

DIplomARBEIT

Master's Thesis

Einfluss des Hohlraumgehalts auf das Tieftemperaturverhalten von Asphalt inklusive Prüfgeräteoptimierung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Betreuung von

Ronald Blab

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

Bernhard Hofko

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

Daniel Maschauer

Univ.-Ass. Dipl.-Ing

von

Christoph Schrittwieser, BSc

Hannah Arendt Platz 2/9, 1220 Wien

Wien, Juni 2018

Kurzfassung

Aufgrund des steigenden Verkehrsaufkommens und die daraus resultierende vermehrte Verkehrsbelastung wird das hochrangige Straßennetz im mitteleuropäischen Raum erheblich belastet. Vor allem in den Wintermonaten muss der Asphalt nicht nur der mechanischen Beanspruchung durch den Verkehr, sondern auch einer thermischen Beanspruchung, die durch tiefe Temperaturen entsteht, standhalten.

Diese Tieftemperaturen bewirken eine Veränderung der Bitumeneigenschaften, infolge wird dieses spröder und steifer. Zusätzlich zu dieser Verschlechterung altert Bitumen durch natürliche und anthropogene Einflüsse. Die Bitumeneigenschaften verschlechtern sich daher im Tieftemperaturbereich. Die Untersuchungen in dieser Arbeit sind Teil eines großen Forschungsprojektes mit dem Namen D-A-CH FFG Optimal. Ziel dieser Diplomarbeit ist es Asphaltmischgüter mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt bei tiefen Temperaturen zu untersuchen, um Aussagen über die Zugfestigkeitsreserve treffen zu können. Mittels TSRST-Prüfungen (Abkühlprüfung) und UTST-Prüfungen (einaxiale Kältezugprüfung) werden die Probekörper geprüft. Die aus diesen Prüfungen gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die Zugfestigkeitsreserve durch die Erhöhung des Hohlraumgehalts deutlich abnimmt und eindeutige Zusammenhänge zwischen Hohlraumgehalt und Spannungssituation bei tiefen Temperaturen vorhanden sind. In weiterer Folge des oben genannten Forschungsprojekts wird diese Parameterstudie dazu verwendet, um die Ergebnisse von gealterten Probekörpern hinsichtlich des Tieftemperaturverhaltens miteinander vergleichen zu können. Ziel ist es, Aussagen über die Auswirkung der Alterung auf die rheologischen Eigenschaften des Bitumens bzw. Asphaltmischguts treffen zu können, um in weiterer Folge den Mechanismus der Alterung in die rechnerische Dimensionierung zu implementieren.

Im Zuge dieser Parameterstudie wurde mit zwei Prüfgeräten gearbeitet (Baujahr 2003 und 2013) und herausgefunden, dass unterschiedliche Ergebnisse bei den Bruchtemperaturen trotz Probekörper aus gleicher Asphaltplatte auftreten. Hier galt es herauszufinden, woher diese Ergebnisunterschiede kommen und wie die Maschinen angeglichen werden können. Als primärer Einflussfaktor wurde die unterschiedliche Luftgeschwindigkeit innerhalb der Kammer verifiziert. Durch unterschiedliche Umbauten in der Prüfkammer konnte die Differenz der Ergebnisse deutlich verbessert werden.

Abstract:

Due to increased traffic and consequently, high traffic loading, the high level road network in the Central and Western Europe is becoming increasingly overloaded. Particularly during winter the asphalt pavements do not only have to withstand traffic-related mechanical stresses but also thermal stresses (cryogenic stresses) caused by low temperatures.

These low temperatures cause a change in bitumen properties so that it becomes more brittle and stiffer. In addition to this phenomenon, bitumen ages due to natural and anthropogenic influences. Thus, the bitumen properties deteriorate further in the low-temperature range.

The investigations in the present thesis are part of a research project called D-A-CH FFG Optimal. The goal of this thesis is to investigate bituminous mixtures with different void contents at low temperatures in order analyze the impact of air void content on the tensile strength reserve.

The specimens were investigated by means of TSRST tests (= Tensile Stress Restrained Specimen Test) and UTST tests (= Uniaxial Tensile Strength Test). The information resulting from such tests show that the tensile strength reserve decreases due to an increase in void content. Furthermore, it can be observed that there is a strong correlation between void content and the stress situation at low temperatures. This parameter study will serve as a means of comparing the results of aged specimens with regard to their low-temperature behavior in the further course of the research project. The aim is to make an informed statement about the impact of ageing on the asphalt mix properties at low temperatures. Consequently, the mechanism of ageing will be implemented in the pavement design guidelines.

As this parameter study evolved, two types of equipment (built in 2003 and 2013) were used. Although the specimens were made of the same asphalt plates, different results regarding the cracking temperature were found. The aim was thus to find the cause for these differences in temperature and to figure out how to align the machines. The different air velocity within the temperature chamber was identified as the decisive factor. By means of various modifications of the test chamber, it was possible to significantly minimize the differences between the results from old and new test device.

Danksagung:

Ich möchte mich beim gesamten Team des Labors des Forschungsbereichs für Straßenwesen an der Technischen Universität Wien bedanken, die es mir ermöglicht haben, dort eine spannende Diplomarbeit zu schreiben. Vom ersten Tag an wurde ich herzlich empfangen und sofort ins Team integriert. Das ganze Laborteam nahm sich stets Zeit für meine Fragen oder Problemstellungen seitens der Prüfmaschinen und versuchte sie zu lösen.

Ein großer Dank gilt Univ.-Ass. Dipl.-Ing Daniel Maschauer, der mich von Anfang an optimal bei der Diplomarbeit betreut hat. Jeder Zeit konnte ich mir einen Rat holen und mich mit ihm austauschen, wenn ich nicht mehr weiter wusste. Besonders bedanken möchte ich mich bei Bernhard Hadler, der mich optimal für die Prüfgeräte eingeschult hat und mir auch bei Herausforderungen stets zur Hilfe stand.

Ein weiterer großer Dank gilt auch dem Laborleiter Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko, der immer ein offenes Ohr für mich hatte und bei vielen wissenschaftlichen Themen immer eine Antwort oder Erklärung parat hatte.

Trotz des engen Zeitplans werde ich die Monate, die ich im Labor für Straßenwesen verbracht habe immer in schöner Erinnerung behalten.

Besonders herzlich möchte ich mich auch bei meiner Freundin Carina bedanken, die während der Studienzeit immer an mich geglaubt und mich bei meinem Werdegang unterstützt hat.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die es mir ermöglichte zu studieren und mich während meiner Studienlaufbahn immer unterstützt und begleitet hat.

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	6
2. Stand der Technik	7
2.1 Bitumen	8
2.1.1 Arten von Bitumen	8
2.1.2 Eigenschaften von Bitumen.....	9
2.2 Asphalt	12
2.3 Asphalttypen.....	12
2.4 Empirische Prüfverfahren	15
2.4.1 Bitumenprüfungen	15
2.4.2 Asphaltprüfungen	18
2.5 GVO Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren	21
2.5.1 Bitumenprüfung	21
2.5.2 Asphaltprüfung.....	24
3. Parameterstudie: Tieftemperaturverhalten in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt	30
3.1 Verwendete Materialien	30
3.2 Sieblinie der Probekörper	32
3.3 Probekörperherstellung / Vorbereitung	33
3.3.1 Vorbereitung	33
3.4 Gerätebeschreibung des TSRST und UTST Versuchs.....	36
3.5 Ergebnisse und Interpretation.....	42
3.5.1 Zugfestigkeit im Verhältnis zum Hohlraumgehalt bei UTST-Versuchen	42
3.5.2 Bruchspannungen im Verhältnis zum Hohlraumgehalt bei TSRST-Versuchen	45
3.5.3 Zugfestigkeitsreserve	49
4. Optimierung der Prüfeinrichtung zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse .	52
4.1 Überprüfung des IST- Stands	53
4.2 Optimierung der Prüfgeräte	57

4.3	Start des Prüfvorgangs mit Probekörpern	61
5.	Conclusio und Ausblick.....	64
6.	Literaturverzeichnis.....	66
7.	Abbildungsverzeichnis.....	68

1. Einleitung

Aufgrund des steigenden Verkehrsaufkommens und die dadurch resultierende vermehrte Verkehrsbelastung ist es heutzutage im Asphaltstraßenbau sehr wichtig optimale Mischgüter für unterschiedliche Einsatzbereiche zu verbessern und weiter zu entwickeln.

Erheblichen Beitrag zu dieser Dauerbelastung im hochrangigen Straßennetz, liefert vor allem der Güterverkehr, dazu zählt einerseits der Inlandsverkehr, aber auch der Transitverkehr. Zusätzlich lastet im mitteleuropäischen Raum auf dem Asphaltmischgut nicht nur die durch den Verkehr entstandene mechanische Beanspruchung, sondern auch eine thermische Beanspruchung (durch extreme Witterungsverhältnisse). In den verschiedenen Jahreszeiten können Temperaturunterschiede von -30°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ auftreten. Folglich treten je nach Temperaturbereich unterschiedliche Versagensmechanismen auf.

Während sich im Hochtemperaturbereich an der Deckschicht durch hohe Verkehrslasten Verformungen, genannt Spurrinnen bilden (Abb. 2), können im Tieftemperaturbereich entlang der Lasteinleitungsbereiche Längsrisse auftreten, wie in Abb. 3 zu erkennen. Durch die niedrigen Temperaturen in den Wintermonaten treten auch häufig Tieftemperaturrisse quer zur Fahrbahn auf. Diese Rissform tritt auf, wenn die Asphaltstraße die sich aufbauenden kältebedingten Zugspannungen nicht mehr ausreichend relaxieren kann. Zusätzlich zu den oben genannten Risstypen kann es bei Dauerbeanspruchung auch zu einer Materialermüdung kommen, welche alle Schichttypen einer Asphaltstraße schädigen. Diese werden Netz- oder Ermüdungsrisse genannt und sind in Abb. 1 zu entnehmen. [2][6][22][42]



Abb. 1: Ermüdung [43] nach [22]



Abb. 2: Verformung [42] nach [22]



Abb. 3: Tieftemperatur [43] nach [22]

Diese Diplomarbeit widmet sich den Anforderungen an den Asphalt im Tieftemperaturbereich. Als Teil des Forschungsprojektes „D-A-CH FFG Optimal“ wird eine Vorstudie ausgearbeitet, in der der Einfluss des Hohlraumgehaltes eine wesentliche Rolle spielt. In diesem Forschungsprojekt werden unter anderem die Eigenschaften der gealterten Probekörper hinsichtlich des Tieftemperaturverhaltens untersucht und dann mit den gewonnenen Ergebnissen der Vorstudie (Tieftemperaturverhalten in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt) verglichen. Ziel ist es Aussagen treffen zu können wie sich die Alterung auf die rheologischen Eigenschaften des Bitumens bzw. Asphaltmischguts auswirkt, um in weiterer Folge den Mechanismus der Alterung in die rechnerische Dimensionierung zu implementieren.

Während dieser Vorstudie, die den primären Teil der Diplomarbeit darstellt, bei der zwei Prüfgeräte im Einsatz sind, zeigte sich ein nicht gänzlich unbekanntes Problem. Da diese Geräte zwar vom selben Hersteller sind, aber nicht gleichen Baujahrs, gibt es Unterschiede bei Form und Größe der Abkühlkammer. Aus diesem Grund unterscheiden sich auch die Prüfergebnisse. Diese Problemstellung gilt es im zweiten Teil der Diplomarbeit mittels Optimierung der Prüfeinrichtung zu beheben. Ziel ist es die Ergebnisse beider Geräte anzupassen, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Da beide Geräte die Voraussetzung der Prüfnorm EN 12697-46 erfüllen, besitzt dieses Problem eine große Tragweite im europäischen Raum. In weiterer Folge können Erkenntnisse dieser Arbeit herangezogen werden, um die genannte Norm in Hinblick auf die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Prüfgeräte zu verbessern.

Die Ergebnisse der Vorstudie mit dem Namen „Einfluss des Hohlraumgehalts auf das Tieftemperaturverhalten von Asphalt inklusive Prüfgeräteoptimierung“ werden auf dem alten Prüfgerät, bei dem es einen größeren Erfahrungshintergrund gibt, erarbeitet. [6][22][26][42]

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik näher beleuchtet und detailliert auf die Eigenschaften von Bitumen und Asphalt eingegangen. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Prüfverfahren beschrieben, welche in empirische und gebrauchsvorhaltensorientierte Verfahren unterteilt sind.

2.1 Bitumen

Als Bitumen wird das Nebenprodukt bezeichnet, das bei der Aufbereitung des Rohöls im Raffinerieprozess überbleibt. Durch mehrmalige Destillation werden im ersten Schritt hochwertige Komponenten, wie Diesel, Benzin oder Kerosin gewonnen. Im nächsten Destillationsschritt entstehen Gase und Schmieröle zur weiteren Verwendung. Anschließend bleibt ein Destillationsrückstand in Form von Bitumen über. Diese organische Substanz, welche in der Regel dunkelfarbig und klebrig ist, ist nicht flüchtig, nahezu geruchslos, nicht wasserlöslich und verändert ihr viskoelastisches Materialverhalten mit der Temperatur.

Verwendung findet Bitumen primär als Bindemittel im Asphaltstraßenbau, je nach Einsatzgebiet, ob auf stark oder schwach befahrenen Straßen, unterscheidet man die Wahl des Bitumens nach dessen unterschiedlichen Eigenschaften die im Kapitel 2.1.2 näher beleuchtet werden. Zur weiteren Verwendung wird Bitumen auch als Bindemittel in Abdichtungsbahnen für Dach- oder Kellerbereich verwendet. [1][3][6]

2.1.1 Arten von Bitumen

Straßenbaubitumen

Jene Bitumenarten, die zur Herstellung und Instandsetzung von Verkehrsflächen verwendet werden, weisen die Bezeichnung Straßenbaubitumen auf. Für eine Einteilung der Bitumensorten dient das Verfahren der Nadelpenetration nach EN 1426 als Grundlage, die ein Maß für die Härte des Bindemittels darstellt. Je nach Herstellungsart des Bitumens erhält man unterschiedliche Eigenschaften, die für verschiedene Einsatzbereiche im Asphaltstraßenbau benötigt werden. Während ein Destillationsbitumen die Eigenschaften von weichem bis mittelhartem Bitumen aufweist, erhält man hingegen beim Hochvakuumdestillationsprozess, welches durch Verwendung eines erhöhten Vakuums hergestellt wird, ein hartes bis sprödes Bitumen. Eine weitere Herstellungsart für Bindemittel ist das Oxidationsverfahren, bei dem in weiches Bitumen Sauerstoff eingeblasen wird. Dadurch wird das Bitumen deutlich härter und zeigt merklich ausgeprägte elastische Effekte. Das Einsatzgebiet für Oxidationsbitumen ist unter anderem die Beschichtungen oder Verklebungen im Dachbereich, da dort sehr hohe als auch tiefe Temperaturen auftreten können. Aufgrund der in Österreich herrschenden

Temperaturspanne werden häufig Destillationsbitumen mit den Sorten 35/50, 50/70 und 70/100 verwendet. [1][3][7]

PmB – Polymermodifiziertes Bitumen

Als Polymermodifizierte (=PmB) Bitumen werden Bitumen bezeichnet dessen rheologische Eigenschaften durch Zugabe von organischen Polymeren verändert wurden, um eine verbesserte Verformungsbeständigkeit, sowie eine günstigere Langzeitalterung hervorzurufen. Dieser Einfluss auf das Temperatur-Viskositäts-Verhalten des Bitumens, erzielt in weiterer Folge einen höheren Erweichungspunkt und somit auch ein härteres Bitumen. Durch den zu erwartenden tieferen Brechpunkt, sowie einer folglich größeren Plastizitätsspanne des PmB Bitumens, wird darauf geschlossen, dass sich das Tieftemperaturverhalten, sowie eine geringere Temperaturempfindlichkeit gegenüber herkömmlichen Bitumen deutlich verbessern.

