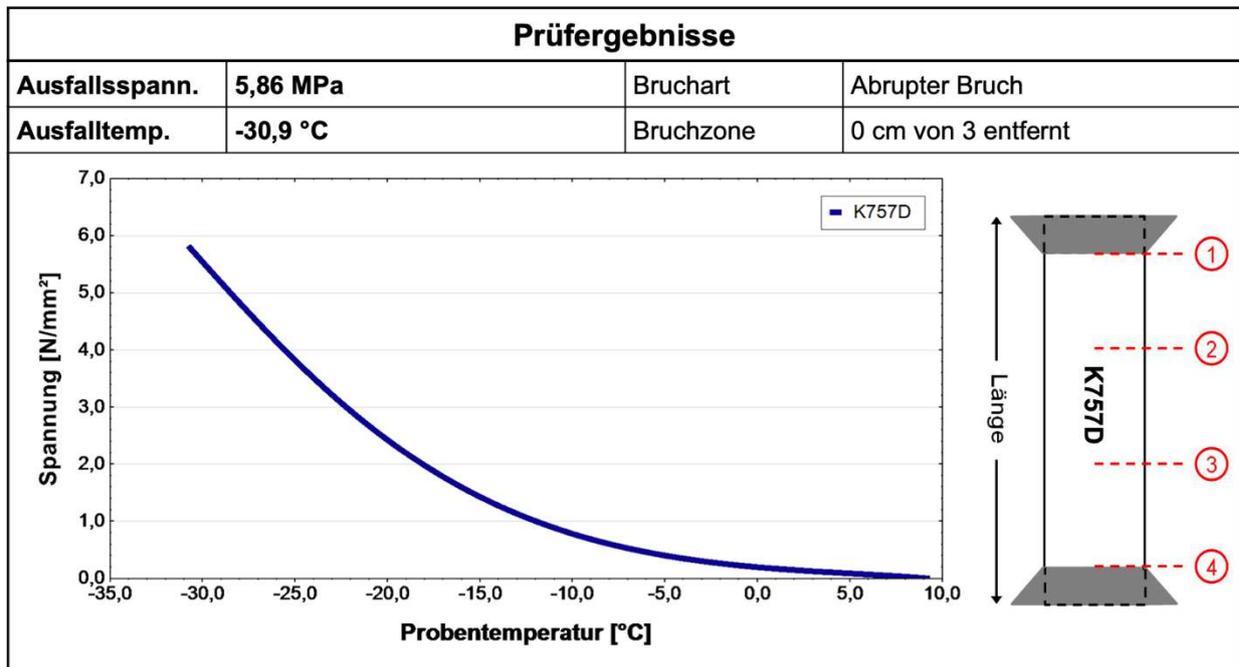
Probekörper K755G



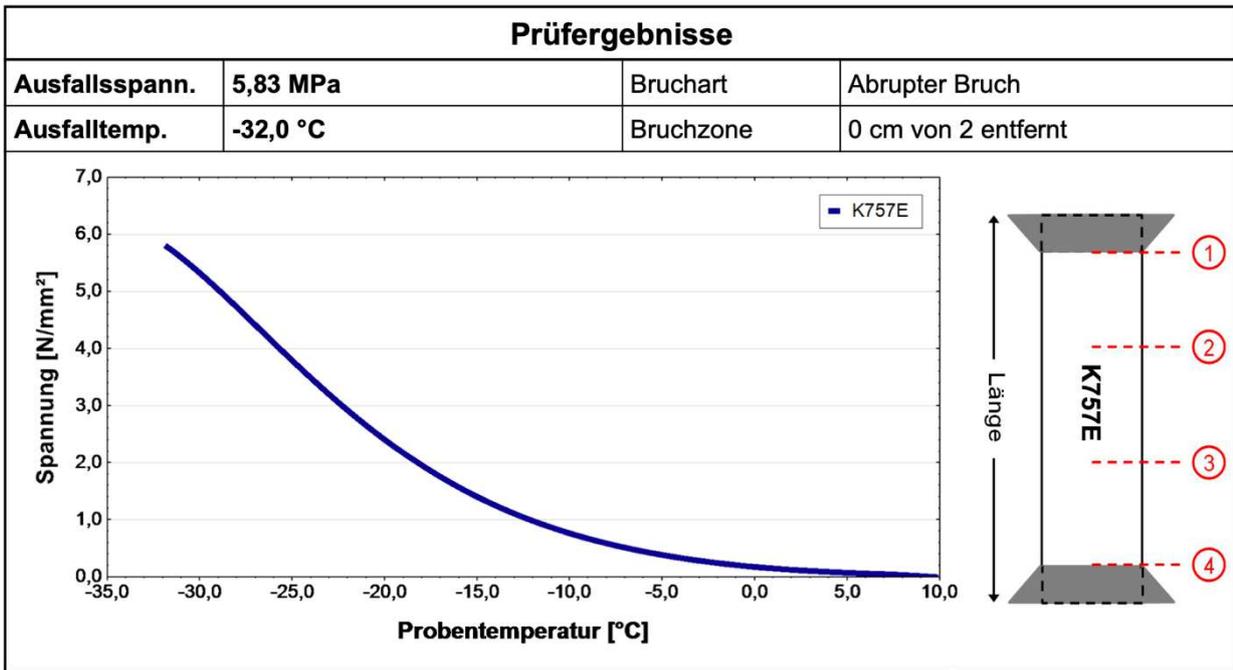
Probekörper K757C



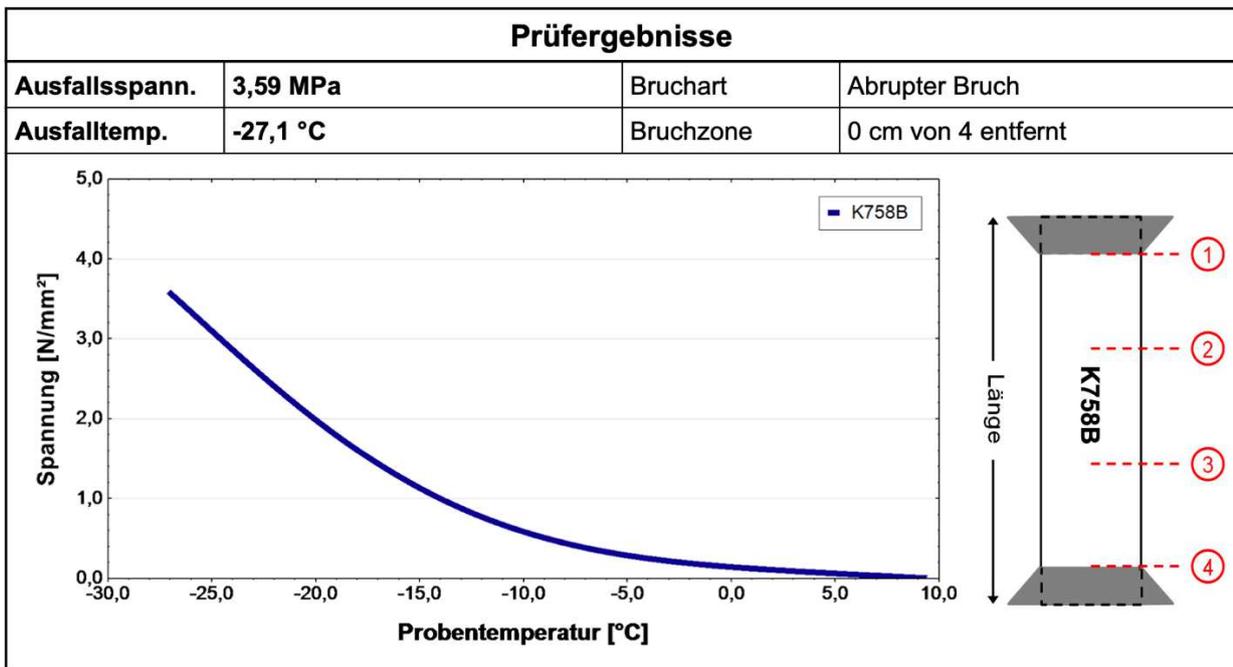
Probekörper K757D



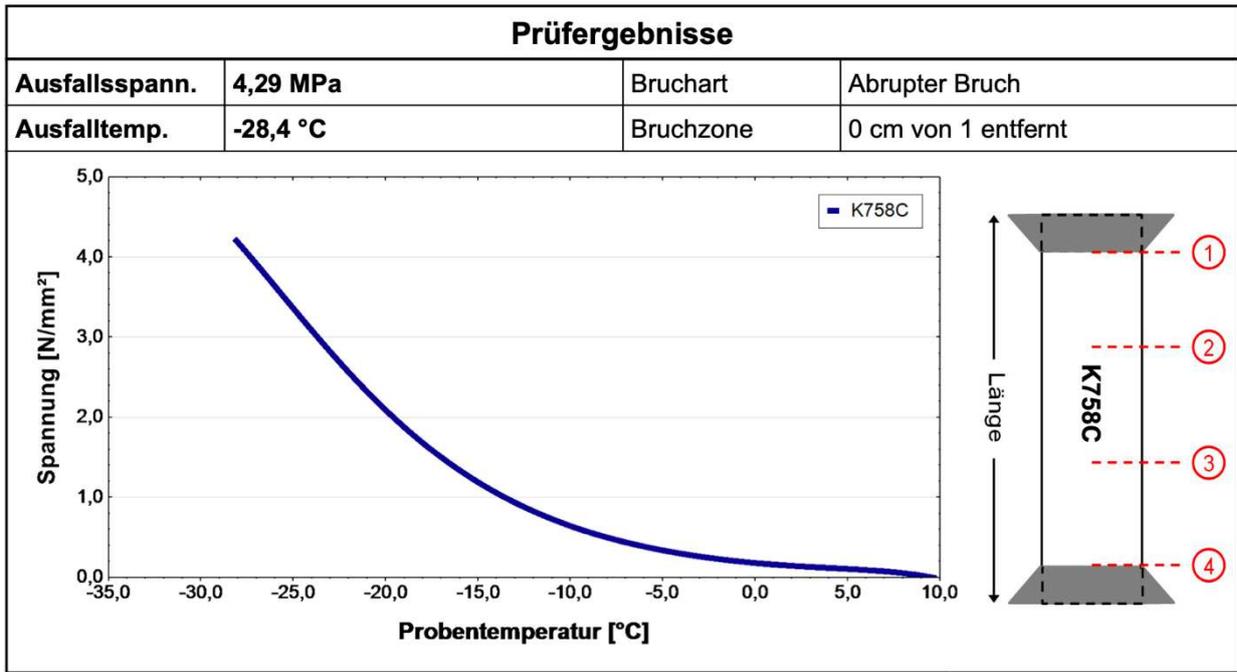
Probekörper K757E



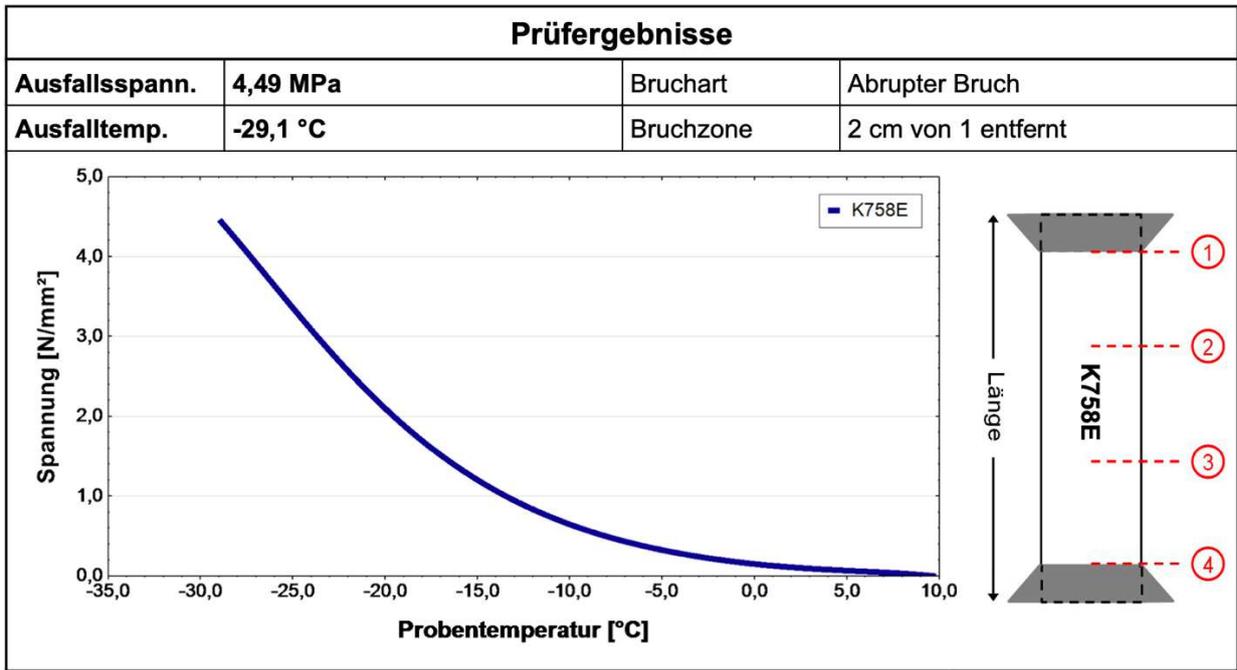
Probekörper K758B



Probekörper K758C



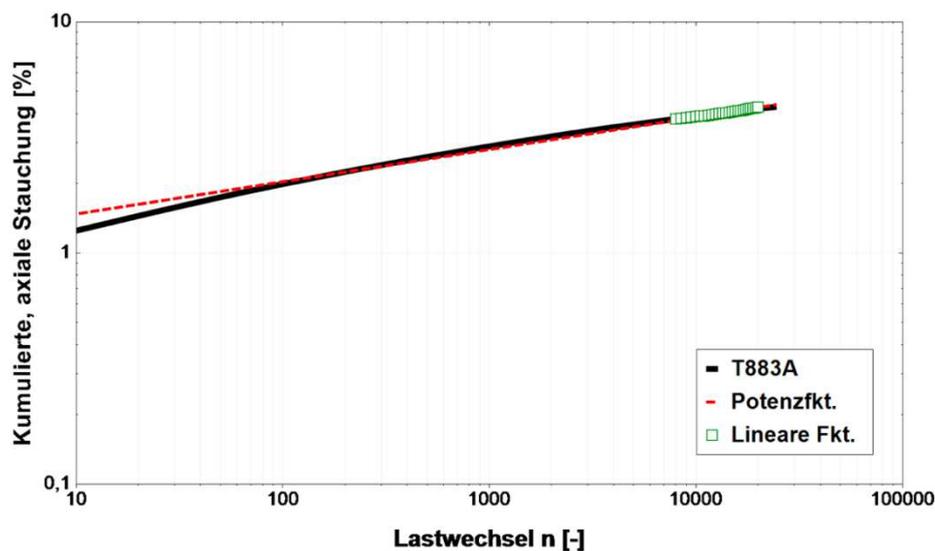
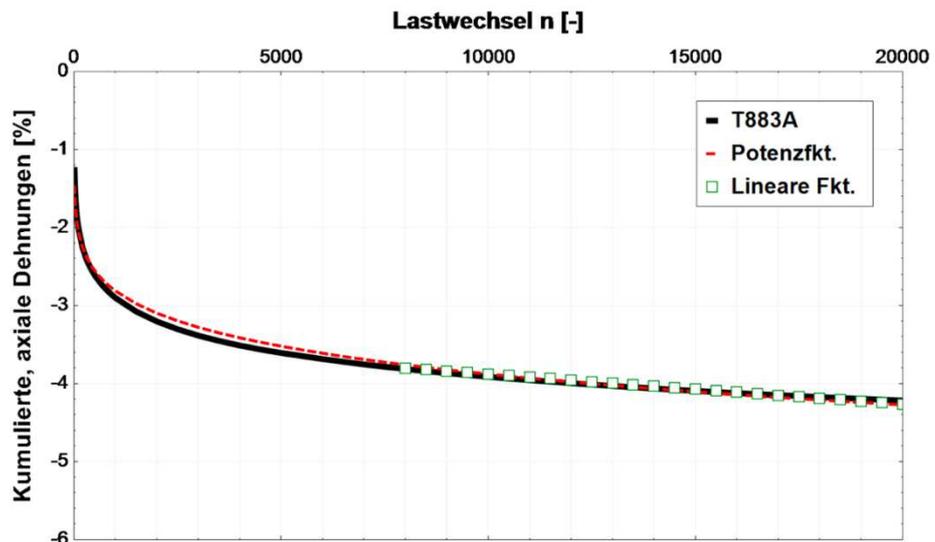
Probekörper K758E



TCCT-Ergebnisse

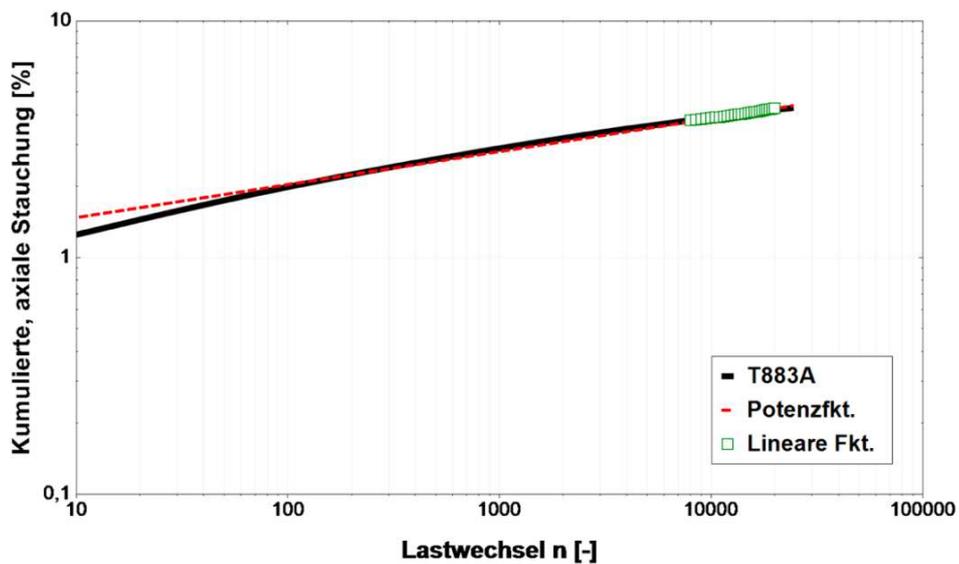
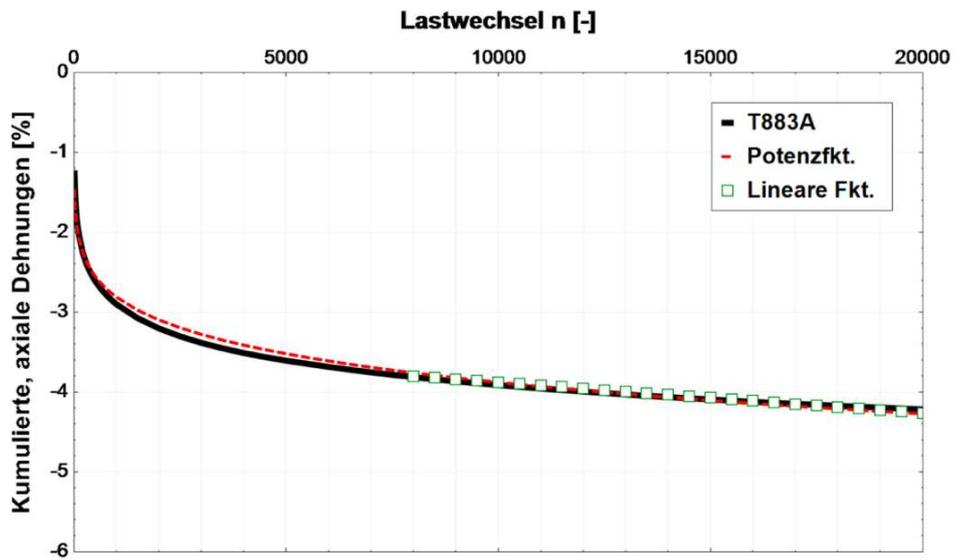
Probekörper T883A

Prüfergebnisse		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -3,89 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 * n$	$A_1 = 3,586$	regressiert zwischen 8000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000328$	
$f_c = B_1 * 10^4 = -0,328 \mu m/(m*n)$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A * n^B$	$A = 1,072$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,140$	
$\epsilon_{1000,calc} = A * 1000^B =$	2,81 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A * 10000^B =$	3,88 % beim 10000. LW	



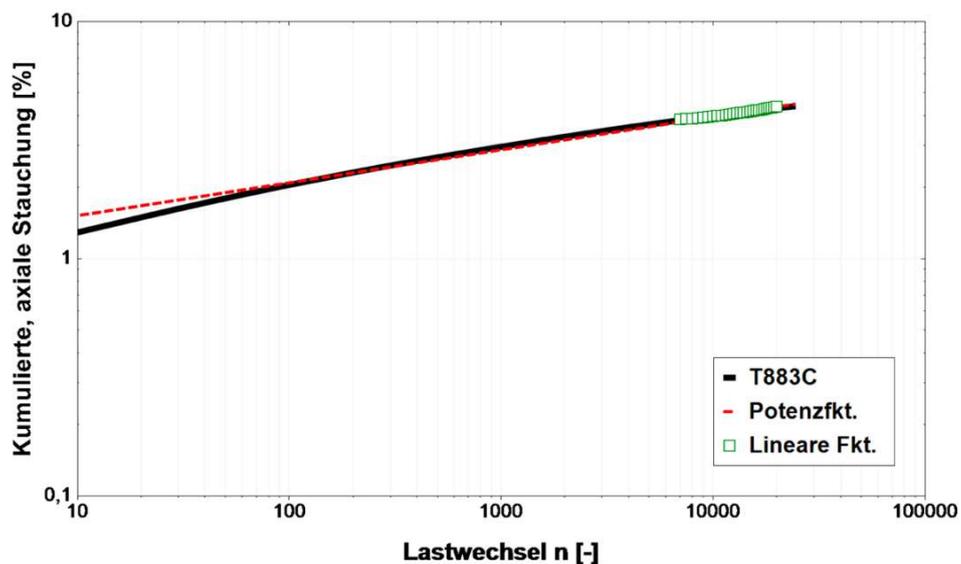
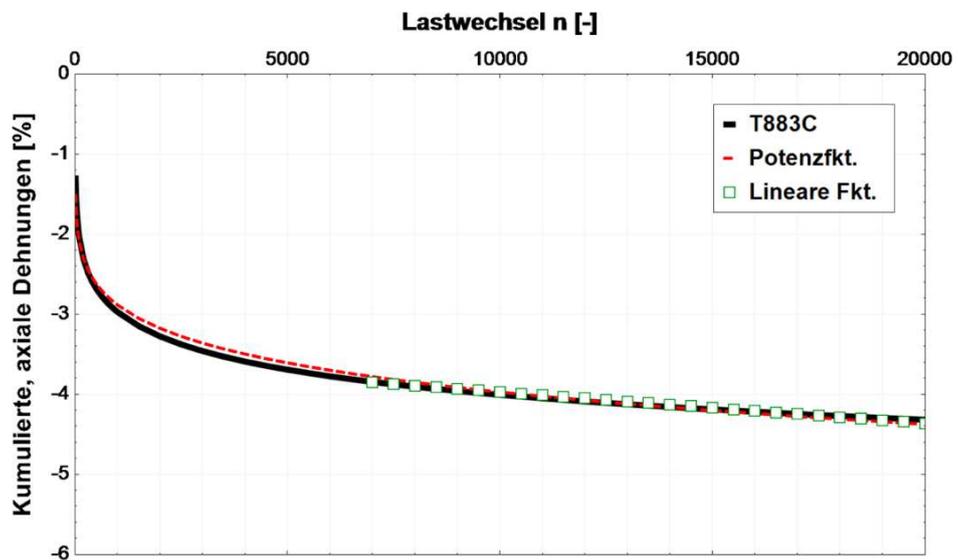
Probekörper T883B