Da auf stark frequentierten Straßen in Österreich häufig mit polymermodifizierte Bitumen als Bindemittel gearbeitet wird, werden auch die in Versuchen vorbereiteten Probekörper für die Parameterstudie dieser Diplomarbeit, aus diesem Bitumen gefertigt. [1][3]

2.1.2 Eigenschaften von Bitumen

Für den Asphaltstraßenbau werden die im Labor gewonnen Ergebnisse der Bitumenprüfungen in folgende Eigenschaftsgruppen unterteilt, die in der Praxis von großer Bedeutung sind. [3]

- Verformungsverhalten/ Konsistenz
- Haftverhalten
- Alterung

Verformungsverhalten/ Konsistenz

Zur Klassifizierung von Bitumen ist einer der wichtigsten Eigenschaften die Konsistenz. Sie bestimmt die Randbedingungen zur weiteren Verarbeitung des Baustoffes. Durch verschiedene empirische Verfahren, wie zum Beispiel der Penetration, dem Erweichungspunkt oder dem Brechpunkt nach Fraaß, kann das Verformungsverhalten überprüft werden.

Das Bitumen unterliegt zwei physikalischen Gesetzen, nämlich der Viskosität und der Elastizität. Die Viskosität wird beeinflusst von der Temperatur, der Belastungsgeschwindigkeit und -dauer. Bei niedrigen Temperaturen verhält es sich spröde und hart. Je höher die Temperatur ansteigt, desto viskoser wird das Material bis es schließlich, abhängig von der Bitumensorte, zwischen 160°C und 190°C in den flüssigen Zustand übergeht. Bei stetiger Belastung verhält sich das Bitumen viskos und es entstehen irreversible Verformungen. Während bei kurzen Belastungszeiten elastische Verformungen hervorgerufen werden. Darüber hinaus verhält sich das Bitumen bei schneller Belastungsgeschwindigkeit steifer als bei langsamer Belastung. [1][3]

Eine weitere besondere Eigenschaft des Bitumens ist ihr Relaxationsvermögen. Das bedeutet, dass ein Werkstoff durch sein visko-elastisches Verhalten fähig ist aufgezwungene Beanspruchungen durch viskose Verformungen abzubauen. Der Spannungsabbau erfolgt daher zeitabhängig. Je weicher die Bitumensorte, desto schneller erfolgt der Abbau der Spannungen. Wie rasch aufgezwungene Beanspruchungen abgebaut werden hängt auch vom viskosen Verhalten des Bitumens ab. Genutzt wird dieses Phänomen in der Praxis vor allem bei Bauteilen, die in den Wintermonaten stark abkühlen und sich zugleich thermisch nicht verkürzen können. Die entstehenden kryogenen Zugspannungen können durch die Relaxationsverformungen des Bitumens abgebaut werden. Deshalb können auch Asphaltstraßen im Gegensatz zu Betonstraßen fugenlos gefertigt werden. [1][3]

Haftverhalten

Bitumen übernimmt in nahezu allen Anwendungsbereichen die Aufgabe des Klebemittels oder Bindemittels. Die Eigenschaft des Haftverhaltens von Bitumen und Gestein ist deshalb von großer Bedeutung, da ein Wechselwirkungsprozess stattfindet. Durch äußere Einflüsse wie Staub oder Feuchtigkeit kann das Haftverhalten deutlich herabgesetzt werden. Um diesem Umstand entgegen zu wirken, werden beim Mischprozess immer getrocknete und gereinigte Gesteine verwendet. Darüber hinaus soll das Bitumen die einzelnen Gesteinskörner vollständig umhüllen, um feste Bindung zu gewährleisten. [1]

Alterung

Durch äußere Einflüsse kann die Bitumenalterung in zwei wesentliche Prozesse eingeteilt werden. Unterschieden wird in Kurzzeitalterung und Langzeitalterung des Bitumens. Die Kurzzeitalterung, auch destillative Alterung genannt, wird durch den Einfluss von hohen Temperaturen und die Einwirkung von Luftsauerstoff hervorgerufen. Dadurch verdunsten verbliebene, niedrigsiedende Komponenten. Dieser Alterungsvorgang kann beispielsweise bei der Asphaltherstellung und dem -einbau verursacht werden. Bei der Langzeitalterung, auch oxidative Alterung genannt, wird die chemische Reaktion durch Einwirken von atmosphärischen Gasen, wie Sauerstoff, Ozon oder Stickoxiden und der UV -Strahlung hervorgerufen. Durch diese Alterung ist eine Verhärtung und Versprödung des Materials feststellbar. [1][3]

Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip

Das Bitumen gehorcht den physikalischen Gesetzen der Viskosität und der Elastizität. Das bedeutet bei einem visko-elastischen Material ist eine Abhängigkeit zwischen Belastungsgeschwindigkeit und Prüftemperatur zu erkennen. Wie bereits in Punkt „2.1.2 Eigenschaften von Bitumen“ erwähnt, verhält sich Bitumen bei schnellen Belastungsgeschwindigkeiten, also bei einer hohen Frequenz steifer als bei langsamer Belastung, also bei einer geringen Frequenz. Beim Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip wird die Frequenz konstant gehalten und die Temperatur variiert. Zu erkennen ist, dass das Material bei gleichbleibender Frequenz und höheren Temperaturen weicher und bei tieferen Temperaturen steifer wird.

Da das Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip besagt, dass eine Änderung der Temperatur äquivalent zu einer Änderung der Frequenz ist, kann mithilfe von wenigen Versuchen bei variierender Frequenz und Temperatur eine Masterkurve erstellt werden. Mit dieser Kurve können alle aussagekräftigen Kombinationen aus Temperatur und Frequenz vorausgesagt werden. [38][39]

2.2 Asphalt

Als Asphalt wird ein Gemisch aus bituminösem Bindemittel in Kombination mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen bezeichnet. Diese Zusammensetzung wird in der Fachliteratur als Asphaltmischgut bezeichnet. Infolge der Einbautemperaturen wird in vier Bereiche unterschieden. Als Kaltmischgut werden Asphalte bezeichnet, die bei $<30^{\circ}\text{C}$ eingebaut werden. Der nächste Bereich von $40\text{-}120^{\circ}\text{C}$ wird als Warmeinbau bezeichnet. Als dritter Bereich werden die temperaturabgesenkten Asphalte beschrieben, die eine Einbautemperatur von $100^{\circ}\text{C}\text{-}130^{\circ}\text{C}$ aufweisen. Als letzter und größter Teil der im Straßenbau verwendeten Asphalte werden dem Heißmischgut zugeordnet. Die Einbautemperaturen liegen in etwa bei 130°C bis 200°C . Wobei sich die Mischung im Asphaltstraßenbau aus ungefähr aus 93-96 M-% Gestein und 4-7 M-% Bitumen zusammensetzt. In der Regel besteht ein Asphaltaufbau aus drei Schichten, die unterschiedliche Funktionen aufweisen. [1][4]

- Deckschicht: Dient dazu die direkten Verkehrslasten aufzunehmen und schützt die anderen Schichten (geringerer Größtkornanteil und Hohlraumgehalt).
- Binderschicht: Einsatzgebiet im hochrangigen Straßennetz, hat die Eigenschaft die Deckschicht und Tragschicht zu verbinden.
- Tragschicht: Mächtigste Schicht, welche die Belastung direkt in den Untergrund weiterleitet. Weist in der Regel den größeren Hohlraumgehalt und Größtkornanteil gegenüber der Deckschicht auf.

Neben der kontrollierten Ableitung des Oberflächenwassers, übernimmt der Asphalt die Aufgabe, die durch äußere Belastungen auftretende mechanische Beanspruchung aufzunehmen und über die verschiedenen Schichten abzuleiten. Zudem soll die Asphaltstraße dem Nutzer eine langlebige und sichere Oberfläche bieten und eine bequeme Fahrt sicherstellen. [1][4][5]

2.3 Asphalttypen

Je nach Anforderungsbereich und Funktion gibt es unterschiedliche Asphalttypen. Wesentliche Merkmale zur Unterscheidung der verschiedenen Asphalttypen sind die

Korngrößenzusammensetzung, der Bindemittelgehalt, der Hohlraumgehalt und die Mischgutzusammensetzung. [1][5]

Asphaltbeton AC

Der Asphaltbeton hat die Eigenschaften eines stetigen Gesteinskorngerüsts, das die Aufgabe der Spannungsverteilung übernimmt.

Die Sieblinie soll bestmöglich der Fuller Parabel entsprechen, um die dichteste Packung der Gesteinskörner zu erzielen. Eingesetzt wird dieser Asphalttyp in Deckschichten und Tragschichten, wobei sich der Hohlraumgehalt deutlich unterscheidet. Die Deckschicht, auf welche direkte Verkehrslasten einwirken, weist einen Hohlraumgehalt von circa 2,5% auf. Einen deutlich höheren Hohlraumgehalt weist hingegen die Tragschicht mit circa 6,0% auf. Ein Asphaltbeton kommt häufig bei geringen und mittleren Verkehrsbelastungen zur Anwendung, ist jedoch nicht für hohe Verkehrsbelastungen konzipiert. Durch die wasserdichte Oberfläche, die durch den Walzprozess entsteht, wird die Langlebigkeit dieses Asphaltmischgutes deutlich verbessert. [1][4][5]

Gussasphalt

Gussasphalt besitzt unter den angeführten Asphalttypen den höchsten Anteil an Bitumen. Dieser beläuft sich auf rund 8%. Eine besondere Eigenschaft dieses Typs ist es, dass die Hohlräume zwischen dem Gesteinsgerüst vollständig mit Bitumen umhüllt werden und somit der Hohlraumgehalt technisch bei 0% liegt. Um die Verformungsstabilität zu verbessern werden in der Regel härtere Bindemittel verwendet. Im heißen Zustand verhält sich das Mischgut flüssigkeitsähnlich, ist also gieß- und streichbar und somit auch selbstverdichtend. Der Gussasphalt wird je nach Größtkorn unterteilt. Gussasphalte mit der Bezeichnung GA4 und GA8 werden oft für Gehwege mit geringer Belastung verwendet, während GA11 bei Straßen mit hoher Verkehrsbelastung verwendet wird. [1][4][5]

Splittmastixasphalt

Dieser Asphalttyp wurde speziell für hohe Verkehrsbelastungen konzipiert. Durch die Verwendung von qualitativ hochwertigen, gebrochenen Gesteinsmaterialien wird eine hohe

Standfestigkeit des Asphalttyps erreicht, der eine hohe Witterungs- und Ermüdungsbeständigkeit aufweist. Die Sieblinie definiert sich durch eine Ausfallskörnung im Sand- und Feinsplittbereich bei gleichzeitig hohem Füllergehalt und einem hohen Splittanteil. Speziell wird als Gesteinsmaterial ein hochwertiger Hartsplitt verwendet.

Dieser Asphalttyp weist einen höheren Bindemittelgehalt von $\geq 6,5$ M% auf, weshalb auch die Hohlräume weitgehend von Mastix, also Bitumen und Füller, ausgefüllt werden. Um die mangelnde Griffigkeit, verschuldet durch den hohen Bindemittelgehalt, in den ersten Monaten zu verbessern, wird beim Verdichtungsprozess zusätzlich Abstreusplitt mit der Körnung 4/8 oder 2/4 eingewalzt. Splittmastixasphalt wird im Asphaltstraßenbau als Deckschicht verwendet. [1][4][5]

Drainasphalt

Der Drainasphalt, welcher auch offener Asphalt genannt wird, hat die Eigenschaft eine extreme Ausfallskörnung zu besitzen. Weiters wird dieser Asphalttyp durch einen großen Anteil an Hohlräumen von etwa 17 bis 25-Vol. % gekennzeichnet. Dieser Hohlraumgehalt wird durch Erhöhung des Grobsplittanteils, bei ausreichender Stabilität erreicht. Möglich gemacht wird das durch die hohe Qualität an Gesteinskörnungen, die zur Herstellung verwendet werden. Der spezielle Aufbau des Asphaltmischgutes hat zwei spezielle Vorteile.

- Oberflächenwasser wird durch den Belag geleitet und an der darunterliegenden dichten Schicht aufgefangen und an den Straßenrand abtransportiert.
- Rollgeräusche des Verkehrs werden durch Verschiebung der Frequenz in tiefere, weniger störende Bereiche reduziert. Im optimalen Fall wird eine Lärminderung von drei bis sechs Dezibel erzielt.