Prüfergebnisse		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -3,77 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 * n$	$A_1 = 3,489$	regressiert zwischen 8000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000308$	
$f_c = B_1 * 10^4 = -0,308 \mu\text{m}/(\text{m} * \text{n})$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A * n^B$	$A = 1,061$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,137$	
$\epsilon_{1000,calc} = A * 1000^B =$	2,74 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A * 10000^B =$	3,76 % beim 10000. LW	



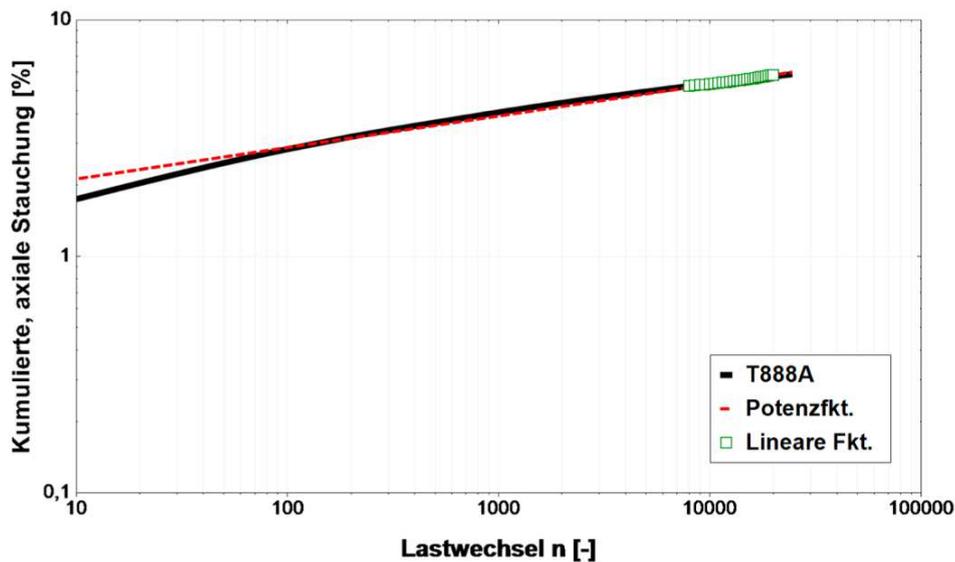
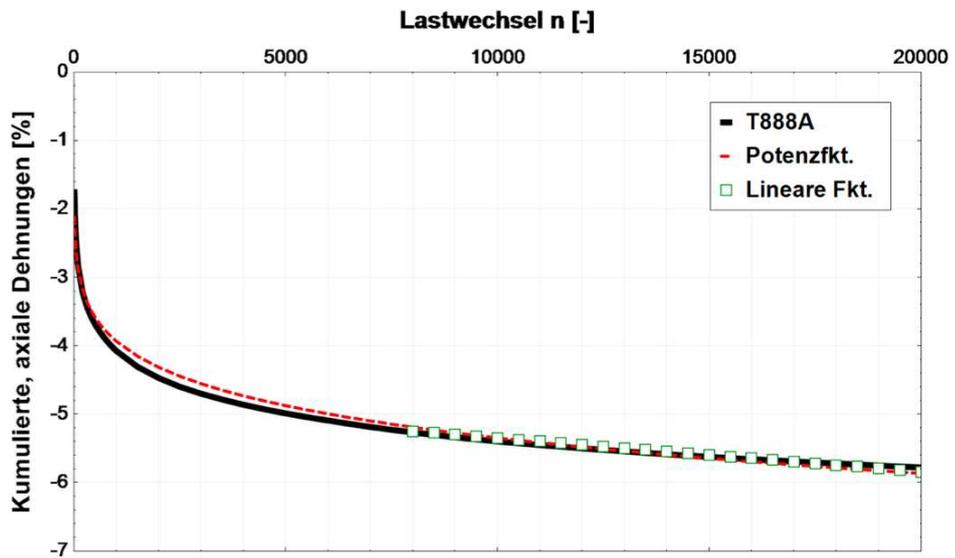
Probekörper T883C

Prüfergebnisse		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -3,98 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 \cdot n$	$A_1 = 3,644$	regressiert zwischen 7000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000352$	
$f_c = B_1 \cdot 10^4 = -0,352 \mu m / (m \cdot n)$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A \cdot n^B$	$A = 1,105$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,139$	
$\epsilon_{1000,calc} = A \cdot 1000^B =$	2,88 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A \cdot 10000^B =$	3,97 % beim 10000. LW	



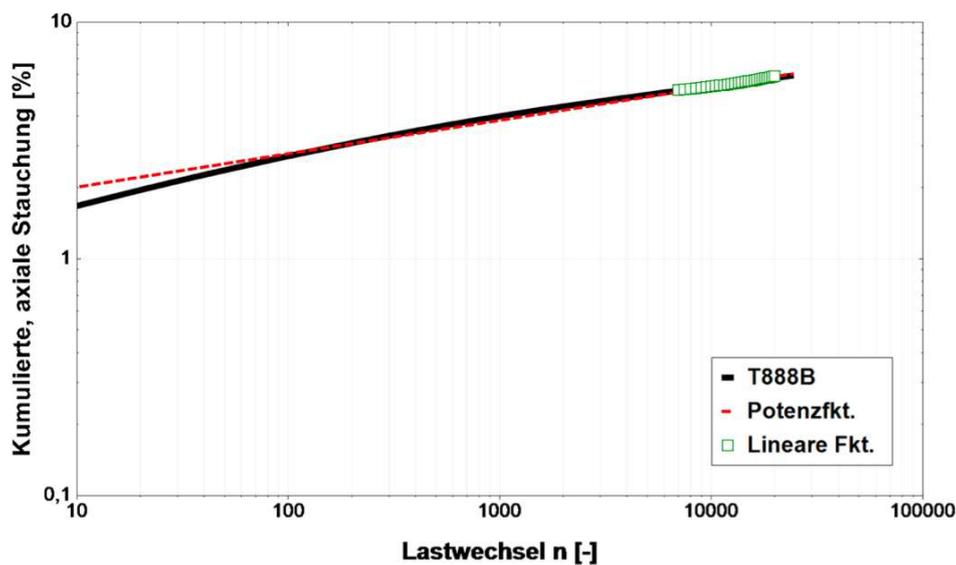
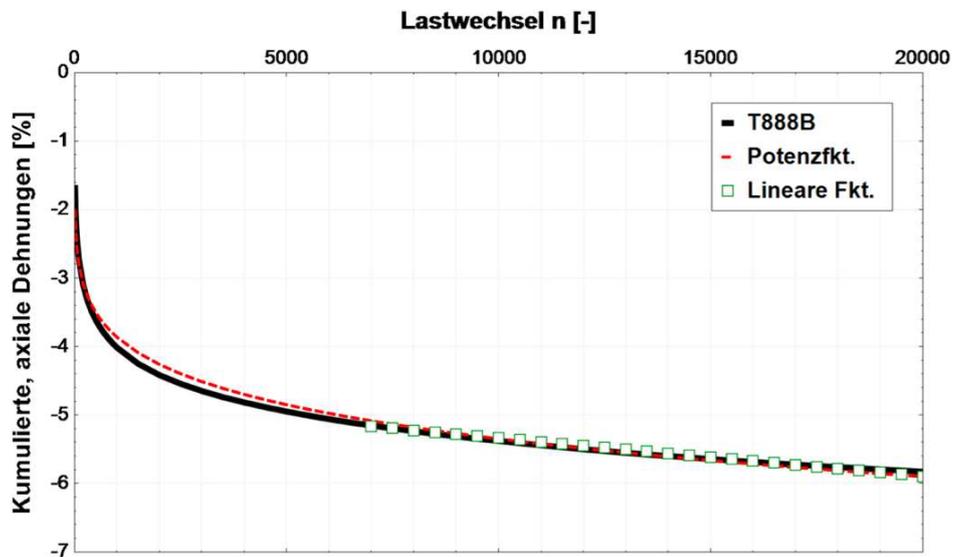
Probekörper T888A

Prüfergebnisse		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -5,36 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 * n$	$A_1 = 4,981$	regressiert zwischen 8000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000414$	
$f_c = B_1 * 10^4 = -0,414 \mu\text{m}/(\text{m} * \text{n})$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A * n^B$	$A = 1,566$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,133$	
$\epsilon_{1000,calc} = A * 1000^B =$	3,93 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A * 10000^B =$	5,34 % beim 10000. LW	



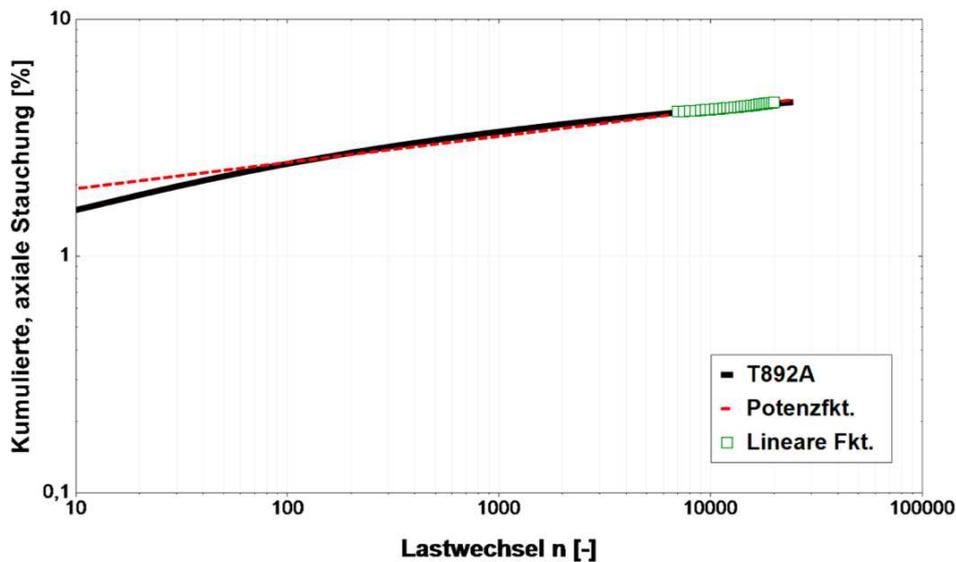
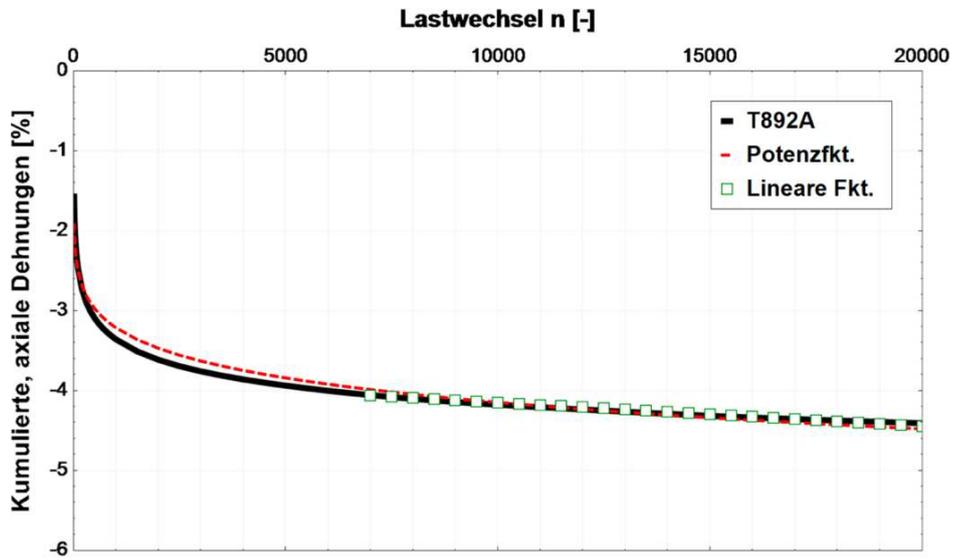
Probekörper T888B