Zwei erhebliche Nachteile hingegen sind:

- Raschere Alterung des Bitumens infolge des hohen Hohlraumgehalts
- Vermehrter Winterdienst infolge von höherem Einsatz von Streusalz

Der Drainasphalt wird im Straßenbau ausschließlich für Deckschichten verwendet und beschränkt sich auf Autobahnabschnitte, welche besonderen Anforderungen, wie dem Lärmschutz unterliegen. [1][4][5]

2.4 Empirische Prüfverfahren

2.4.1. Bitumenprüfungen

Empirische Prüfverfahren sind Methoden, die mit einem geringen Aufwand, zügig und preiswert, Eigenschaften von Bitumen charakterisieren. Jedoch sind diese Methoden auch kritisch zu hinterfragen, da sie keine Aussagen über tatsächliche Materialparameter, wie der Steifigkeit oder dem Phasenwinkel treffen können. In diesen konventionellen Prüfverfahren fließen keine realitätsnahen Parameter, wie der Klimaverhältnisse oder Art der Belastung ein. [3][6]

Penetration (Pen)

Diese Prüfmethode, welche in der Norm EN 1426 beschrieben wird, dient zur Bestimmung des Härtegrades der Bindemittel. Eine genormte Nadel wird auf eine 25°C erwärmte Bitumenprobe aufgesetzt und mit einer Gesamtbelastung von 100g in die Probe gedrückt. Nach einer Zeitdauer von fünf Sekunden wird die Einsinktiefe gemessen. Dieses Ergebnis wird in Zehntel Millimetern gemessen und dient zur Klassifizierung der verschiedenen Härtegrade der Bitumensorten.[3][6][7][44]

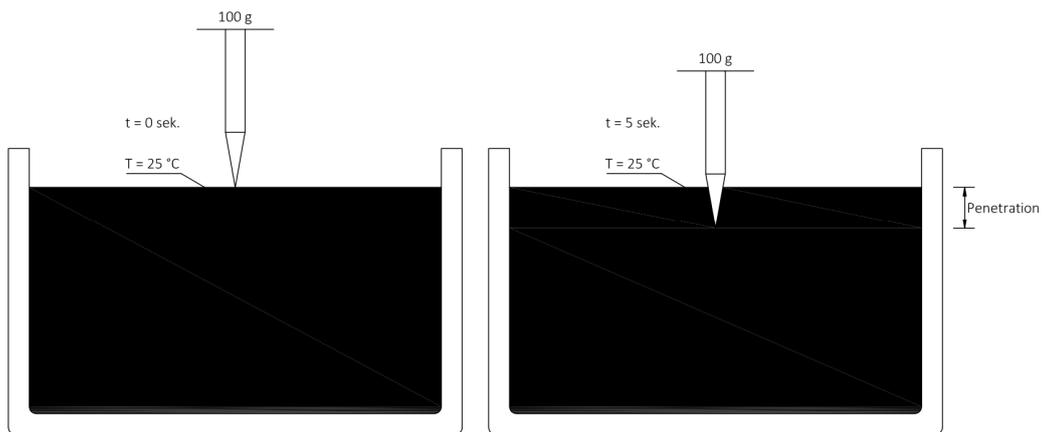


Abb. 4: Systemskizze der Nadelpenetration [43] nach [7]

Erweichungspunkt Ring - Kugel (EP RuK)

Mit dieser Methode wird das Wärmeverhalten von Bitumen untersucht. In der Norm EN 1427 wird der Prüfvorgang des Verfahrens Erweichungspunkt Ring-Kugel detailliert festgelegt. Zwei metallische Ringe mit definiertem Durchmesser werden mit Bitumen gefüllt und in einem Flüssigkeitsbad gleichmäßig erwärmt. Auf diesen Bitumenproben werden Metallkugeln mit definiertem Gewicht aufgesetzt, die durch die Erwärmung der Flüssigkeit Verformungen hervorrufen. Tritt laut Norm eine Verformung von $25 \pm 0,4 \text{ mm}$ auf wird die vorhandene Temperatur gemessen. Diese Temperatur wird in °C gemessen, Erweichungspunkt genannt und stellt die obere Grenze der Gebrauchsspanne dar. Je höher die gemessene Temperatur, desto härter ist das Bitumen. Bei diesem Verfahren liegt der Erweichungspunkt unterschiedlicher Bindemittel zwischen 30°C bis 150°C . [1][3][6][8][44]

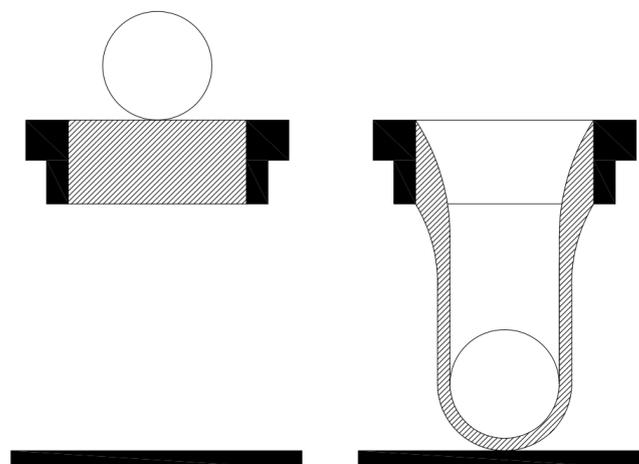


Abb. 5: Systemskizze Erweichungspunkt Ring und Kugel [43] nach [8]

Brechpunkt nach Fraaß (BP)

Diese konventionelle Prüfmethode welche in der Norm EN 12593 geregelt ist, gibt Auskunft über das Verhalten von Bitumen im niedrigen Temperaturbereich. Auf einem genormten Blech wird ein Bitumenfilm aufgetragen und bei vorgegebene Abkühlgeschwindigkeit einer Biegung ausgesetzt. Sobald die Bitumenschicht bricht wird der Prüfvorgang gestoppt und die Temperatur in °C aufgezeichnet. Dieser Temperaturbereich verdeutlicht den Übergang vom plastischen Zustand in einen starr-elastischen Zustand des Bitumens und wird als untere Grenze der Gebrauchsspanne definiert. [3][9]

Die Plastizitätsspanne wird durch die Temperaturspanne zwischen Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie Brechpunkt nach Fraaß ermittelt und kann bei herkömmlichen Bitumen 50°C bis 60°C aufweisen. Je größer die ermittelte Plastizitätsspanne, umso weitläufiger ist der Anwendungsbereich indem das Bitumen eingesetzt werden kann. [1][6][44]

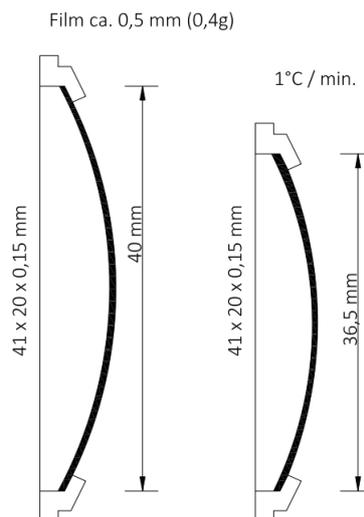


Abb. 6: Systemskizze Brechpunkt nach Fraaß [43] nach [9]

Bestimmung der Duktilität und elastische Rückformung

Bei der Ermittlung der Duktilität wird ein Straßenbaubitumen in eine, laut DIN 52013, definierte Metallform eingegossen. Nach Abkühlen der Probe werden die beweglichen Seitenteile der metallischen Form entfernt und die Bitumenprobe wird unter konstanter Geschwindigkeit in einem Wasserbad, bei definierter Temperatur, auseinander gezogen bis ein Versagen auftritt

und die Bitumenprobe durchtrennt wird. Dieses Maß, angegeben in Zentimeter, wird als Duktilität bezeichnet. [1][6][10][44]

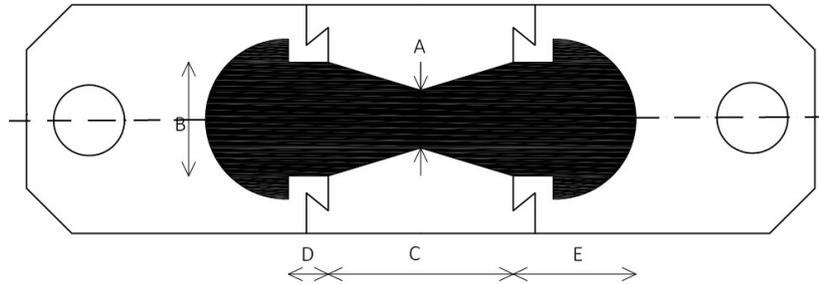


Abb. 7: Systemskizze der Gießform bei Bestimmung der Duktilität oder elastischer Rückformung [43] nach [10]

Bei der elastischen Rückformung wird die Probe eines polymermodifizierten Bitumens, wie bei der Bestimmung der Duktilität in eine metallische Form mit abnehmbaren Seitenteilen gegossen und anschließend in einem temperierten Wasserbad abgekühlt und mit konstanter Geschwindigkeit auf 20 Zentimeter auseinandergezogen. Anschließend wird die gedehnte Probe mit einer Schere durchtrennt um nach 30 Minuten die Rückformung zu messen. Dieser Versuch gibt Auskunft über den Modifizierungsgrad des Bitumens und wird in der Norm EN 13398 geregelt. [1][6][11]

2.4.2. Asphaltprüfungen

Empirische Asphaltprüfungen sind traditionelle Methoden mit einem großen Bewertungshintergrund. Im Gegensatz zu den Gebrauchsverhaltensorientierten Prüfverfahren ist die Handhabung eher einfach. Wie zuvor in den Bitumenprüfungen erwähnt fließen auch bei den Asphaltprüfungen keine realitätsnahen Einflüsse wie die Verkehrsbelastung oder der klimatischen Einflüsse in den Prüfvorgang ein. Daher können auch keine Materialspezifischen Kenngrößen, wie die Steifigkeit oder Festigkeit, abgeleitet werden. [6]

Affinität Gestein/ Bitumen

Mit dieser Methode, kann das Haftverhalten von Bitumen und Gesteinskörnungen bestimmt werden. Geregelt wird dieses Prüfverfahren in der Norm EN 12697-11. Der Start des Versuches erfolgt durch Mischen eines vordefinierten Mischguts, bis alle Gesteinskörner vollflächig mit

Bitumen umhüllt sind. Anschließend kommt die Probe in eine mit Wasser gefüllte Flasche und wird bei festgelegter Geschwindigkeit durch ein Flaschen-Rollgerät, wie in Abb. 8 zu entnehmen, gedreht. Die Auswertung erfolgt durch optische Prüfung, die anzeigt ob bei diesem Versuchsablauf mit Bitumen umhüllte Gesteinsbereiche wieder sichtbar geworden sind. Dieses Verfahren dient als Voruntersuchung um optimale Mischgutrezepturen für den jeweiligen Anwendungsbereich zu finden. Das Haftverhalten ist stark abhängig von der verwendeten Bitumensorte und der Gesteinsmineralogie.[6][13]



Abb. 8: Affinität [43] nach [13]

Spurbildungstest

Der Spurbildungstest ist eines der bekanntesten Verfahren um die Standfestigkeit verdichteter Asphaltprobekörper zu untersuchen. Wie in Abb. 9 zu sehen, wird eine genormte Asphaltplatte in die Prüfmaschine eingespannt und auf eine Temperatur zwischen 30°C und 60 °C erhitzt. Mit einem Gummi ummanteltem Stahlrad wird die Platte, laut Norm EN 12697-22, dementsprechend überrollt. Der große Vorteil des Spurbildungstests ist die veränderliche Lastaufbringung simulieren zu können. Das Ergebnis dieses Prüfverfahrens stellt die Anfälligkeit gegen bleibende Verformungen dar. Gemessen werden diese Verformungen in Millimeter. Die grafische Auswertung erfolgt in einem Diagramm in dem auf der Y-Achse die Verformung und auf der X-Achse die Überrollungen dargestellt werden. [1][6][14]



Abb. 9: Prüfaufbau des Spurbildungstests [43]

Marshall-Prüfung

Bei diesen Verfahren werden Marshallprobekörper (MPK) speziell mit einem Schlagverdichter für die Marshall Prüfung hergestellt. Wie in der Norm EN 12697-30 und EN 12697-34 beschrieben, muss der Marshallkörper einen Durchmesser von 101,6mm und eine Höhe von 63,5mm aufweisen. Diese werden in dem Verdichtungsgerät auf Verdichtungstemperatur gebracht und mit 50 Schläge aus einer Höhe von 460mm verdichtet. Mit diesen MPK kann die Raumdicke, der Marshall Fließwert und auch die Marshall Stabilität bestimmt werden. [15]

Bei der Marshall Prüfung wird wie in Abb. 10 und Abb. 11 zu erkennen ist, der zuvor auf 60°C temperierte MPK eingespannt und bei einem Druckversuch mit einer Vortriebsgeschwindigkeit von 50mm/min geprüft. Diese Marshallprüfpresse zeichnet in einem Kraft-Verformungsdiagramm die Marshall- Stabilität und den Marshall- Fließwert mit einer Schiebevorrichtung auf. Dieses Verfahren wird zumeist verwendet um Mischgutrezepturen zu optimieren. [1][6][16][17]



Abb. 10: Versuchsaufbau Marshall Prüfung [43]



Abb. 11: Einbau eines MPK [43]

2.5 GVO Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfverfahren

2.5.1 Bitumenprüfung

Im Gegensatz zu den konventionellen Bindemittelprüfungen fließen bei Gebrauchsverhaltensorientierten Prüfverfahren äußere Einflüsse, wie Temperatur, etwaige Belastungen, aber auch die Alterung des Bitumens in den Prüfvorgang mit ein. Deshalb sind solche Verfahren in der Vorbereitung und Ausführung auch komplexer. Primäres Ziel solcher Prüfverfahren ist es, Voraussagen über die Gebrauchseigenschaften des Bitumens zu erhalten. Es werden beim Prüfstart physikalische Kenngrößen des Bitumens definiert, um gewisse Eigenschaften wie die Verarbeitbarkeit, Verformbarkeit, Ermüdungsverhalten oder Tieftemperaturverhalten beurteilen zu können. [6]

Rotational Viscosimeter (RV)

Das Rotations-Viskosimeter, welche die dynamische Viskosität bestimmt, wird in der Norm EN 13302 geregelt. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Gefäß indem sich das Bitumen und eine Messspindel befindet die mit konstanter Geschwindigkeit rotiert. Um die Viskosität errechnen zu können, wird das nötige Drehmoment, das dazu dient die definierte Drehzahl aufrecht zu erhalten, gemessen.[18]

Die übliche Spindeldrehzahl liegt bei diesem Verfahren bei zirka 20 U/min und der Prüftemperaturbereich liegt zwischen 40°C und 200°C. Diese Methode dient dazu die Zähigkeit

des Bitumens herab zu setzen, um die Verarbeitbarkeit beim Pumpen des Bindemittels oder beim Mischen zu vereinfachen und den Energieaufwand zu reduzieren.[3][6]

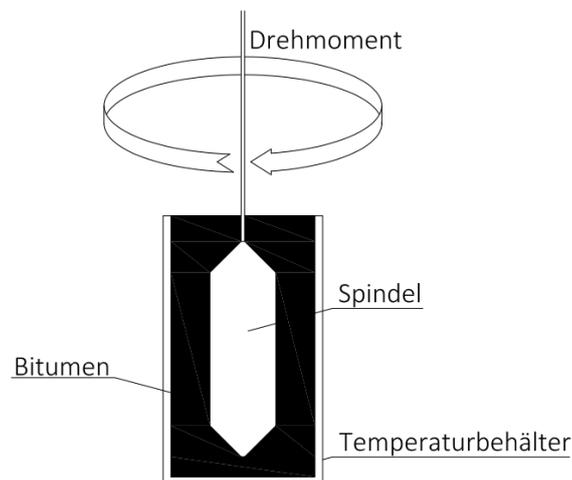


Abb. 12: Systemskizze Rotational-Viscosimeter [43] nach [18]

Dynamischer Scherrheometer (DSR)

Mit dem dynamischen Scherrheometer können rheologische Eigenschaften, wie der Schermodul G^* und der Phasenverschiebungswinkel δ ermittelt werden. Beschrieben wird dieser Versuch in der Norm EN 14770. Vor dem Versuchsstart wird, wie in Abb. 13 zu erkennen, eine Bitumenprobe zwischen zwei Platten angebracht. Während die untere Platte fest verankert ist, bewegt sich die obere Platte oszillierend hin und her. Damit wird die Bitumenprobe mittels Temperatur- und Frequenzsweep belastet und deformiert. [19]