Prüfresultate		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -5,36 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 \cdot n$	$A_1 = 4,860$	regressiert zwischen 7000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000505$	
$f_c = B_1 \cdot 10^4 = -0,505 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{n})$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A \cdot n^B$	$A = 1,454$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,141$	
$\epsilon_{1000,calc} = A \cdot 1000^B =$	3,86 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A \cdot 10000^B =$	5,34 % beim 10000. LW	



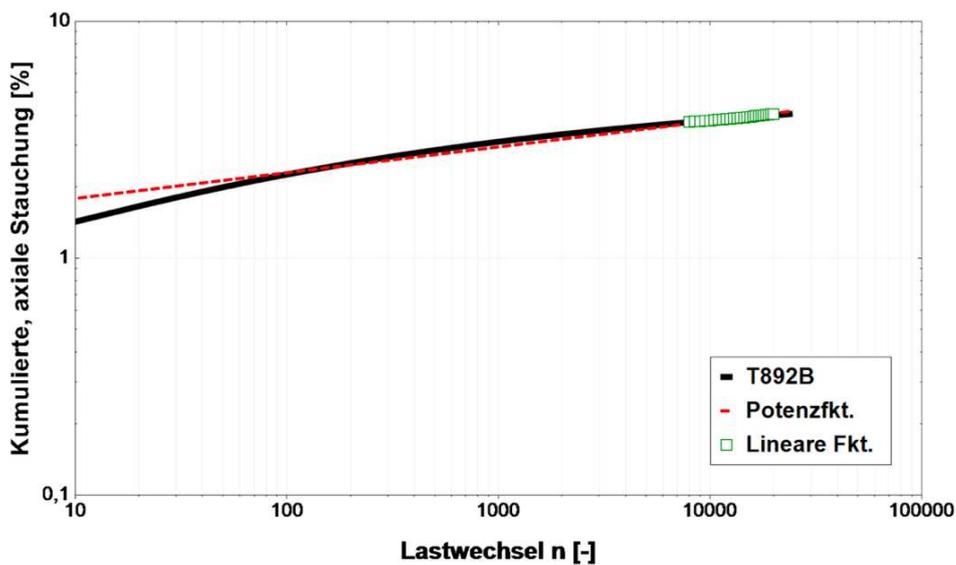
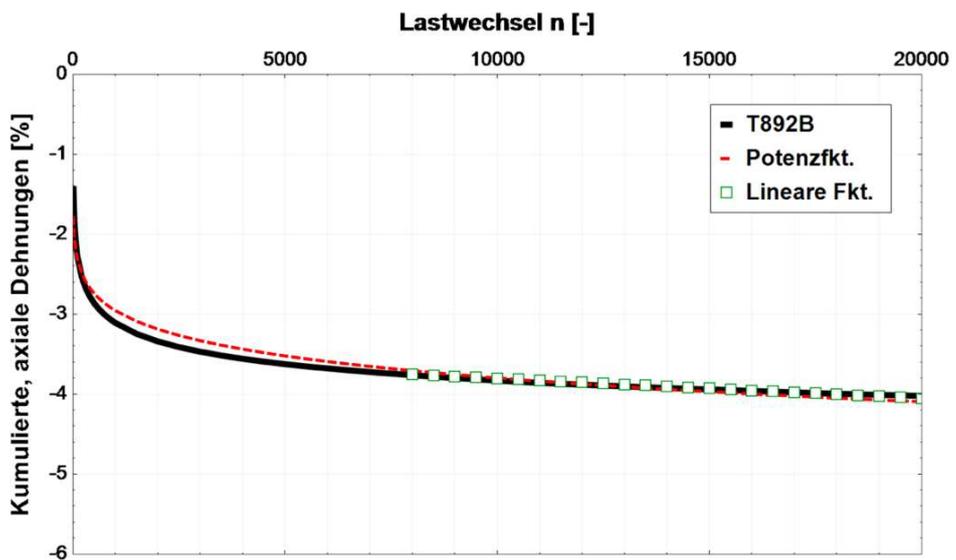
Probekörper T892A

Prüfergebnisse		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -4,16 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 * n$	$A_1 = 3,908$	regressiert zwischen 7000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000262$	
$f_c = B_1 * 10^4 = -0,262 \mu m/(m*n)$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A * n^B$	$A = 1,495$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,111$	
$\epsilon_{1000,calc} = A * 1000^B =$	3,21 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A * 10000^B =$	4,15 % beim 10000. LW	



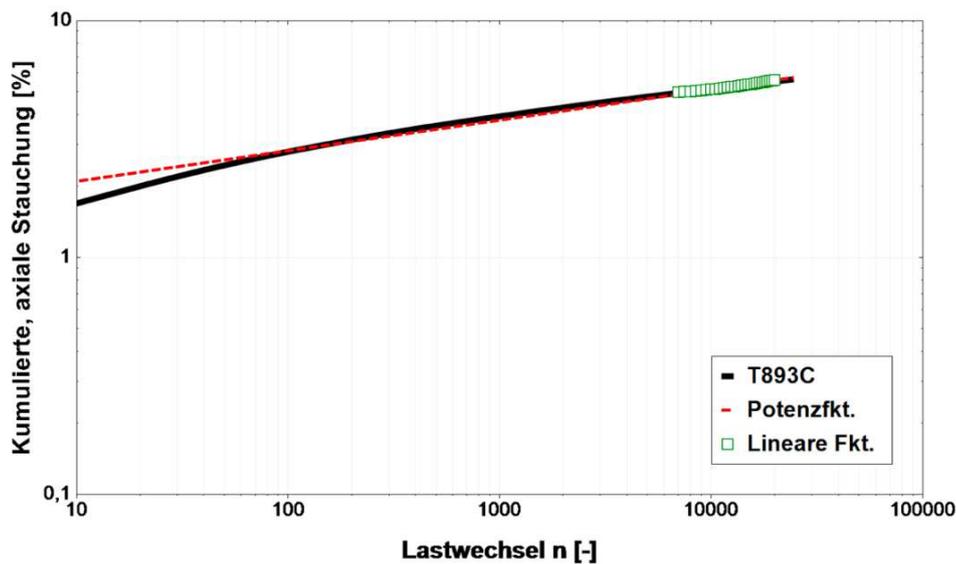
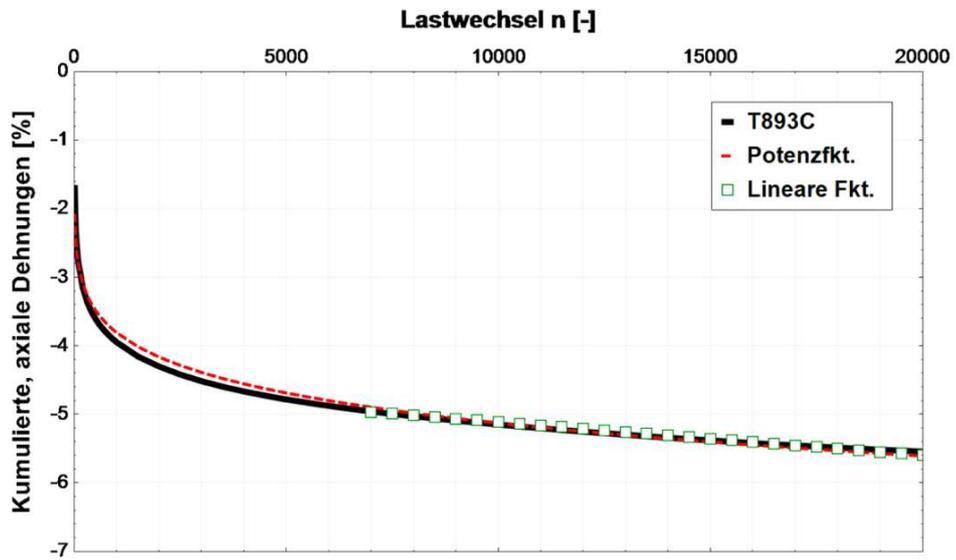
Probekörper T892B

Prüfergebnisse		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -3,81 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 * n$	$A_1 = 3,619$	regressiert zwischen 8000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000209$	
$f_c = B_1 * 10^4 = -0,209 \mu\text{m}/(\text{m} * \text{n})$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A * n^B$	$A = 1,393$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,109$	
$\epsilon_{1000,calc} = A * 1000^B =$	2,95 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A * 10000^B =$	3,80 % beim 10000. LW	



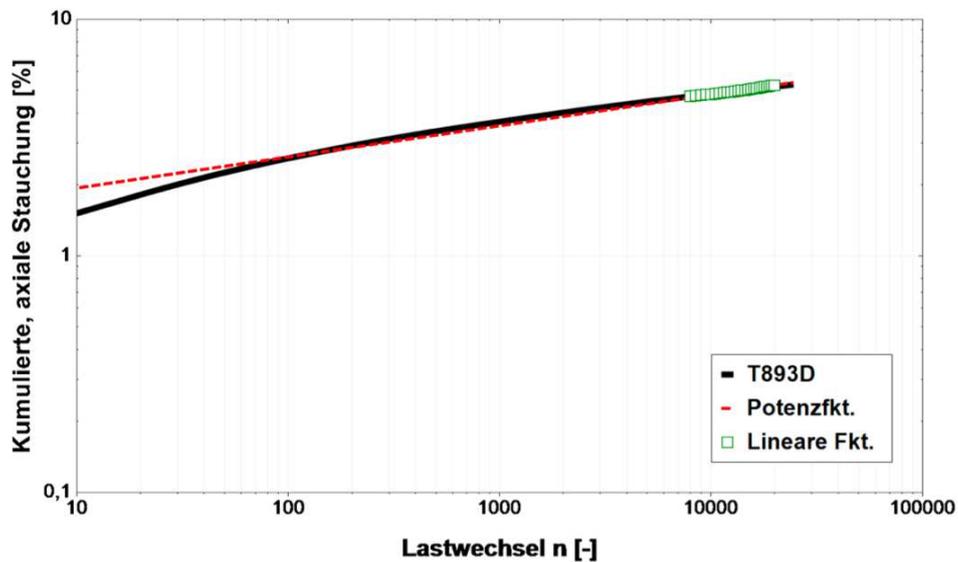
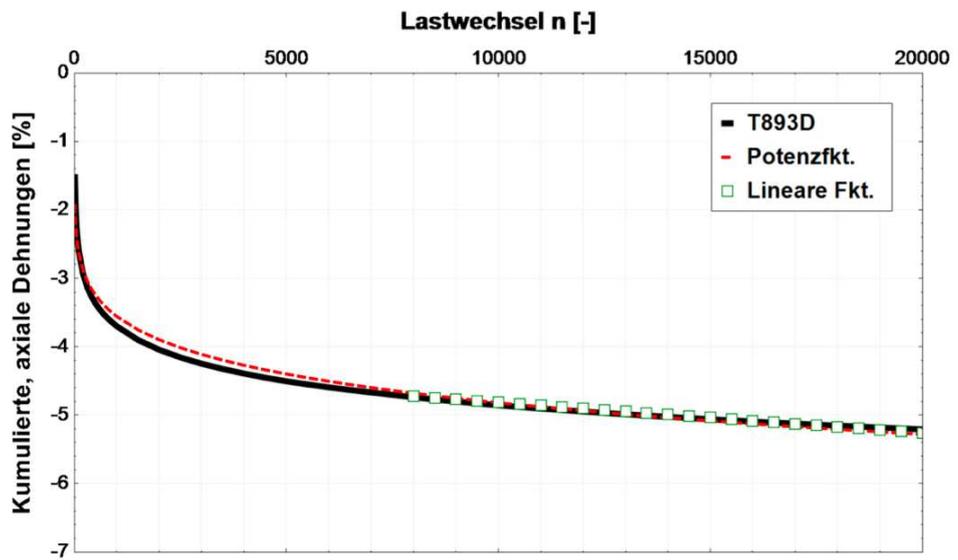
Probekörper T893C