Mit dieser Methode wird die Standfestigkeit und Verformbarkeit von Bitumen untersucht, um vorab das optimale Bindemittel für den jeweiligen Einsatzort heraus zu finden. Um Spurrinnenbildung zu vermeiden wird ein möglichst steifes und elastisches Bitumen benötigt. Das bedeutet es werden außerdem ein möglichst hohes Schermodul G^* und einen kleinen Phasenverschiebungswinkel δ benötigt. Zur Vermeidung von Ermüdungsrissen muss das Bitumen leicht verformbar, aber trotzdem elastisch bleiben. [3][6]

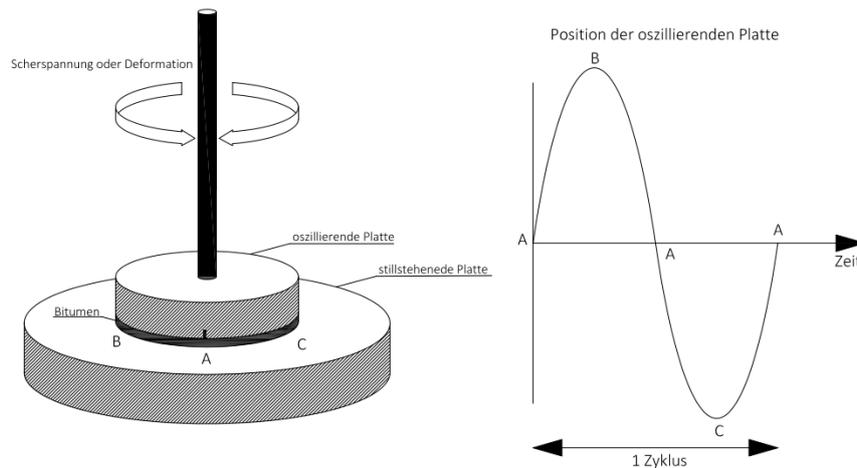


Abb. 13: Systemskizze DSR- Versuch [43] nach [19]

Bending Beam Rheometer (BBR)

Mit diesem Verfahren kann der Einfluss von Zugspannungen im Tieftemperaturbereich untersucht werden. Überschreiten die Zugspannungen die Zugfestigkeit des Asphalts, entstehen Risse. Bei diesem Versuch, welcher in der Norm EN 14771 beschrieben ist, wird an einer bitumenhaltigen Probe in Form eines Balkens, bei unterschiedlichen Belastungszeiten, in Feldmitte eine Kraft aufgetragen. Die Kraft und die daraus resultierende Dehnung werden aufgezeichnet. Daraus wird die Steifigkeit S und das Maß für die Relaxationsfähigkeit (m -Wert) errechnet. Das Ermüdungsverhalten der Bitumenprobe kann durch diesen Drei-Punkt-Biegeversuchs, zu sehen in Abb. 14, untersucht werden. [3][6][20][21]

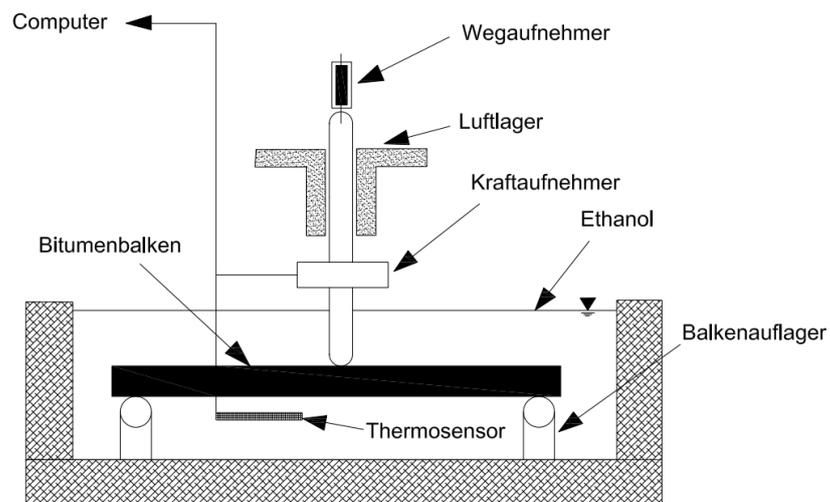


Abb. 14: Systemskizze Bending Beam Rheometer [43] nach [21]

Direct Tension Test (DTT)

Wie das Bending Beam Rheometer, ist auch der Direct Tension Test ein Verfahren um das Tieftemperaturverhalten von Bitumen zu untersuchen. In diesem direkten Zugversuch, der nicht in einer europäischen Norm verankert ist, werden die Zugdehnung und die Zugfestigkeit bei einer definierten Prüftemperatur bestimmt. Wie in Abb. 15 zu sehen ist, wird die Bitumenprobe mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1mm/min gezogen bis die Probe bricht. Neben der Kraft und der Längenänderung wird auch die Temperatur aufgezeichnet, um die Bruchdehnung errechnen zu können. Weichere Bitumen gelten eher als duktil, da sie eine hohe Bruchdehnung aufweisen. Steife Bitumen weisen hingegen eher eine geringe Bruchdehnung auf, reißen früher und sind daher sehr spröde.[6][21][22]

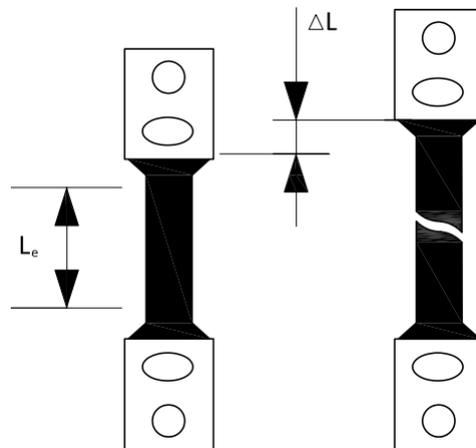


Abb. 15: Messprinzip des Direct Tension Tests [43] nach [21]

2.5.2 Asphaltprüfung

Gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) Asphaltprüfungen sind sehr komplexe und teure Methoden um die Eigenschaften der Probekörper zu untersuchen. Im Gegensatz zu den altbewährten konventionellen Prüfmethode sind GVO Prüfungen eine neuartige Entwicklung im Asphaltstraßenbau. Um Eigenschaften für Tieftemperatur, Verformung, Steifigkeit und Ermüdung näher beleuchten zu können ist ein hoher Prüfungsaufwand erforderlich. In diesem Prüfprozess kann die erwartete Verkehrsbelastung auf dem Asphalt realitätsnah das gesamte Temperaturspektrum simuliert werden und materialspezifische Kenngrößen, wie der Steifigkeit oder der Festigkeit abgeleitet werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass diese Prüfmethode vorhersagen, ob sich das Mischgut für das vorliegende Klima eignet. [6]

Vier Punkt Biegeprüfung 4PBB

Mit dem Verfahren der Vier Punkt Biegeprüfung, können die Steifigkeit aber auch die Ermüdungsfestigkeit einer Probe beurteilt werden. Geregelt wird dieses Prüfungsverfahren in den Normen EN 12697-24 und -26. Für die Prüfung der Steifigkeit werden prismatische Probekörper mit definierten Abmessungen erstellt und eine sinusförmigen Biegeprüfung angewendet. Durch die mittleren Lastpunkte, wie in Abb. 16 zu erkennen, wird eine Biegung in vertikaler Richtung hervorgerufen. Bei definierter Temperatur und Frequenz wird die für die Verformung erforderliche Kraft als Funktion der Zeit gemessen. In einem weiteren Schritt wird aus den gewonnenen Parametern der Steifigkeitsmodul errechnet. [23][24]

Die Prüfung der Ermüdungsfestigkeit erfolgt ebenfalls mit prismatischen Probekörpern bei definierter Temperatur und Frequenz. Mit zunehmender Lastwechselzahl ist eine Abnahme der für die Durchbiegung nötigen einwirkenden Kraft erkennbar. Somit nimmt die Steifigkeit ab und Materialermüdung tritt auf. Als Ermüdungskriterium gilt der halbe Steifigkeitsmodul vom Ausgangswert. [6][17]

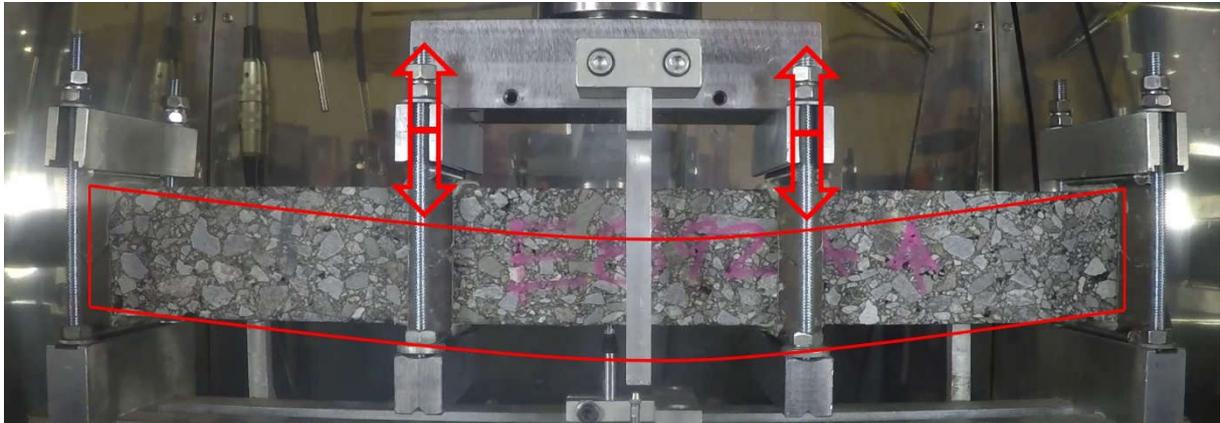


Abb. 16: Versuchsaufbau Vier Punkt Biegebalken [43]

Triaxiale zyklische Druckschwellenprüfung (TCCT)

Dieses gebrauchsvorhaltensorientierte Prüfverfahren wird eingesetzt um die Beständigkeit gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen zu ermitteln. Wie in der Norm EN 12697-25 zu entnehmen ist, werden zylinderförmige Probekörper auf eine definierte Temperatur gebracht und in ein Triaxial-Prüfgerät gespannt. Im ersten Schritt wird die Probe

einem statischen Zelldruck σ_c ausgesetzt, anschließend werden die Axiallasten $\sigma_A(t)$ angesetzt, wie in Abb. 17 zu erkennen. Das Ergebnis ist ein Kriechkurvendiagramm, welches durch die bleibenden axialen Verformungen in Abhängigkeit der Lastwechsel auf dem Probekörper, entsteht. Mithilfe dieser Kriechkurve wird die Kriechrate f_c ermittelt. Je größer diese Kriechrate ausfällt, desto anfälliger ist der Probekörper auf bleibende Verformungen. [6][17][25]

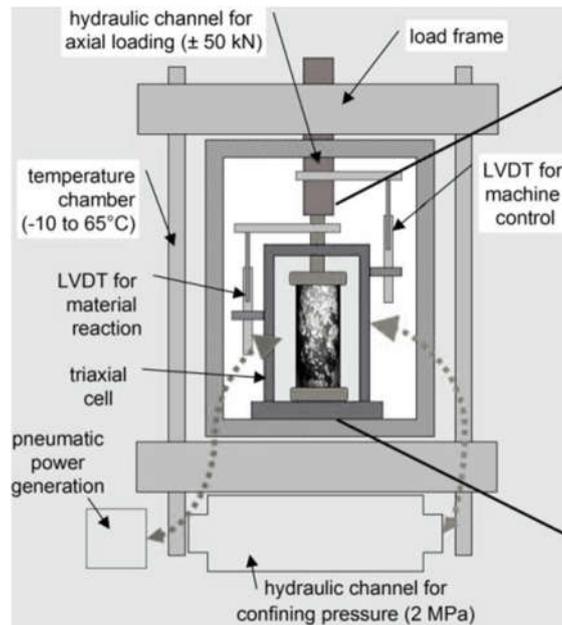


Abb. 17: Systemskizze Prüfaufbau TCCT [6]

Einaxiale Kältzugprüfung UTST (Uniaxiale Tensile Strength Test)

Dieser Versuch ist für das Verhalten des Asphalts im Tieftemperaturbereich entwickelt worden. Der Einbau des Probekörpers erfolgt bei +10°C. Ab dem Start des Versuchs wird die Probe mit 10°C/h abgekühlt. Im Gegensatz zur TSRST-Prüfung wird, bei Erreichen einer definierten Temperatur, der Probekörper bei der axialen Zugprüfung (UTST) aktiv mit einer konstanten Zuggeschwindigkeit von 1mm/min auseinandergezogen. Das Ergebnis davon ist ein Diagramm mit der Zugfestigkeit (MPa) auf der Y-Achse und der Ausfalldehnung in Prozent (%) auf der X-Achse. Diese Methode simuliert wie rissresistent das Asphaltmischgut ist. In der Norm EN 12697-46 wird dieser dynamische Zugversuch beschrieben. Da dieser Versuchsablauf für diese Diplomarbeit hauptsächlich in Verwendung ist, wird dieser in *Kapitel 3.4*, noch ausführlich beleuchtet. [6][17][22][26]

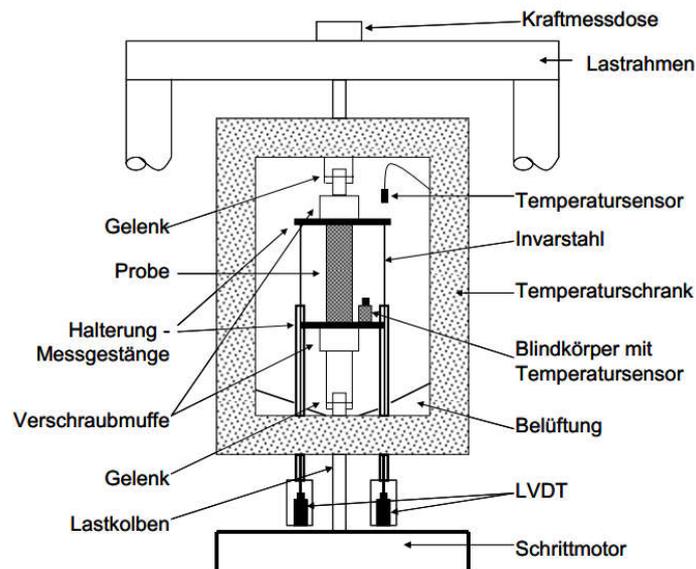


Abb. 18: Systemskizze des UTST & TSRST Versuchs [22]

Zugversuche mit unterschiedlicher Zuggeschwindigkeiten und Temperatur

Laut Norm EN 12697-46 wird beim UTST-Test stets mit einer konstanten Zuggeschwindigkeit von 1mm/min gezogen. Jedoch gibt es weitere Untersuchungen, bei welcher Probekörper bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten und Temperaturen geprüft werden und das Bruchverhalten analysiert wird. Ziel dieser Forschung ist es Parallelen zum Zeit- Temperatur-Superposition Prinzip ableiten zu können.