Prüfergebnisse		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -5,14 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 * n$	$A_1 = 4,697$	regressiert zwischen 7000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000442$	
$f_c = B_1 * 10^4 = -0,442 \mu\text{m}/(\text{m} * \text{n})$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A * n^B$	$A = 1,560$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,129$	
$\epsilon_{1000,calc} = A * 1000^B =$	3,81 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A * 10000^B =$	5,12 % beim 10000. LW	



Probekörper T893D

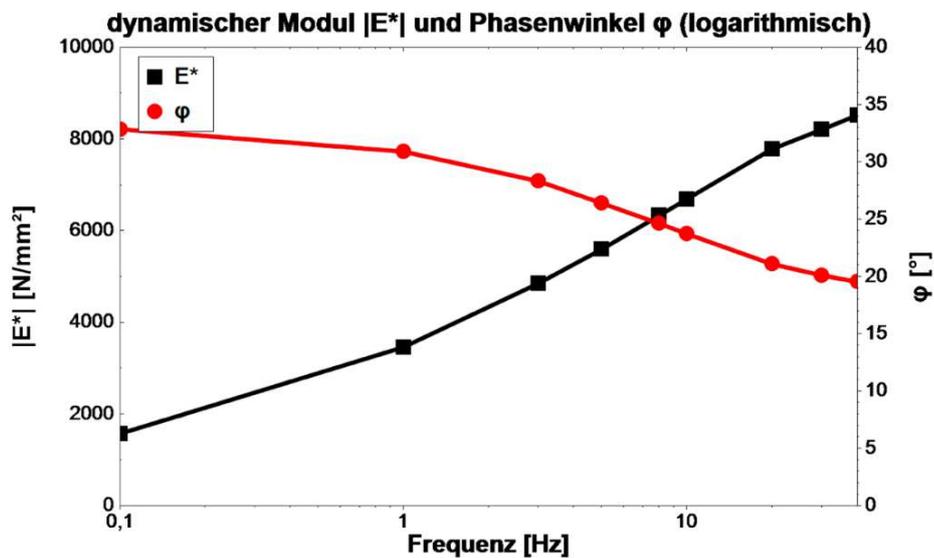
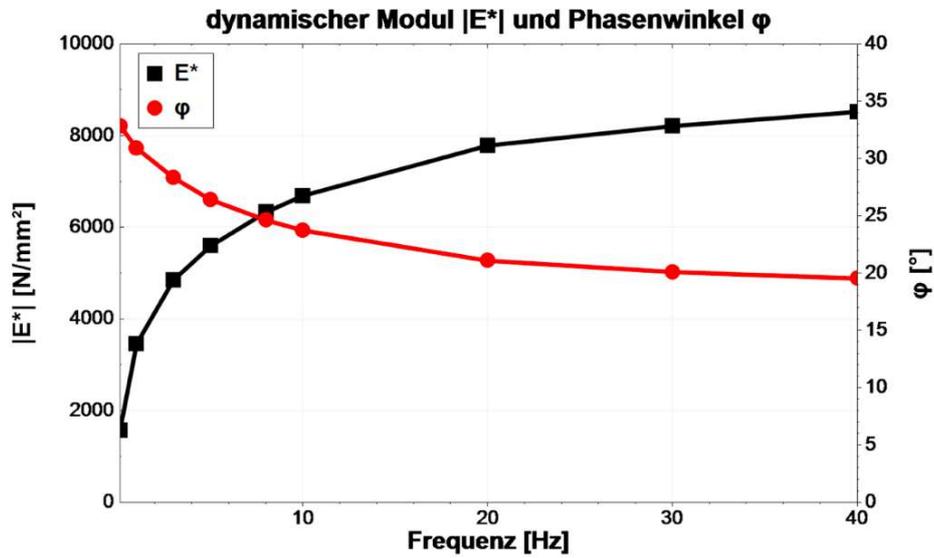
Prüfresultate		
Kumulierte, axiale Dehnung nach 10000 LW (gemessen)		
$\epsilon_{axial} = -4,83 \%$		
Bestimmung der Kriechrate f_c		
$\epsilon_n = A_1 + B_1 * n$	$A_1 = 4,473$	regressiert zwischen 8000. LW und 20000. LW
	$B_1 = -0,0000379$	
$f_c = B_1 * 10^4 = -0,379 \mu m/(m*n)$		
Bestimmung der Parameter B und $\epsilon_{1000,calc}$		
$\epsilon_n = A * n^B$	$A = 1,432$	regressiert zwischen 10. LW und 25500. LW
	$B = 0,132$	
$\epsilon_{1000,calc} = A * 1000^B =$	3,56 % beim 1000. LW	
$\epsilon_{10000,calc} = A * 10000^B =$	4,82 % beim 10000. LW	



4-PBB-Ergebnisse

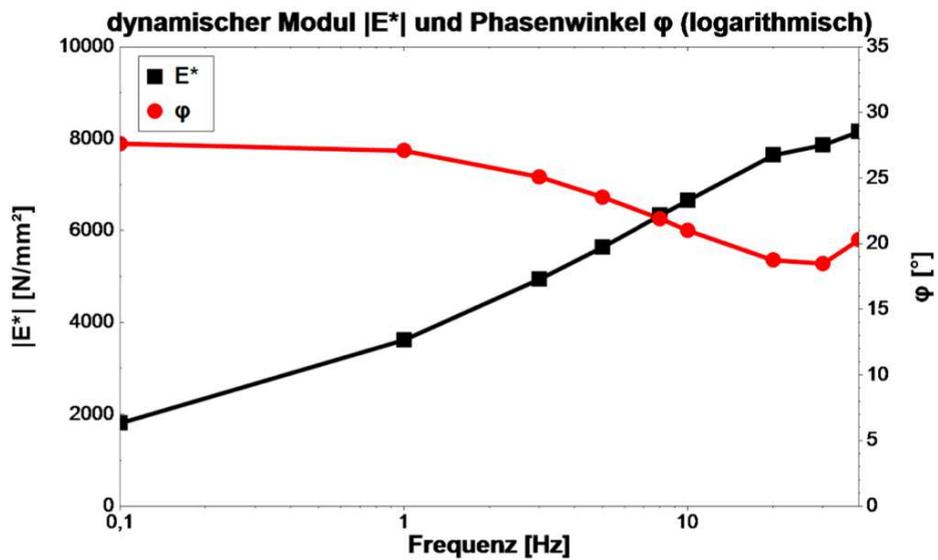
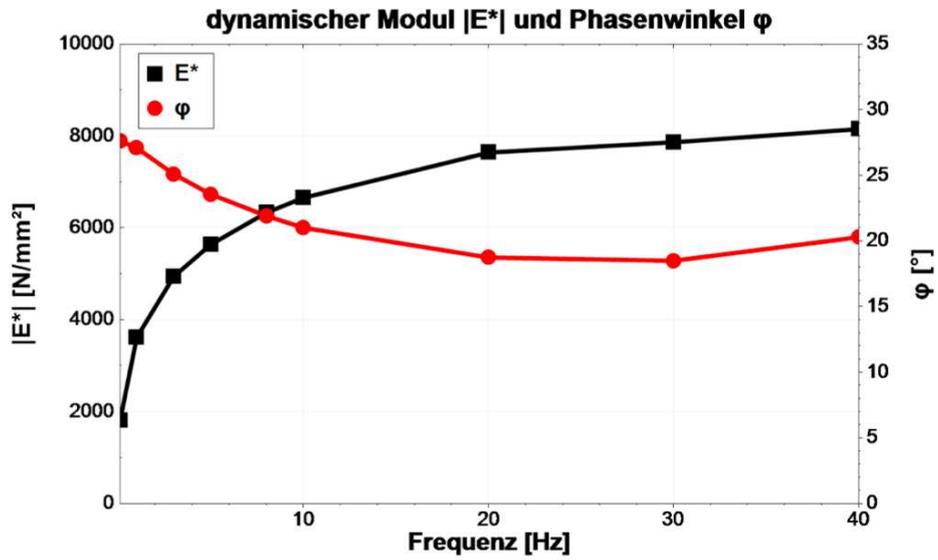
Probekörper E1144A

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m/m}$]	$ E^* $ [N/mm ²]	E_1 [N/mm ²]	E_2 [N/mm ²]	ϕ [°]
0,1	34,3	1576,62	1324,11	855,84	32,88
1	34,6	3463,50	2963,20	1772,81	30,92
3	35,0	4857,02	4270,21	2295,65	28,33
5	35,1	5596,35	5010,76	2492,01	26,42
8	34,9	6334,50	5758,72	2641,23	24,64
10	34,9	6693,17	6127,93	2692,32	23,74
20	34,7	7786,46	7267,47	2803,80	21,10
30	34,0	8211,57	7710,72	2830,72	20,11
40	33,7	8524,55	8036,06	2854,79	19,55



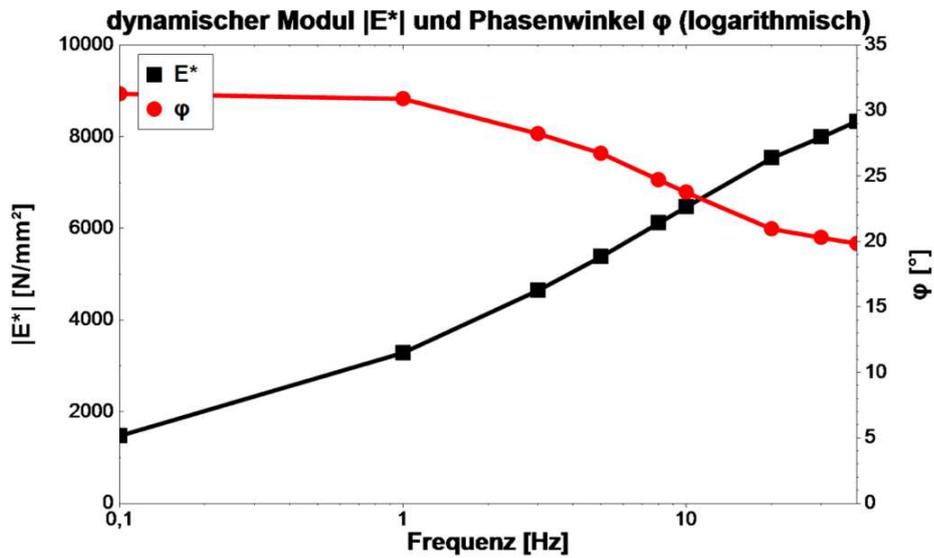
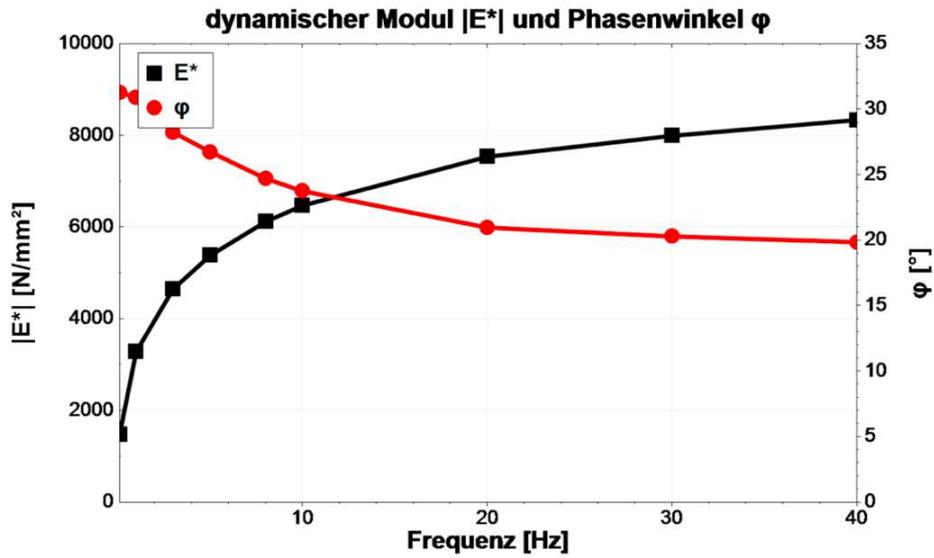
Probekörper E1144B

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m/m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [$^\circ$]
0,1	34,7	1811,35	1604,53	840,14	27,64
1	34,8	3623,01	3224,26	1650,88	27,10
3	35,7	4946,67	4480,28	2100,58	25,11
5	35,7	5642,84	5174,73	2259,50	23,56
8	35,5	6336,17	5879,43	2364,58	21,93
10	35,6	6658,12	6215,68	2396,78	21,02
20	35,5	7643,97	7238,78	2459,52	18,75
30	34,8	7867,13	7455,65	2503,25	18,51
40	35,2	8153,43	7646,11	2829,16	20,30



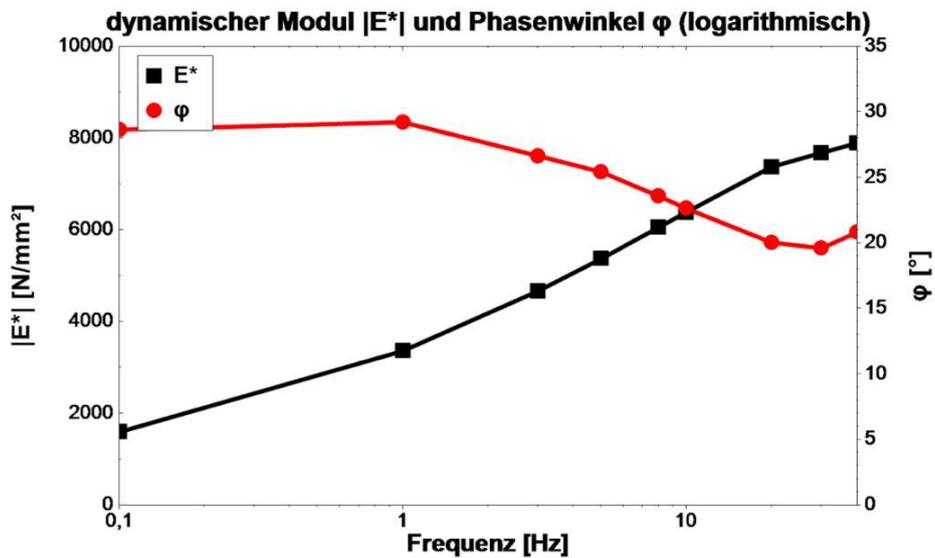
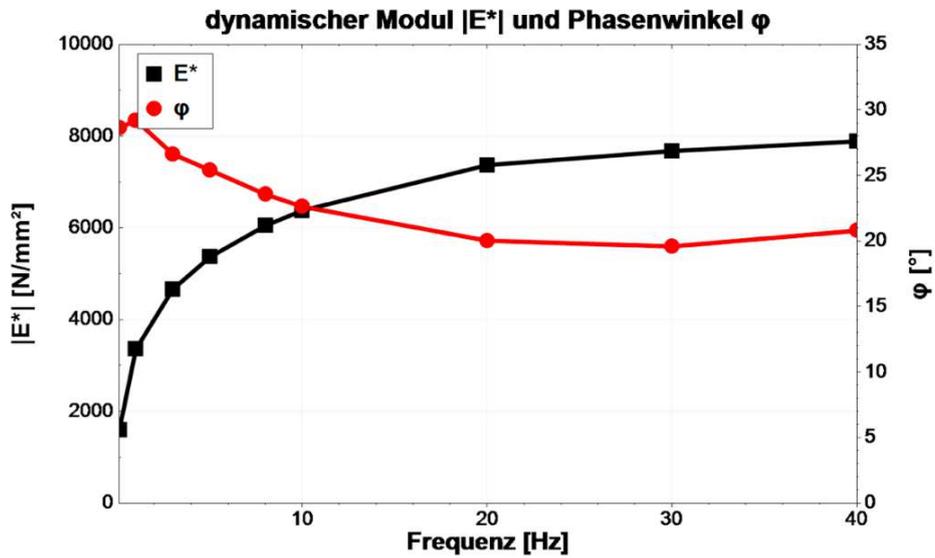
Probekörper E1144C

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m/m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [°]
0,1	34,6	1478,61	1263,65	767,77	31,28
1	34,7	3289,68	2817,12	1698,52	30,91
3	35,3	4652,74	4096,53	2205,20	28,24
5	35,5	5383,34	4810,54	2422,38	26,75
8	35,2	6119,75	5557,65	2558,13	24,71
10	35,2	6471,77	5919,83	2607,95	23,76
20	35,1	7537,25	7035,82	2699,18	20,97
30	34,4	7994,17	7498,51	2774,11	20,30
40	34,4	8339,97	7857,20	2823,48	19,85



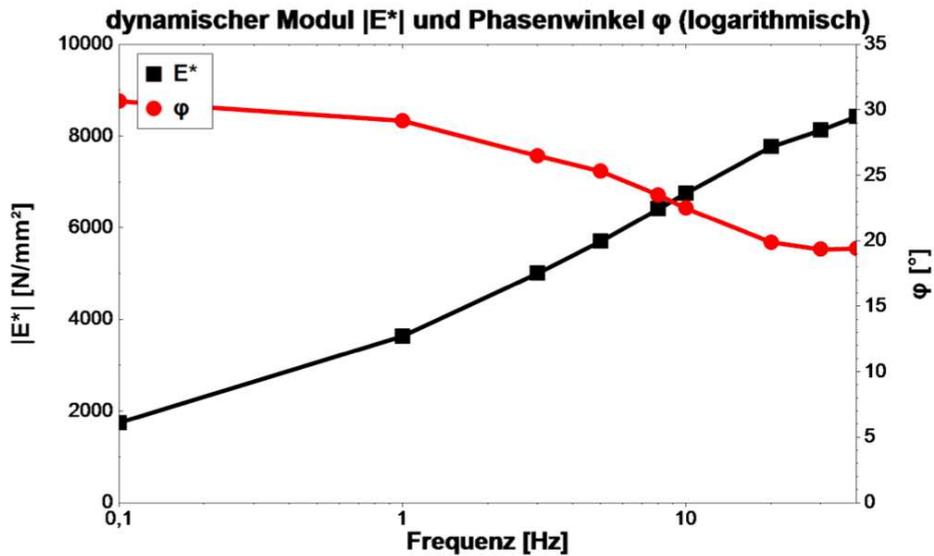
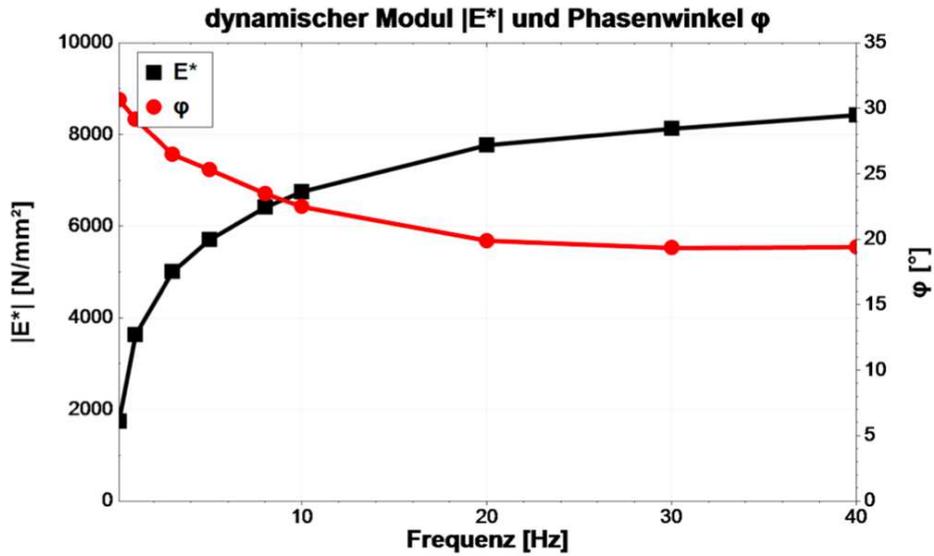
Probekörper E1149A

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [$^\circ$]
0,1	34,8	1593,25	1398,24	763,77	28,65
1	34,7	3361,09	2933,15	1641,32	29,22
3	35,9	4667,47	4171,44	2095,38	26,65
5	35,7	5368,85	4847,80	2304,82	25,42
8	35,7	6053,50	5549,72	2424,75	23,58
10	35,6	6383,67	5893,04	2456,68	22,64
20	35,3	7373,90	6926,10	2527,76	20,04
30	34,5	7680,09	7235,69	2574,87	19,60
40	34,9	7891,47	7379,66	2803,32	20,80



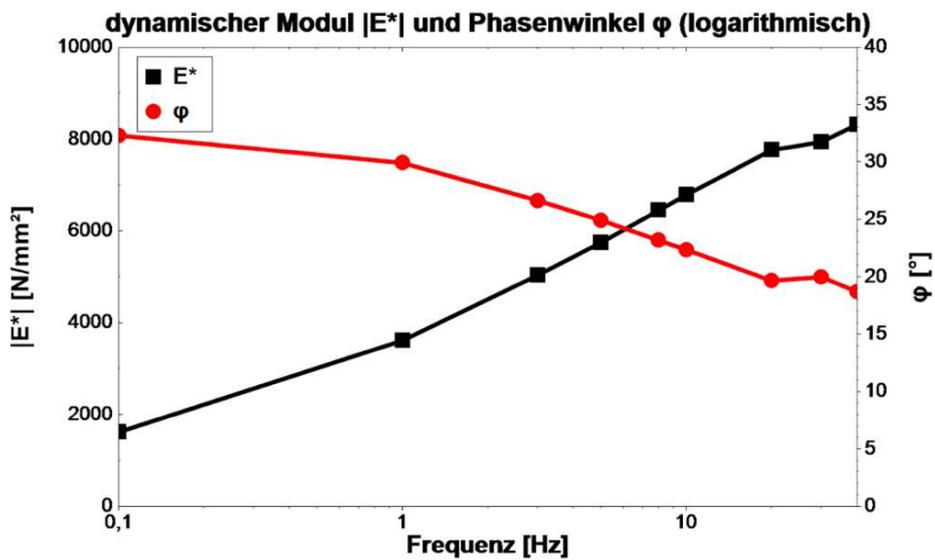
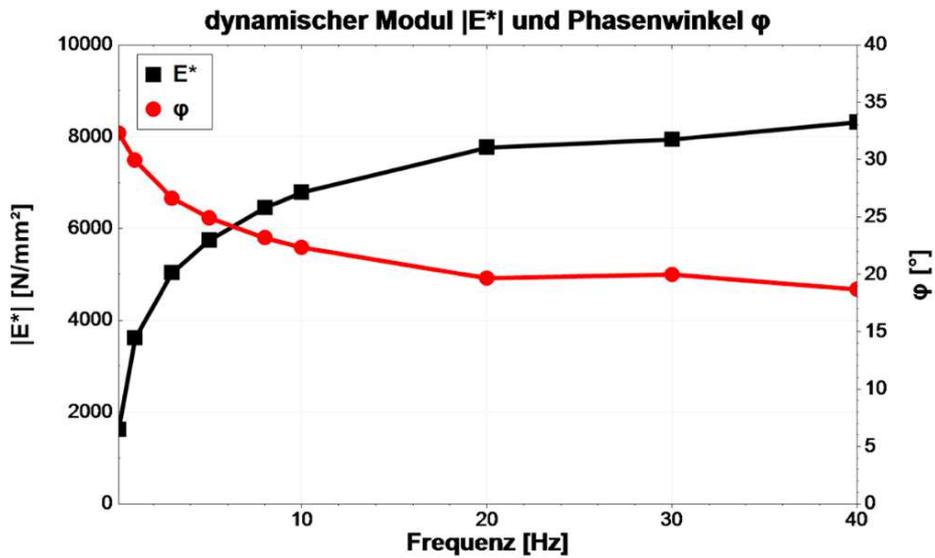
Probekörper E1149B