Wie aus der Literatur zu entnehmen ist, ist das Versagen im Tieftemperaturbereich von der Belastungsgeschwindigkeit und der Temperatur abhängig. Bei dieser Untersuchung wurde bei vier verschiedenen Temperaturbereichen (-20°C | -10°C | 0°C | $+10^{\circ}\text{C}$) jeweils drei unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten, nämlich bei $0,016\text{mm/s}$, bei $0,0016\text{m/s}$ und bei $0,00016\text{mm/s}$, angewendet. Bei den Ergebnissen wurde festgestellt, dass sich der Werkstoff sowohl duktil als auch spröde verhält. Schwankungen der Prüfbedingungen können die Art der Rissbildung beeinflussen. Vor allem bei höheren Prüftemperaturen von 0°C und 10°C konnte beobachtet werden, dass bei niedrigen Dehnraten das Material einerseits duktil und andererseits spröde verhält. Deshalb treten kein eindeutiger Riss sondern mehrere Mikrorisse auf einer größeren Fläche auf. Zudem wurde erkannt, dass bei nahezu gleichbleibender Zugfestigkeit die Bruchdehnung bei abnehmender Dehnrates zunimmt und somit auf duktiles Verhalten hindeutet. Bei den Prüfungsergebnissen mit -20°C wurde beobachtet, dass die

Zugfestigkeit und die Dehnrage annähernd auf dem gleichen Niveau liegen. Somit können auch Parallelen zwischen Zeit- Temperatur- Superposition Prinzip und UTST- Versuchen mit variierender Belastungsgeschwindigkeiten und Temperatur interpretiert werden. [27]

Abkühlprüfung TSRST (Tensile Stress Restrained Specimen Test)

Diese Prüfmethode, welche in der Norm EN 12697-46 beschrieben wird, dient dazu die kryogenen (kältebedingten) Spannungen durch Abkühlen, zu ermitteln. Der Probekörper wird in die Prüfmaschine eingespannt und eine Starttemperatur von 10°C eingestellt. Da es sich um eine Abkühlprüfung handelt wird die Temperatur mit 10K/h abgekühlt. Während des Vorgangs wird die Länge des Probekörpers durch die Prüfvorrichtung konstant gehalten, bis dieser durch das Abkühlen bricht. Versagen tritt auf, wenn die kältebedingten Zugspannungen die Zugfestigkeit des Probekörpers überschreiten. In einem Diagramm werden auf der X-Achse die Bruchtemperatur T_{Ausfall} und auf der Y-Achse die Bruchspannung $\sigma_{\text{kry, Ausfall}}$ aufgezeichnet. Dieser Versuch dient zur Simulation der Abkühlung im Winter auf Asphaltstraßen und wird in *Kapitel 3.4* näher erläutert. [22][26]

Werden die Ergebnisse der Abkühlprüfung und ein axialen Kältezugsprüfung in einem Diagramm zusammengeführt, erhält man die Zugfestigkeitsreserve. Diese ermittelte Zugfestigkeitsreserve gibt Auskunft ob und wieviel Verkehrslasten ein Asphalt zusätzlich zu den thermischen Spannungen noch aufnehmen kann.[6][17]

Vergleichsuntersuchungen der Prüfeinrichtung

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde mit zwei Prüfgeräten gearbeitet. Das ältere Prüfgerät welche den Namen „Kälte-ALT“ besitzt wurde im Jahr 2003 angeschafft und das neue Gerät mit dem Namen „Kälte-NEU“ wurde 2013 gekauft. Während des Versuchsablaufs zeigte sich abermals eine deutliche Abweichung der Ergebnisse beider Prüfgeräte trotz identen Prüfvorgängen.

Zu dieser Problematik zwischen den Prüfeinrichtungen unterschiedlichen Baujahres wurde im IVWS Labor - Institut für Verkehrswissenschaften, der TU Wien bereits Untersuchungen angestellt, um die teils erheblich abweichenden Ergebnisse bei identen Probekörpern und Prüfablauf interpretieren zu können. In dieser Forschung mit dem Namen „Beiträge zur

Verbesserung der Vergleichbarkeit des Kälteverhaltens im Abkühlversuch“ wird näher darauf eingegangen, welche Ursachen hinter diesen systematischen Abweichungen der Ergebnisse stecken können. Beeinflusst wird das Abkühlverhalten von Objekten nicht nur von der Lufttemperatur, sondern auch von der Luftfeuchtigkeit, Wärmestrahlung oder Windgeschwindigkeit in der Prüfeinrichtung.

Wird in den Versuchen die Bruchtemperatur verglichen, so sind Abweichungen von circa 3°C zu erkennen. Das liegt an der Geschwindigkeit des Abkühlprozesses und die dadurch auftretenden kryogenen Spannungen. Je schneller der Probekörper abkühlt, desto weniger Zeit hat das Material die Spannungen gleichzeitig zu relaxieren.

Bei Voruntersuchungen konnte auch festgestellt werden, dass bei Prüfungen desselben Materials mit gleichen Blindkörpern unterschiedliche Prüftemperaturen auftreten. Obwohl mit gleicher Abkühlrate abgekühlt wird, wird der Probekörper der Prüfeinrichtung aus dem Jahr 2013 schneller abgekühlt. Daraus lassen sich auch die höheren (schlechteren) Bruchtemperaturen erklären. Kältebedingte Spannungen bauen sich schneller auf und das Material hat gleichzeitig weniger Zeit zu relaxieren. Bei weiteren Untersuchungen konnte als wesentlicher Einflussfaktor die Windgeschwindigkeit zwischen den Prüfeinrichtungen eruiert werden. Wurde im Gerät des Jahres 2003 eine Luftgeschwindigkeit von 0,5m/s gemessen, zeigte das Gerät aus dem Jahr 2013 eine Geschwindigkeit von 1,4m/s .

Deshalb wurde das Hauptaugenmerk auf die Adaptierung der Luftgeschwindigkeit des Prüfgeräts von 2003 gelegt und mittels handelsüblichen PC- Lüftern angepasst. Schon erste Ergebnisse zeigten deutliche Verbesserungen bei den Bruchtemperaturen durch einfache Veränderungen der Luftgeschwindigkeit innerhalb der Prüfkammer.

Auf diese Ergebnisgrundlage gilt es im Teil Zwei der Diplomarbeit *„Optimierung der Prüfeinrichtung zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse“* aufzubauen und durch weitere Veränderungen der Prüfaufbauten innerhalb der Kammer mögliche Verbesserungen zu erzielen. [28]

3. Parameterstudie: Tieftemperaturverhalten in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt

In diesem Teil der Arbeit wird erforscht, wie sich der Hohlraumgehalt des Mischguts auf das Verhalten im Tieftemperaturbereich auswirkt. Um die unterschiedlichen Hohlraumgehalte zu erzielen, werden die prozentualen Massenanteile (%) der Mischgutzusammensetzung nicht verändert. Durch den zuvor definierten Ziel-Hohlraumgehalt variieren die einzelnen Platten lediglich bei der Einwaage des Mischguts. Um diesen gewünschten Hohlraumgehalt zu erhalten wird mittels Formel nach EN 12697-6 die Raumdichte errechnet. Im Anschluss wird mit dieser ermittelten Raumdichte des Probekörpers und der Rohdichte des Mischguts, der Hohlraumgehalt ermittelt (EN 12697-8). Das bedeutet, je höher der Ziel- Hohlraumgehalt, desto geringer wird die einzuwiegende Masse. In den folgenden Abbildungen sind die unterschiedlichen Hohlraumgehalte deutlich zu erkennen. [35][36][37]



Abb. 19: $4,5\% \pm 0,5\%$
Hohlraumgehalt [43]



Abb. 20: $8\% \pm 1,0\%$
Hohlraumgehalt [43]



Abb. 21: $12\% \pm 1,0\%$
Hohlraumgehalt [43]

3.1 Verwendete Materialien

Gestein

Zur Herstellung der Probekörper wurden Gesteinskomponenten verwendet, die die Bezeichnung „Loja“ tragen. Dieser Name lässt sich auf den Abbaustandort (3680 Persenbeug) im südwestlichen Waldviertel im Bundesland Niederösterreich zurückführen. Im sogenannten „Lojagraben“ werden seit dem 17. Jahrhundert Hartgesteine, wie Kersantit und Granitporphyr abgebaut. Diese hochwertigen mineralischen Rohstoffe werden für Gleisschotter, Zuschlagmaterial für Asphaltstraßenbau, Frostschutzmaterial oder auch für Flussbausteine verwendet. Dieses vielseitig eingesetzte Material punktet hinsichtlich Härte, Zähigkeit, und

Druckfestigkeit. Geologisch gesehen grenzt in diesem Gebiet die böhmische Masse an die tertiären und quartären Lockergesteine des Alpenvorlandes, wobei die Lockergesteine die Böhmisches Masse überdecken. [12][31]

Dieses gewonnene Ganggestein wird in Brech-, Siebanlagen aufbereitet, klassifiziert und dementsprechend den Gesteinskörnungen zugeordnet. Das gewonnene Edelbrechkorn wird in genormter Qualität hergestellt und unterliegt der ÖNORM B 3130. In dieser Norm werden die Anforderungen an grobe und feine Gesteinskörnungen sowie an den Füller definiert. [30]

Füller

Zur Herstellung der Probekörper wird ein Fremdfüller der Firma Wopfinger verwendet. Dieses Kalksteinmehl wird in der Asphaltindustrie verwendet um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Die Bezeichnung Fremdfüller bedeutet, dass zusätzlich zum Hartgestein mit der Bezeichnung Loja ein anderes Gestein zur Herstellung der Probekörper beigemischt wird. Dieser Kalkstein wird gemäß ÖNORM B 3130 so fein gemahlen das er überwiegend ein Siebdurchgang des Siebes von 0,063mm aufweist. [29][30]

Bitumensorte

Die Wahl des Bitumens beeinflusst eine Reihe von Gebrauchseigenschaften des Asphaltmischguts. Um die Verdichtbarkeit zu verbessern wird in der Regel weiches Bindemittel verwendet. Zur Verformungsbeständigkeit von verschiedenen Straßenschichten sind hingegen härtere Bindemittel vorteilhaft. Auch bei auftretenden kryogenen Spannungen, welche bei niedrigen Temperaturen entstehen wird ein härteres Bitumen verwendet. [1]

In dieser Studie wird zur Probekörperherstellung ein handelsübliches Bitumen verwendet. Die Bezeichnung des polymer modifizierten Bitumens lautet *PmB 45/80-65*. Dessen Kennzeichnung und Eigenschaften wurden bereits im vorangegangenen Kapitel 2.1.1 „Arten von Bitumen“ erklärt. Dieses PmB stammt aus einem der größten österreichischen Öl- und Gas Unternehmen im Osten Österreichs. (OMV)

3.2 Sieblinie der Probekörper

Die Sieblinie des Splittmastixasphalts (SMA) wird in der ONR 23580 (2014) geregelt. Die vorgeschriebenen Grenzsieblinienbereiche des Typs SMA 11, S3 ist in Abb. 22 ersichtlich. In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen welche Prozentsätze als Siebdurchgang je Siebgröße weder unter noch überschritten werden dürfen. [32]

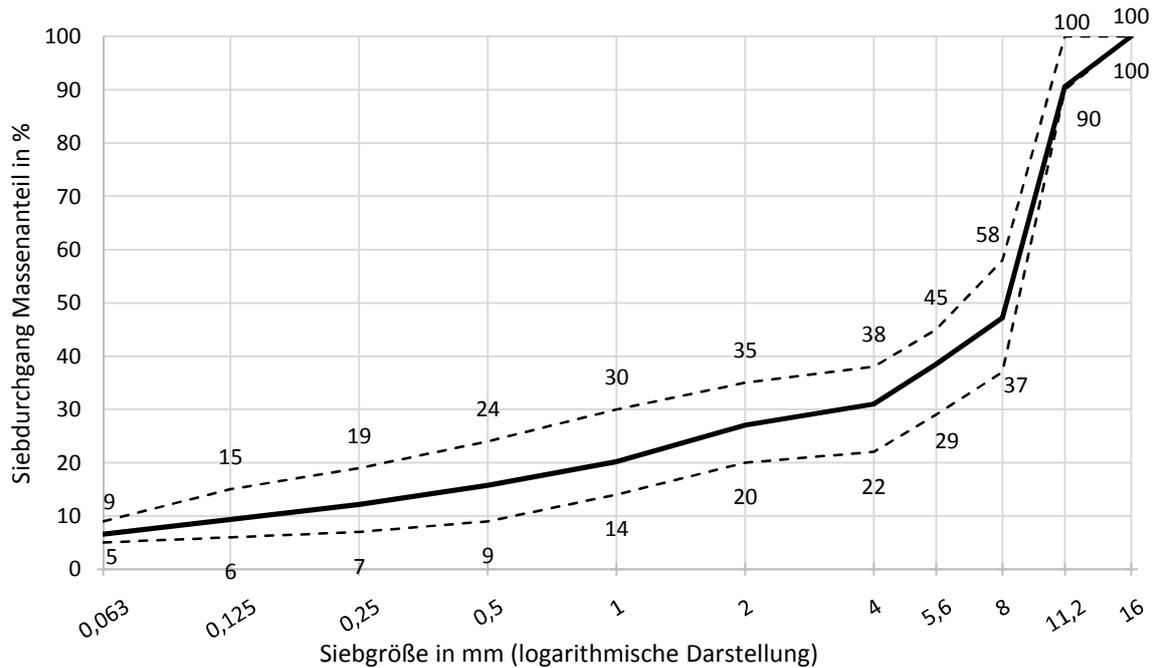


Abb. 22: Empfohlene und vorgeschriebene Grenzsieblinie des SMA 11, S3 und Darstellung der IST-Sieblinie [43] nach [32]

Das Ausgangsmaterial des Mischguts ist Kalksteinmehl als Fremdfüller und die Korngruppen 0/2, 4/8 und 8/11 des „Loja“ Hartgesteins. Die Mischgutzusammensetzung in Abb. 23 zeigt deutlich die Ausfallskörnung 2/4 des Splittmastixasphalts und zugleich hohen Splitt Anteil.