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m/m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [°]
0,1	34,5	1751,93	1506,98	892,71	30,67
1	34,7	3639,65	3164,10	1774,26	29,18
3	35,3	5010,82	4474,35	2237,52	26,50
5	35,3	5708,23	5152,33	2439,99	25,32
8	35,2	6412,81	5878,85	2560,44	23,51
10	35,2	6757,73	6241,81	2584,18	22,49
20	35,0	7770,65	7306,81	2652,07	19,91
30	34,2	8132,15	7669,48	2694,11	19,35
40	34,0	8428,23	7957,43	2804,01	19,42



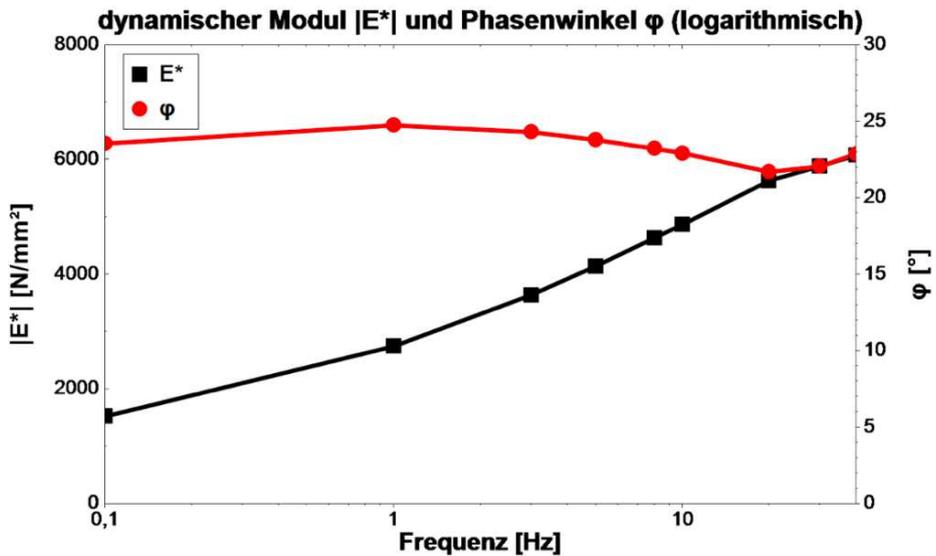
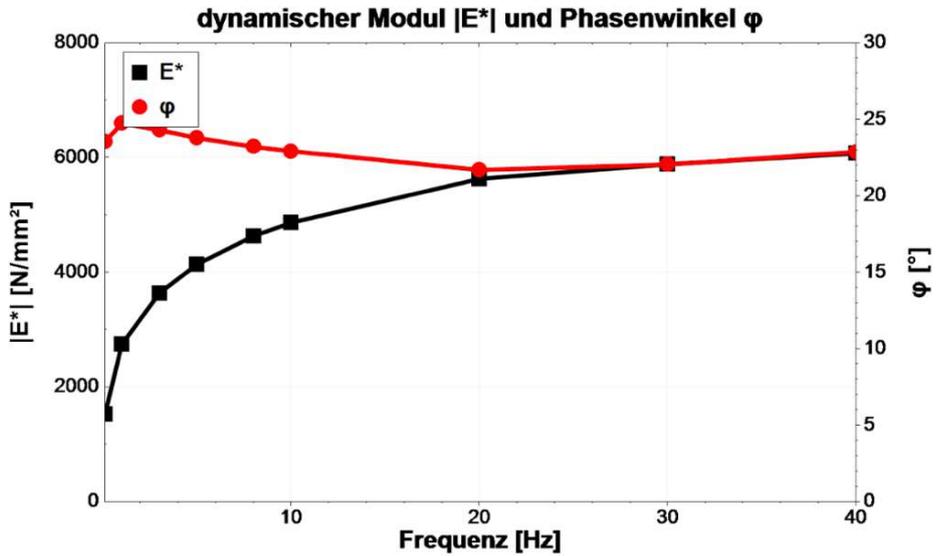
Probekörper E1149C

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m/m}$]	$ E^* $ [N/mm ²]	E_1 [N/mm ²]	E_2 [N/mm ²]	ϕ [°]
0,1	35,2	1621,34	1369,88	867,28	32,34
1	35,3	3618,29	3131,32	1817,70	29,94
3	35,2	5042,57	4511,23	2269,11	26,67
5	35,5	5749,95	5211,29	2426,46	24,95
8	35,6	6453,75	5930,83	2542,82	23,19
10	35,7	6791,66	6280,42	2585,46	22,38
20	35,7	7764,58	7314,63	2611,95	19,69
30	35,5	7943,74	7465,21	2717,96	20,00
40	35,8	8320,42	7883,09	2661,89	18,71



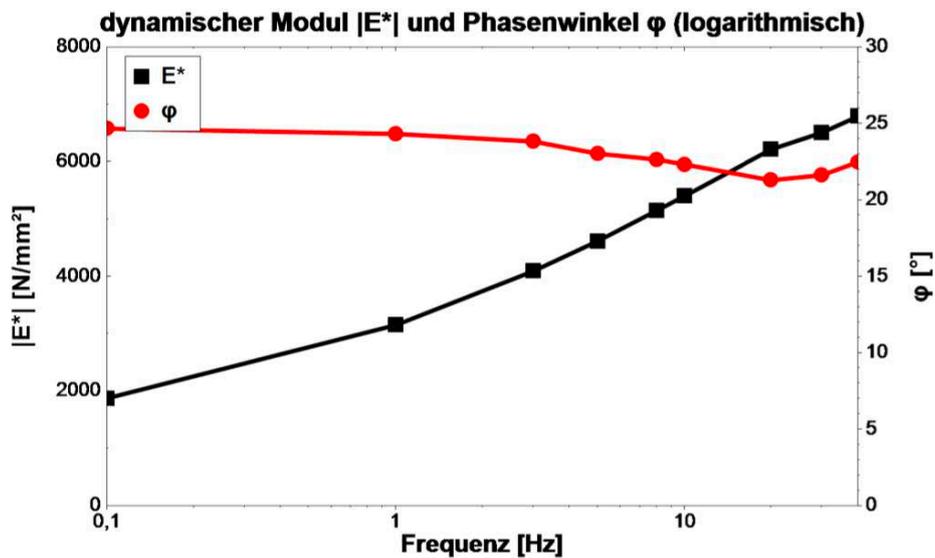
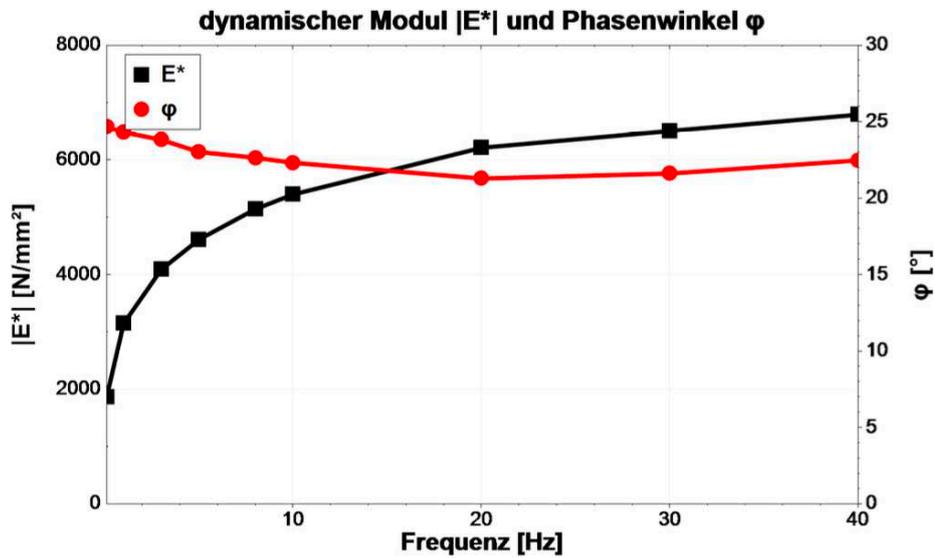
Probekörper E1154A

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m/m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [$^\circ$]
0,1	34,7	1521,47	1394,73	607,88	23,55
1	34,8	2744,20	2490,03	1144,95	24,74
3	34,8	3641,21	3321,75	1496,76	24,30
5	35,0	4140,84	3786,76	1665,54	23,80
8	35,1	4636,06	4261,86	1831,68	23,21
10	35,1	4868,19	4483,26	1899,24	22,93
20	35,2	5632,50	5234,46	2088,17	21,70
30	35,2	5886,35	5458,98	2217,31	22,06
40	35,2	6075,35	5604,98	2353,85	22,87