Material	Handelsbezeichnung	Laborcode	Massenanteil in %
Bitumen	PmB 45/80 - 65	B642A	5,60
Füller	Kalksteinmehl	F053	6,47
0/2	Loja	G829	21,91
4/8	Loja	G725	14,93
8/11	Loja	G864	51,09
			Σ 100,00

Abb. 23 Mischgutzusammensetzung in M%- Anteile [43]

3.3 Probekörperherstellung / Vorbereitung

3.3.1 Vorbereitung

Einwaage

Zur Herstellung der Probekörper wird ein Edelbrechkorn mit dem Namen Loja verwendet. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnungen, in der Abb. 24 zu entnehmen, muss laut Norm EN 12697-35 im trockenen Zustand erfolgen oder vor Verwendung bei ca. 110°C getrocknet werden. Die vorab definierte Masse ist mit einer Genauigkeit von 0,1% zu wägen und für die nächsten Schritte vorzubereiten. Die Abb. 24 verdeutlicht die verwendeten Materialien. Zu erkennen ist das Edelbrechkorn mit dem Namen „Loja“ und der Fremdfüller, der eine deutlich hellere Farbe aufweist. [33]



Abb. 24 Mischgutzusammensetzung [43]

Mischen & Verdichten

Das vorbereitete Mischgut, Gestein- und Bindemittelanteil, wird mit Hilfe eines Gegenlaufzwangsmischer, bei definierter Temperatur und Mischzeit, zusammen gemischt und für den Walzvorgang vorbereitet. Anschließend wird das heiße Mischgut gewogen und in Stahlformen eingefüllt. Durch den nächsten Schritt im Walzsegmentverdichter werden gewalzte Asphaltplatten gewonnen. Die Abmessungen der erzeugten Platte werden in der Norm EN 12697-33 geregelt. In dieser Arbeiten werden Asphaltplatten mit den Abmessungen, Länge: 50cm, Breite: 26cm und Stärke: 7cm, verwendet. Die Platten werden durch eine

wegeregelt Verdichtung gewalzt. Das bedeutet vor dem Walzvorgang wird eine Zielhöhe der Platte in das Walzprogramm eingegeben und die Maschine walzt die Platte bis zu dieser Höhe zusammen. Nach Beendigung des Walzprozesses verharrt die Platte für eine Nacht zum Abkühlen in der Stahlform. Danach wird die Platte vorsichtig aus der Probeform gelöst und kann nun für nächste Arbeitsschritte weiterverwendet werden. [34][33]

Ermittlung der Rohdichte, Raumdichte und Hohlraumgehalt

In weiterer Folge wird die gefertigte Asphaltplatte für die nächsten Schritte vorbereitet. Die entstandenen Platten werden jeweils in acht gleich große Probekörper geschnitten. Die Abmessungen der zylindrischen Asphaltprobekörper belaufen sich in dieser Arbeit auf eine Länge von circa 22,5cm und eine Breite und Tiefe von circa 5cm. Das bei der Fertigung der gewalzten Platten entstandene, überschüssige Mischgut wird zur Bestimmung der Rohdichte herangezogen (laut Norm EN 12697-5). In dieser Arbeit wird für die Rohdichte ein zusätzliches Mischgut von mindestens 600g benötigt. Die zerteilte und auf Raumtemperatur abgekühlte Probe wird in ein Pyknometer gegeben. Im ersten Schritt wird das Gewicht vom Pyknometer samt Inhalt ermittelt. Anschließend wird ein destilliertes Wasser beigemischt und umgerührt. Weiters wird die Glasflasche samt Inhalt in ein Vakuumregelgerät gegeben, um die eingeschlossene Luft durch Anwendung eines Vakuums heraus zu bekommen. Im letzten Schritt wird das Pyknometer mit Probeninhalt und Wasser abermals gewogen. Mithilfe dieser ermittelten Werte kann mit der Formel, die in der Norm zu entnehmen ist, die Rohdichte errechnet werden. [35]

Um die Raumdichte und den Hohlraumgehalt zu ermitteln (geregelt in der Norm EN 12697-6 und EN 12697-8), werden die geschnittenen Probekörper mindestens 30 Minuten lang in ein 25°C warmes Wasserbad gelegt. In diesem Wasserbad werden die Probekörper außerdem unter Wasser gewogen. Nach dem Wasserbad werden die Probekörper mit einem Lederlappen abgetupft, um das Oberflächenwasser zu entfernen. Anschließend werden sie gewogen und mindestens 24 Stunden zum Trocknen aufgelegt.

Jeder Probekörper wird also insgesamt drei Mal in unterschiedlichen Zuständen gewogen:

- Unter Wasser nach mindestens 30 Minuten im Wasserbad
- Nach dem Abtupfen mit dem Lederlappen

- Nach dem 24-stündigen Trocknungsprozess

Nach dem 24-stündigen Trocknungsprozess wird jeder Probekörper mehrmals vermessen, um die mittleren Abmessungen zu ermitteln. Dafür wird die Länge des Probekörpers zweimal und die Breite und Höhe jeweils viermal an unterschiedlichen Stellen gemessen und der Mittelwert daraus gebildet. Diese Informationen dienen dazu die Raumdichte der prismatischen Probekörper zu ermitteln. In der Norm EN 12697-6 werden dafür vier verschiedene Verfahren erklärt. In dieser Arbeit wird das Verfahren D „Raumdichte durch Ausmessen“, verwendet. Abschließend kann mit der Formel, die der Norm EN 12697-8 zu entnehmen ist, der Hohlraumgehalt errechnet werden. [35][36][37]

Vorbereitung der Probekörper für den Prüfvorgang

Nachdem die Abmessungen und der Hohlraumgehalt jedes Probestückes definiert wurde, werden Probekörper für die Zugversuche vorbereitet: In einem ersten Schritt werden dafür die Stahladapter mit einem Lösungsmittel (Toluol) von Bitumenresten befreit und mit einem Mittel zur Lösung restlicher Fette (Aceton) eingerieben. Dieser Vorgang ist nötig damit der Kleber mit dem Stahladapter eine kraftschlüssige Verbindung eingehen kann. Nach diesem Vorgang wird das Probestück mit den vorbereiteten Stahladaptoren (siehe Abb. 25) auf der Montagebank zentrisch ausgerichtet und mit dem Klebevorgang begonnen. Beim Kleber handelt es sich um einen Zweikomponentenkleber, der zusätzlich mit Kalksteinmehl (Füller) vermischt wird (Mischverhältnis 3:1:2).



Abb. 25:Montagebank, Stahladapter und Probekörper [43]

Mit dem Kleber werden dann zuerst die Stirnseiten angestrichen und mit dem Stahladapter verpresst. Zusätzlich wird wie in Abb. 26 ein Kleberkeil ausgebildet, um einerseits Störzonen im Randbereich zu überbrücken und andererseits homogene Spannungszustände im Probekörper zu erhalten. [22]



Abb. 26: Kleberkeil [43]

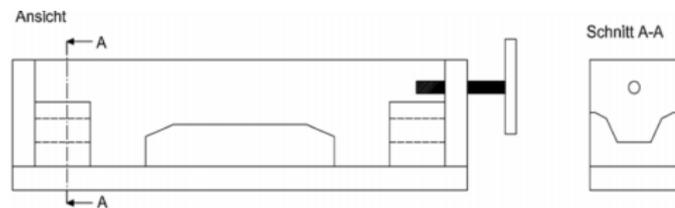


Abb. 27: Prinzipskizze Montagebank [22]

Nach Beendigung des Klebevorgangs bleiben die Probekörper, wie in Abb. 27 zu entnehmen, bis zur Aushärtung in der Montagebank eingespannt. Nach der Aushärtung wird die Temperatur des Probekörpers in einem Temperierschrank von Raumtemperatur auf 10°C abgekühlt. Erst nach dem Abkühlvorgang ist der Probekörper fertig vorbereitet und es kann mit dem Prüfvorgang gestartet werden. [22]

Herstellung eines Blindkörpers (Dummie)

Um zusätzlich eine Aussage über die Temperatur im Inneren eines Probekörpers treffen zu können wird ein Blindkörper erstellt. Dieser besitzt einen ähnlichen Hohlraumgehalt wie die zu prüfenden Probekörper. Für die Herstellung des Blindkörpers wird ein zentrisches Loch in den dafür vorgesehenen Probekörper gebohrt. Dieses Loch muss tief genug sein, um den Temperaturfühler darin versenken zu können. Zusätzlich wird das gebohrte Loch nach jeder Verwendung erneut mit Glycerin verfüllt. Das Glycerin sorgt dafür, dass der Temperaturfühler nicht die Umgebungstemperatur in der Kammer sondern die Temperatur des Blindkörpers annimmt.

3.4 Gerätebeschreibung des TSRST und UTST Versuchs

In dieser Diplomarbeit wird das Hauptaugenmerk auf das Verhalten des Asphalts im Tieftemperaturbereich gelegt. Deshalb werden die Versuchsaufbauten des TSRST-Versuchs

(Abkühlprüfung) und des UTST-Versuchs (einaxialen Kältezugsprüfung) anschaulich erklärt. Für beide Versuche kann das gleiche Prüfgerät verwendet werden. Größter Unterschied dieser beiden Versuche ist, dass beim TSRST-Versuch die Länge des Probekörpers konstant gehalten wird, während die Temperatur reduziert wird und beim UTST-Versuch die Temperatur konstant gehalten wird, während der Probekörper einem Zugversuch ausgesetzt wird.

TSRST-Versuch (Tensile Stress Restrained Specimen Test) - Erklärung und Aufbau

Wie bereits erwähnt simuliert der Abkühlversuch witterungsbedingtes Abkühlen einer Asphaltstraße. Die dabei entstehenden kältebedingten Zugspannungen können auf diese Weise ermittelt und aufgezeichnet werden.

Die Durchführung kann in zwei Phasen unterteilt werden. Die erste, sogenannte Vorbereitungsphase, dient dazu den Probekörper in die Prüfkammer einzubauen. Um Vorschädigungen zu vermeiden darf beim Einbau keine zu große Zugkraft in den Probekörper eingeleitet werden ($<0,2$ kN). Nach der richtigen Positionierung werden die Stahladapter, die bereits an den Probekörper verklebt wurden, mit der Maschine fest verschraubt. In der zweiten Phase, der sogenannten Durchführungsphase wird beim Start des Abkühlversuches die Prüfkammer auf $\pm 10^{\circ}\text{C}$ vortemperiert. Diese Temperatur wird für etwa 60 Minuten gehalten (Abb. 29), damit die eingebaute Probe und der zugehörige Blindkörper von derselben Temperaturstufe aus starten. Diese Zeitspanne wird auch Konsolidierungsphase genannt. Nun beginnt der Abkühlversuch, dabei wird der Probekörper unter konstant halten seiner Länge bis zum Bruch abgekühlt, zu sehen in Abb. 28. Die empfohlene Abkühlrate liegt dabei laut Norm bei $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$.

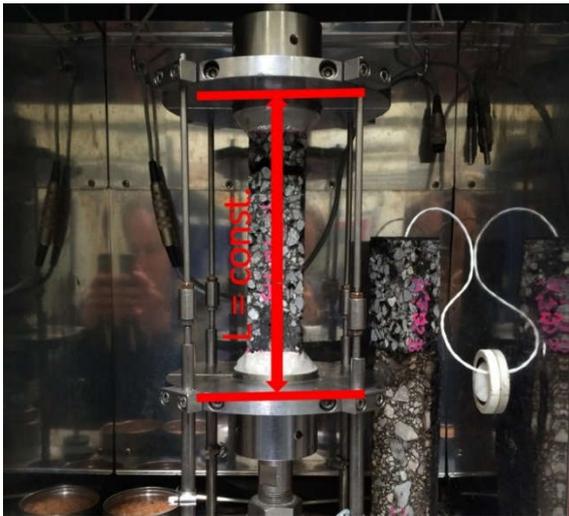


Abb. 28: Versuchsprinzip TSRST [43] nach [22]

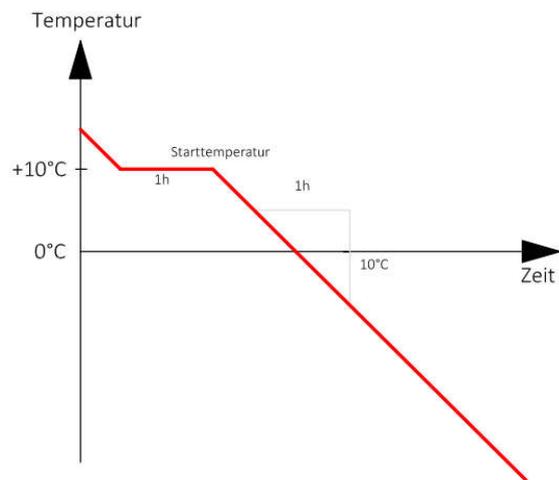


Abb. 29: Temperaturschema [43] nach [22]

Während des Versuchs wird die Zugkraft, die sich durch das temperaturbedingte Zusammenziehen des Probekörpers aufbaut, aufgezeichnet. Diese Aufzeichnungen sind erforderlich, um in weiterer Folge die kryogenen Spannungen im Probekörper zu ermitteln. Gleichzeitig werden die Signale der außen angebrachten Wegsensoren (4 Stück) und der Temperatursensoren, sowohl im Blindkörper als auch in der Klimakammer zur weiteren Verwendung aufgezeichnet.

Der Versuch wird dann als korrekt eingestuft, wenn während des Versuches die Standardabweichung des Mittelwertes der vier Wegsensoren 0,0002 mm nicht überschreitet. Zusätzlich muss bei der maximalen Abweichung des Mittelwertes ein kleinerer Wert als 0,0015 mm auftreten. Bei voran gegangenen Forschungen des Tieftemperaturverhaltens von bituminösen Stoffen wurde aufgezeigt, dass bei gleicher Abkühlrate die Prüfkammer und der Blindkörper ein Differenz von ca. 3°C aufweisen, wie in Abb. 30 ersichtlich. Darüber hinaus ist bei der schwarzen Kurve deutlich zu erkennen, dass im ersten Drittel des Abkühlprozesses, der Probekörper die aufbauenden Spannungen relaxiert. Erst bei einem späteren Zeitpunkt des Abkühlvorgangs steigt die Kraft deutlich an, bis ein Versagen auftritt.

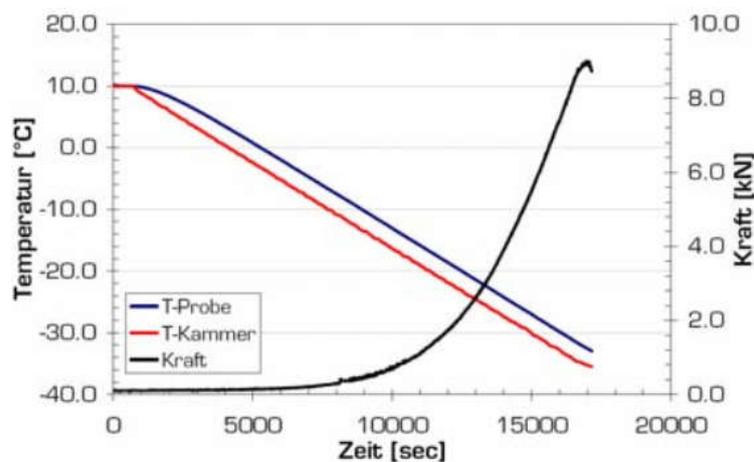


Abb. 30: Kraft/ Temperaturverlauf über die Zeit [22]

In Abb. 31 ist das Ergebnis eines Abkühlversuchs zu entnehmen. Auf der X-Achse wird die Probentemperatur und auf der Y-Achse die Spannung aufgetragen. In diesem Diagramm, werden in weiterer Folge die Bruchtemperatur T_{Ausfall} und die Bruchspannung $\sigma_{\text{kry, Ausfall}}$ abgelesen. Die blaue Kurve spiegelt den Aufbau der kältebedingten Zugspannungen wieder. Für diesen Prüfvorgang werden für diese Diplomarbeit mindestens drei Versuche pro Hohlraumgehalt benötigt. Das bedeutet es sind mindestens neun TSRST-Versuche für eine aussagekräftige Kurve erforderlich. Diese Kurve wird mittels einer Regressionskurve angenähert und ist ein Teil der Auswertung der Zugfestigkeitsreserve. [22][26][41]

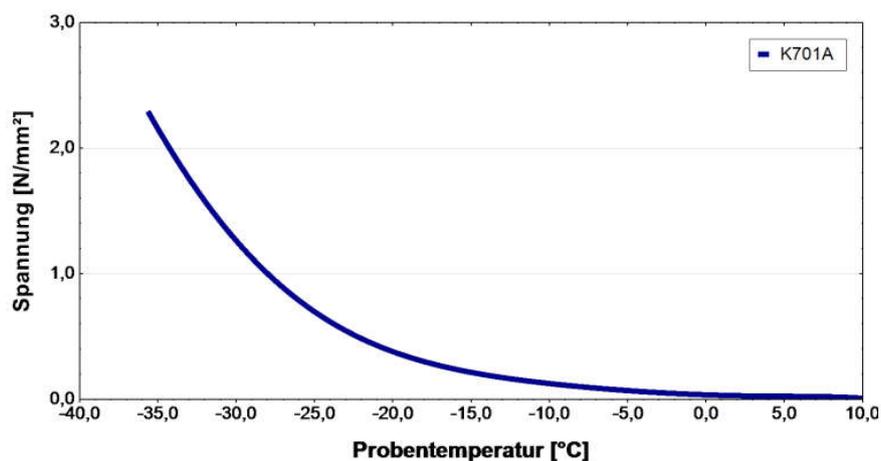


Abb. 31: Verlauf der kryogenen Zugspannung [43]

UTST-Versuch (Uniaxiale Tensile Strength Test) - Erklärung und Aufbau

Bei diesem Verfahren wird im Labor die Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur überprüft. Dieser Prüfvorgang, welcher UTST-Versuch genannt wird, ist ein einaxialer Kältezugsversuch, bei dem der Probekörper unter konstant halten einer definierten Versuchstemperatur mit einer direkten Zugspannung beansprucht wird. In der Norm EN 12697-46 wird dieser Zugversuch ausführlich beschrieben.

Die Versuchsdurchführung der UTST-Prüfung kann vereinfacht in drei Phasen unterteilt werden. Die erste Phase widmet sich dem Einbau des Probekörpers und der Starttemperatur von 10°C und wird nicht näher beschrieben, da diese Phase bereits bei der TSRST-Prüfung ausführlich erklärt wurde. Bei der zweiten Phase handelt es sich um die Abkühlphase, in welcher der Probekörper spannungsfrei auf die definierte Prüftemperatur abgekühlt wird, um mit dem Zugversuch starten zu können. Die Abkühlrate, die auch in der Norm zu finden ist bleibt wie bei der TSRST-Prüfung bei $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$. [22]



Abb. 32: Versuchsprinzip [43] nach [22]

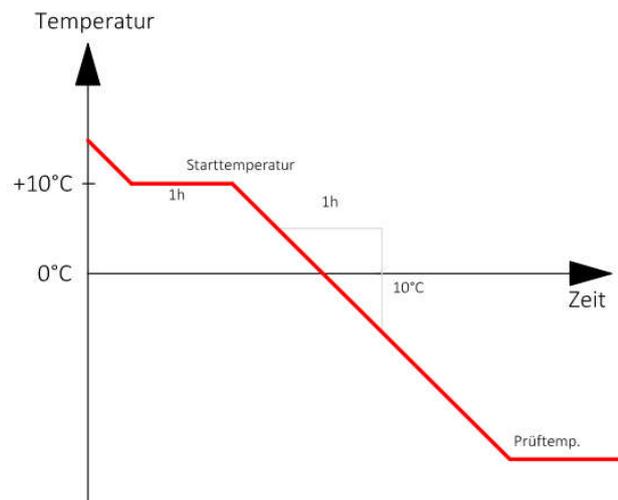


Abb. 33: Temperaturschema [43] nach [22]

Bei der dritten und letzten Phase, genannt Durchführungsphase, wird der auf die Prüftemperatur gebracht Probekörper mit einer konstanten Verformungsrate von $1\text{mm}/\text{min}$ gezogen. Diese Verformungsrate wird über den Mittelwert von zwei Wegsensoren, die in der Prüfmaschine integriert sind gesteuert. Darüber hinaus wird während des Versuchs die Zugkraft auf $0,0001\text{ kN}$ genau aufgezeichnet. Das Maximum wird auf zwei Nachkommastellen gerundet

und als maximale Prüfkraft in kN bezeichnet. Bei dieser Prüfung erhält man als Materialparameter die Zugfestigkeit und die Zugdehnung bei einer definierten Prüftemperatur. Gleichzeitig werden die Signale der außen angebrachten Wegsensoren (vier Stück) und der Temperatursensoren im Blindkörper und in der Klimakammer zur weiteren Verwendung aufgezeichnet. Um einen reibungslosen Ablauf eines Zugversuches zu gewährleisten müssen zwei Kriterien erfüllt sein:

- Die Verformungsrate des Steuersignals muss $\leq 5\%$ sein
- Die Verformungsrate des Kontrollsignals als Mittelwert von zwei Wegaufnehmern, darf nicht mehr als 5% vom Steuersignal abweichen

Diese gewonnenen Ergebnisse werden in einem Diagramm dargestellt, in der die Zugfestigkeit und die Zugdehnung in Abhängigkeit der Temperatur abzulesen sind (Abb. 34). [22][26]

In dieser Diplomarbeit wird der einaxiale Abkühlversuch bei drei verschiedenen Temperaturbereichen durchgeführt. Anders als in der Norm empfohlen (+20 °C, +5 °C, -10 °C und -25 °C.) werden die Versuche bei +5°C, -15°C und -30°C abgehalten. Je Prüftemperatur werden mindestens drei Versuche pro Hohlraumgehalt durchgeführt. Das bedeutet es werden mindestens neun UTST- Versuche je Hohlraumgehalt für eine aussagekräftige Kurve benötigt. Diese Kurve wird mittels Regressionskurve angenähert. Die Kurve wird als Zugfestigkeitskurve bezeichnet. Das Maximum, welches in dieser Kurve abzulesen ist, wird als maximale Zugfestigkeit definiert. [22][26]

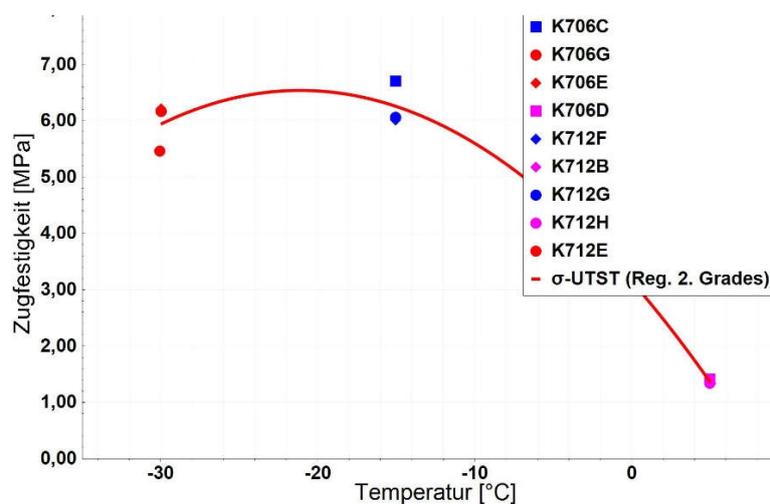


Abb. 34: UTST Kurve [43]

3.5 Ergebnisse und Interpretation

Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, wie sich Asphalt bei unterschiedlichen Hohlraumgehalten im Tieftemperaturbereich verhält. Dafür wurden Prüfungen bei drei unterschiedlichen Hohlraumgehalten (4,5%, 8% und 12%) durchgeführt. Pro Hohlraumgehalt wurden bei der UTST-Prüfung bei 5°C, -15°C und -30°C jeweils mindestens drei Versuche durchgeführt. Insgesamt wurden daher pro Hohlraumgehalt mindestens zwölf Probekörper benötigt. Nach Beendigung der Prüfverfahren, TSRST (Abkühlprüfung) und UTST (einaxiale Kältezugsprüfung) entstanden folgende Ergebnisse.

3.5.1 Zugfestigkeit im Verhältnis zum Hohlraumgehalt bei UTST-Versuchen

In diesem Punkt galt es, Teilergebnisse, die zur Darstellung der Zugfestigkeitsreserve nötig sind, zu ermitteln. Abb. 35 beschreibt sämtliche Probekörper, die bei einer Prüftemperatur von 5°C der UTST-Prüfung unterzogen wurden. In der folgenden Abb. 35 ist die Abnahme der Zugfestigkeit bei gleichzeitiger Erhöhung des Hohlraumgehaltes deutlich zu erkennen. Dass die Zugfestigkeit unter den Probekörpern und Hohlraumgehalten eher gering ausfällt, könnte an der Prüftemperatur liegen. Umso höher die Temperatur ist, desto viskoser verhält sich das Material.

Außerdem ist die Bruchdehnung bei positivem Temperaturbereich deutlich größer als im Tieftemperaturbereich, da das Bitumen duktiler ist. Das bedeutet in diesem Zustand ist das Bitumen weicher und die Viskosität niedriger. In diesem Temperaturbereich kann es auch passieren, dass kein eindeutiger Riss auftritt, sondern mehrere Mikrorisse auf einer größeren Fläche auftreten.[27]

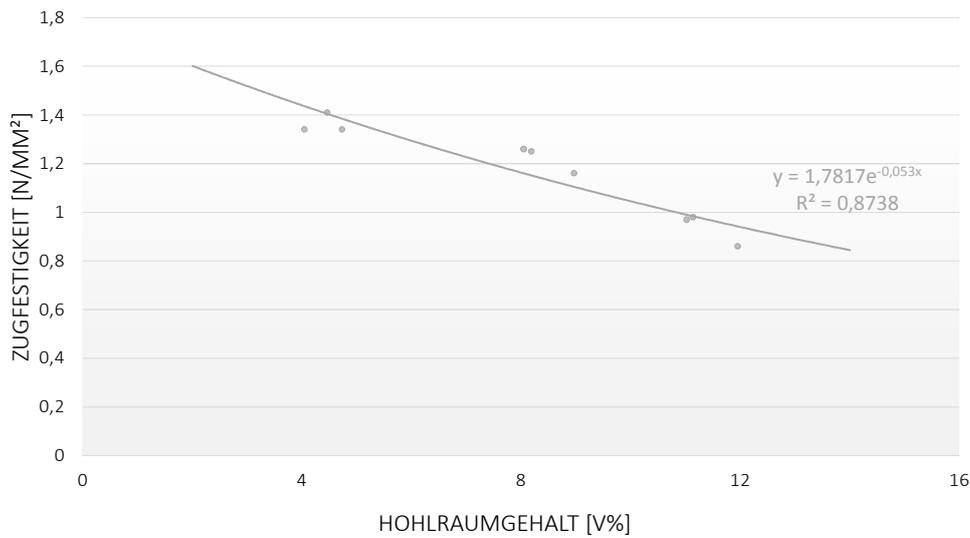


Abb. 35: UTST Probekörpervergleich bei +5°C Prüftemperatur [43]

Bei tieferen Temperaturen, wie in Abb. 36, mit einer Prüftemperatur von -15°C, ist zu erkennen, dass sich die niedrigen Hohlraumgehalten doch deutlich von den höheren Hohlraumgehalten in Bezug auf die Zugfestigkeit unterscheiden. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Eigenschaften des polymermodifizierten Bitumens zum Tragen kommen. Dieses Bindemittel beeinflusst vor allem das Temperatur-Viskositäts-Verhalten und verbessert die Tieftemperaturempfindlichkeit.

Bei den Hohlraumgehalten von 8,0% und 12,0% bei einer Prüftemperatur von -15°C sind nur mehr kleine Unterschiede bei der Zugfestigkeit erkennbar.

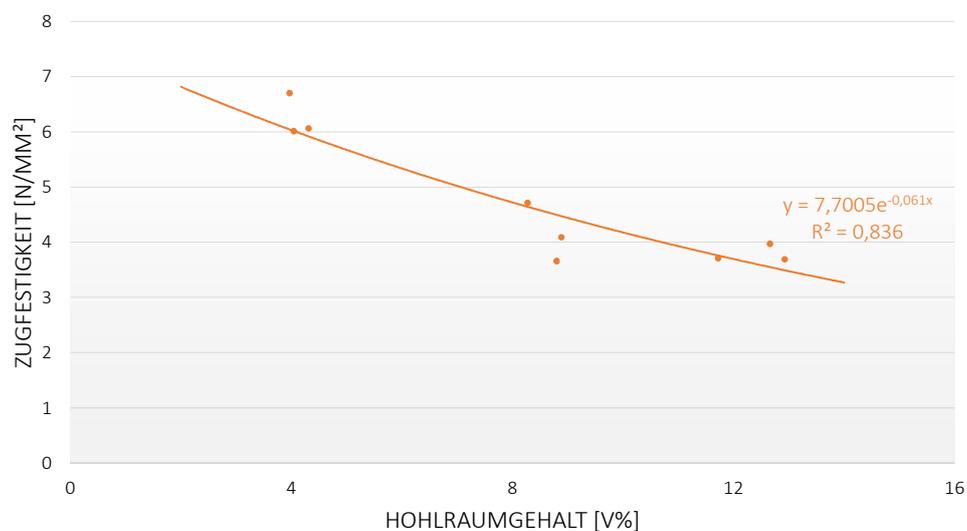


Abb. 36: UTST Probekörpervergleich bei -15°C Prüftemperatur [43]

Zwischen Abb. 36 und Abb. 37 treten keine großen Unterschiede mehr auf. Bei Betrachtung der beiden Kurven erkennt man deutliche Parallelen bei den Prüftemperaturen von -15°C und -30°C . Ausschlaggebender Grund könnte wieder das qualitativ hochwertige Bitumen sein, das zur Probekörperherstellung verwendet wurde.

Also kann die Aussage getroffen werden, dass ein geringer Hohlraumgehalt auffallend bessere Ergebnisse bei der Zugfestigkeit liefert wie vergleichsweise bei 8,0% oder 12,0% Hohlraumgehalt.