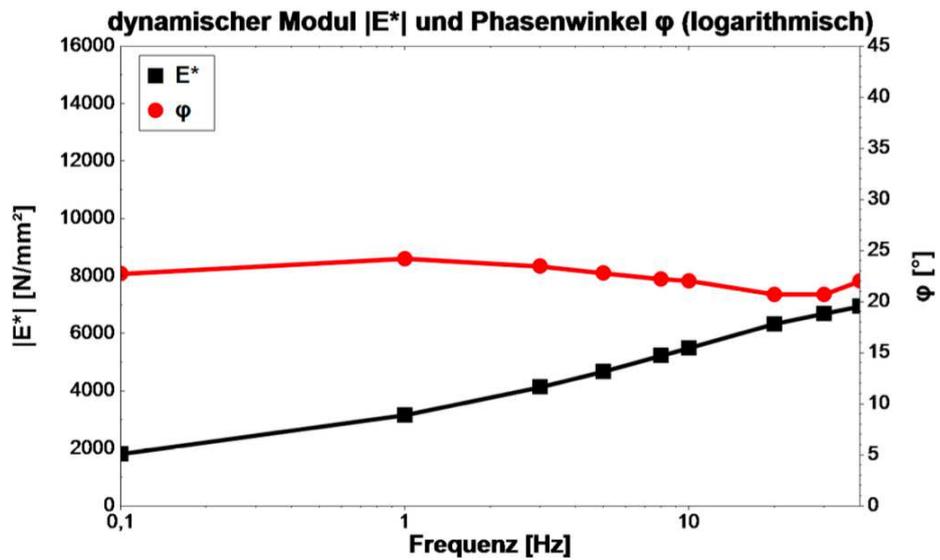
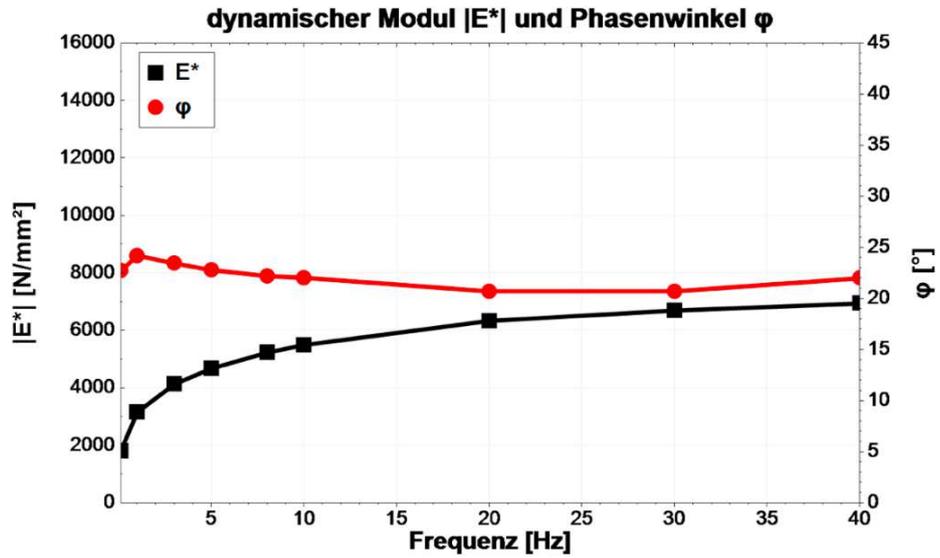
Probekörper E1154B

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [$^\circ$]
0,1	34,6	1873,33	1702,42	781,75	24,67
1	34,7	3150,50	2866,92	1299,29	24,32
3	34,9	4093,31	3745,19	1652,94	23,82
5	35,0	4615,25	4246,44	1803,60	23,03
8	35,1	5147,15	4752,37	1983,27	22,65
10	35,1	5401,66	4996,03	2053,37	22,32
20	35,2	6214,72	5793,71	2253,60	21,29
30	35,2	6507,78	6050,47	2397,69	21,62
40	35,3	6790,83	6276,06	2598,25	22,48



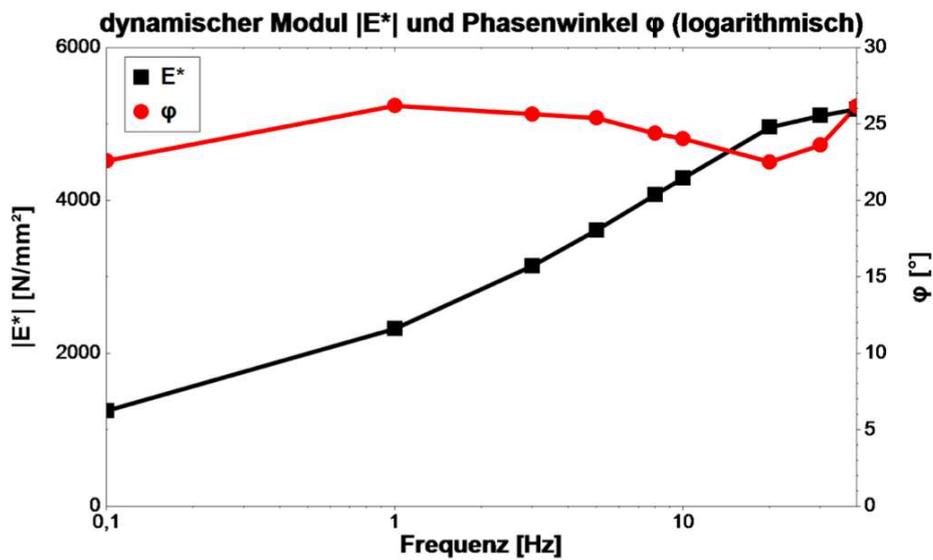
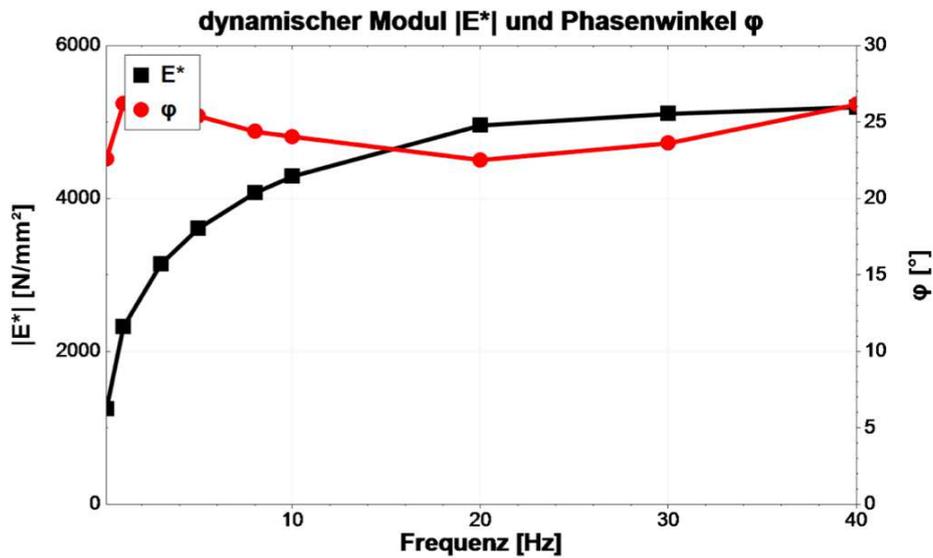
Probekörper E1154C

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [$^\circ$]
0,1	34,7	1811,89	1671,24	699,71	22,72
1	34,8	3163,95	2882,86	1296,37	24,21
3	34,9	4135,21	3795,08	1644,50	23,45
5	35,3	4679,87	4311,80	1812,91	22,79
8	35,4	5231,90	4837,64	1980,21	22,21
10	35,4	5497,99	5095,18	2065,51	22,04
20	35,5	6337,44	5930,22	2241,90	20,71
30	35,6	6697,30	6265,35	2369,93	20,72
40	35,7	6942,02	6436,48	2597,03	22,00



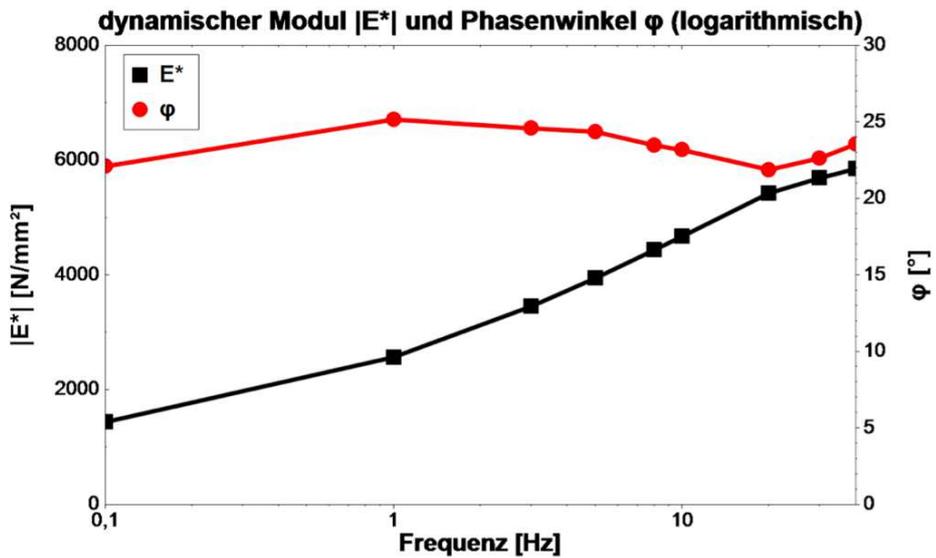
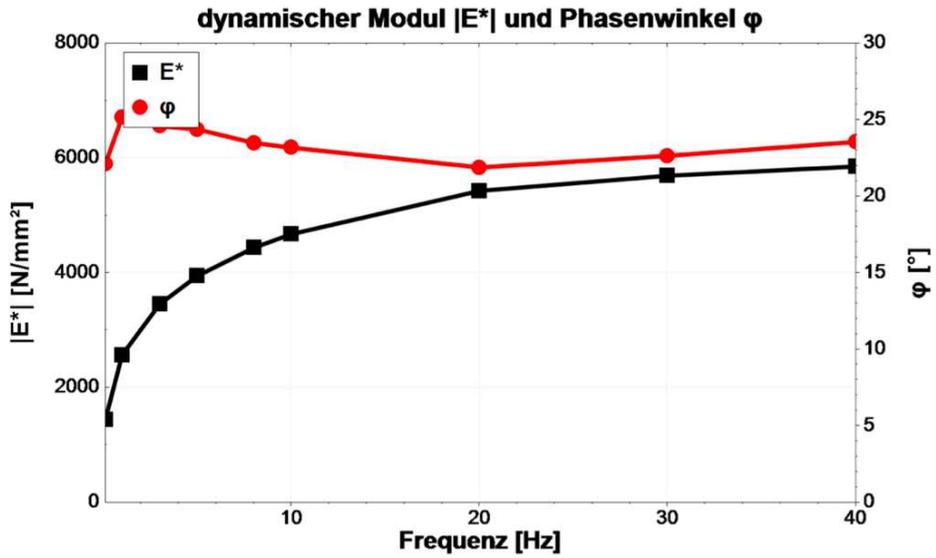
Probekörper E1155A

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [$^\circ$]
0,1	33,9	1249,68	1153,61	480,16	22,60
1	34,0	2322,97	2082,10	1025,67	26,20
3	34,2	3146,03	2834,43	1363,97	25,66
5	34,4	3612,49	3260,11	1548,91	25,40
8	34,3	4076,04	3711,61	1681,49	24,38
10	34,4	4292,05	3921,60	1747,19	24,05
20	34,6	4957,92	4582,94	1898,01	22,53
30	34,6	5108,70	4679,44	2047,59	23,62
40	34,7	5196,62	4666,92	2289,56	26,16



Probekörper E1155B

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$ E^* $ [N/mm^2]	E_1 [N/mm^2]	E_2 [N/mm^2]	ϕ [$^\circ$]
0,1	34,6	1438,72	1332,96	541,27	22,10
1	34,7	2570,06	2324,02	1091,71	25,17
3	34,9	3455,44	3148,81	1445,98	24,58
5	35,1	3945,41	3591,15	1628,56	24,37
8	34,8	4435,62	4067,92	1764,40	23,48
10	35,0	4673,26	4297,35	1841,28	23,18
20	35,1	5427,02	5037,56	2026,18	21,88
30	35,2	5690,06	5250,58	2189,89	22,64
40	35,2	5851,50	5368,10	2335,90	23,55



Probekörper E1155C

Prüfergebnisse					
f [Hz]	ϵ [$\mu\text{m/m}$]	$ E^* $ [N/mm ²]	E_1 [N/mm ²]	E_2 [N/mm ²]	ϕ [°]
0,1	34,0	1379,71	1269,39	538,06	22,96
1	34,1	2522,97	2258,90	1137,19	26,78
3	34,2	3412,31	3060,48	1520,68	26,41
5	34,5	3897,89	3520,44	1669,51	25,38
8	34,4	4401,04	4004,58	1827,30	24,51
10	34,5	4640,12	4239,09	1892,75	24,12
20	34,7	5360,91	4934,86	2099,30	23,03
30	34,7	5633,93	5154,77	2273,52	23,82
40	34,8	5801,68	5254,90	2458,75	25,07