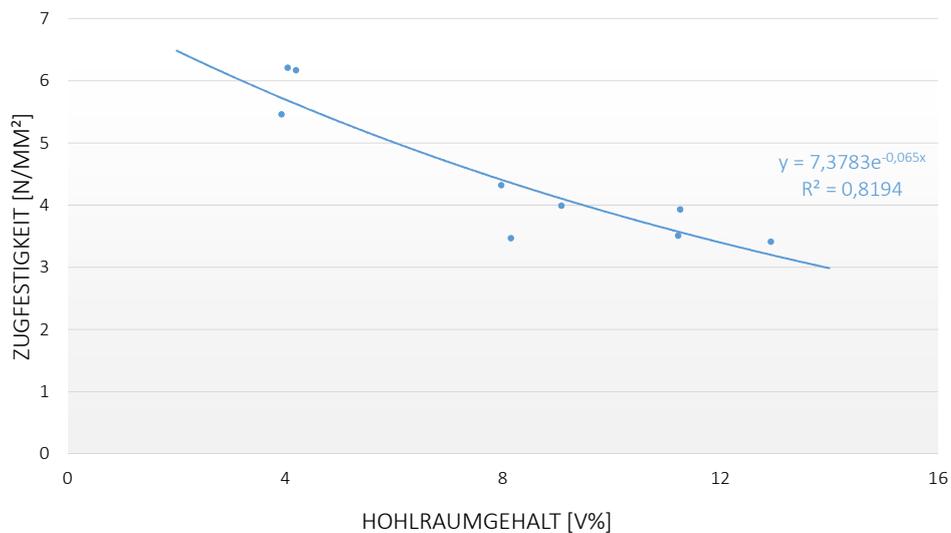


Abb. 37: UTST Probekörpervergleich bei -30°C Prüftemperatur [43]

Zur Verdeutlichung der Ergebnisse werden die zuvor präsentierten Kurven in ein gemeinsames Diagramm gelegt (Abb. 38). Dabei ist zu erkennen, dass die Prüfergebnisse bei $+5^{\circ}\text{C}$ eine vielfach geringere Zugfestigkeit aufweisen als bei tieferen Temperaturen. Außerdem verdeutlicht das Diagramm, dass die maximale Zugfestigkeit nicht bei -30°C , sondern bei -15°C auftritt. Das kann dadurch interpretiert werden, dass das Material bei -30°C ein spröderes Materialverhalten aufweist und deshalb früher versagt. Ein weiterer Grund könnten die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Bitumen und Gestein sein, aufgrund dessen bei tiefen Temperaturen zusätzliche Spannungszustände auftreten, die sich negativ auf die Zugfestigkeit auswirken.

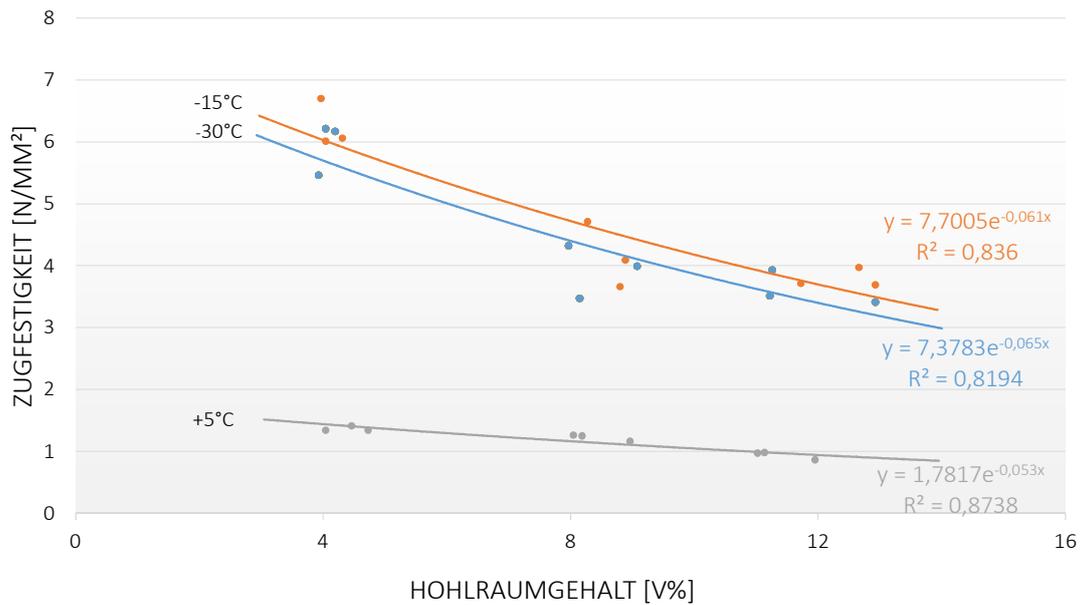


Abb. 38: UTST Probekörpervergleich bei +5°C, -15°C und -30°C [43]

3.5.2 Bruchspannungen im Verhältnis zum Hohlraumgehalt bei TSRST-Versuchen

In diesem Punkt gilt es, Teilergebnisse die zur Darstellung der Zugfestigkeitsreserve nötig sind, zu ermitteln. Diese Ergebnisse bilden die untere Kurve der Zugfestigkeitsreserve und werden zusammenfassend in Kapitel 3.5.3 beschrieben.

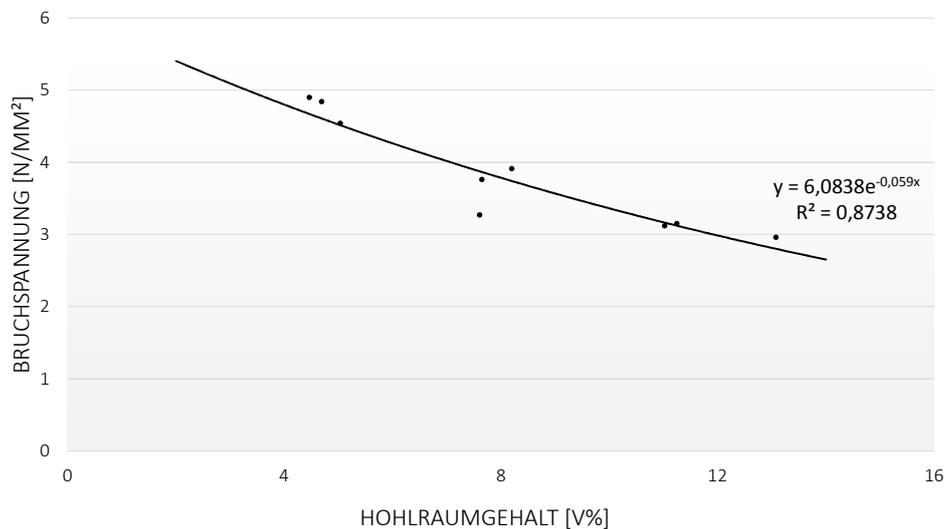


Abb. 39: TSRST Probekörpervergleich [43]

Beim Vergleich der Probekörper ist im Diagramm (Abb. 39) zu erkennen, dass es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und Bruchspannung gibt. Vor allem bei

einem Hohlraumgehalt von 4,5% ist zu erkennen, dass die Bruchspannung deutlich höher liegt als bei 8,0% Hohlraumgehalt. Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen den Hohlraumgehalten 8,0% und 12,0% ist ersichtlich, dass der Unterschied hinsichtlich der Bruchspannung geringer ausfällt als bei 4,5% und 8,0%.

Vergleich der kryogenen Spannungen

Um einen Einblick in die auftretenden kältebedingten Zugspannungen zu erhalten, wurden mittels Auswertungsprotokollen der Prüfgeräte bei +5°C, -15°C und bei -30°C die Spannungen errechnet.

Der Abb. 40, ist zu entnehmen, dass bei 5°C hinsichtlich der verschiedenen Hohlraumgehalte nahezu keine kältebedingten Spannungen aufgebaut werden. Da dieser Vergleich deutlich im positiven Bereich der Temperaturskala gezogen wird, erklärt sich auch warum in diesem Bereich sehr geringe kryogene Spannungen auftreten. Erst bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt bauen sich kältebedingte Spannungen im Probekörper auf.

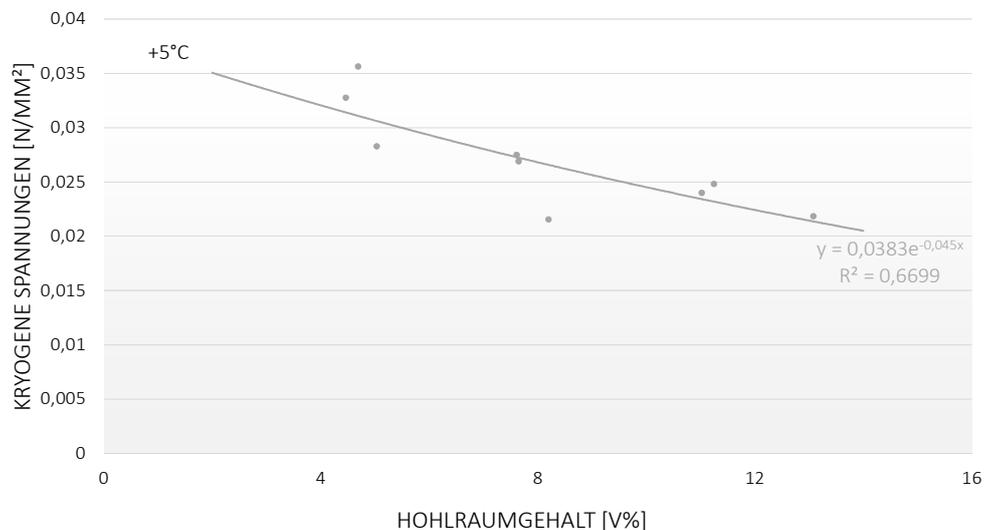


Abb. 40: Kryogene Spannungen bei +5°C [43]

Während bei +5°C sehr geringe Spannungen zu erkennen sind, bauen sich bei -15°C schon deutliche höhere Spannungen, die den tiefen Temperaturen geschuldet sind, auf. Wie in Abb. 41 ersichtlich, steigen die Tieftemperaturspannungen bei einer Temperaturdifferenz von 20°C (+5°C bis -15°C) auf das 14-fache an.

Weiters ist aus dem Diagramm zu entnehmen, dass die kryogenen Spannungen mit steigenden Hohlraumgehalt abnehmen. Das bedeutet, bei 4,5% Hohlraumgehalt bilden sich die größten Spannungen aus. Wie erwartet bilden sich hingegen beim Hohlraumgehalt von 12,0% die geringsten kältebedingten Spannungen aus. Im Bezug auf die Masse ist das Mix Design überall gleich, aber aufgrund der unterschiedlichen Hohlraumgehalte ist beim Hohlraumgehalt von 12,0% zwischen den Körnern ein tendenziell dickerer Bindemittelfilm und daher ein größerer spannungsrelaxierender Puffer als wie bei 4,5% Hohlraumgehalt. Dies kann dadurch begründet werden, dass volumetrisch gesehen weniger Gestein vorhanden ist aufgrund des höheren Hohlraumgehalts. Diese geringere Gesteinsmenge wird von der gleichen Bindemittelmenge, wie bei niedrigerem Hohlraumgehalt umschlossen, daher ergibt sich ein dickerer Bindemittelfilm. Dadurch bauen sich bei höherem Hohlraumgehalt die kryogenen Spannungen auch langsamer auf.

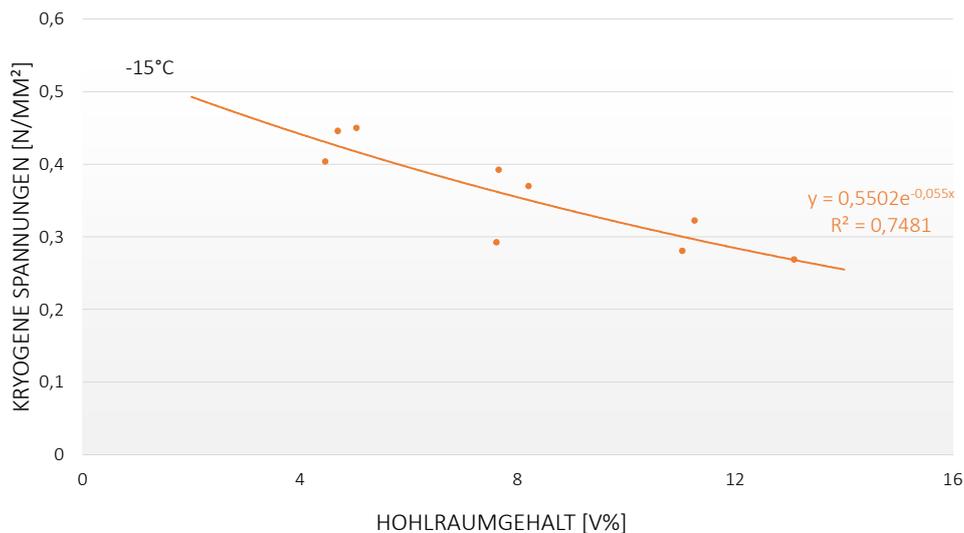


Abb. 41: Kryogene Spannungen bei -15°C [43]

Im Diagramm in Abb. 42 ist der Vergleich der Probekörper bei -30°C abgebildet. In diesem Temperaturbereich versechsfachen sich die kryogenen Spannungen gegenüber dem Diagramm in Abb. 41 bei einer Temperaturdifferenz von 15°C. Das bedeutet je tiefer die Temperatur, desto höher fallen die kältebedingten Zugspannungen aus.

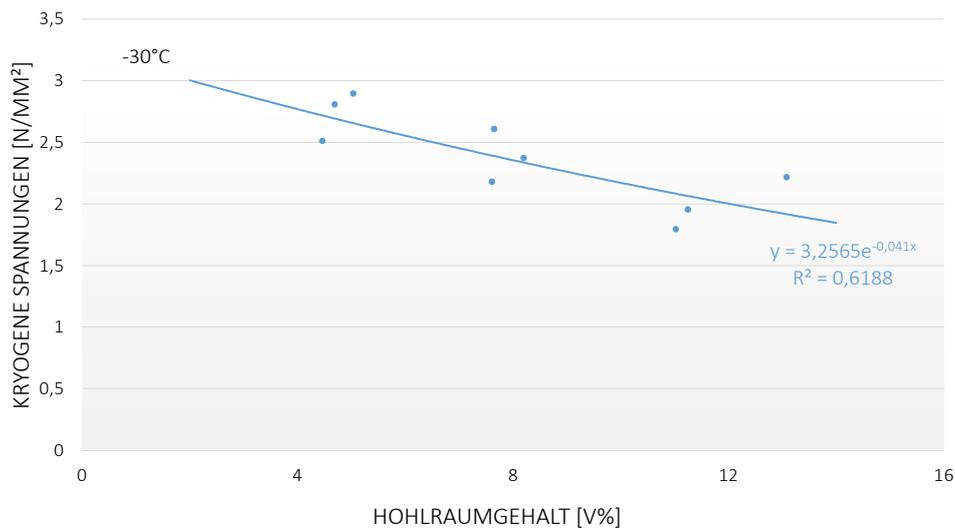


Abb. 42: Kryogene Spannungen bei -30°C [43]

Beim Vergleich dieser drei Darstellungen bei verschiedenen Temperaturen (+5°C, -15°C, -30°C) ist beim Aufbau der kältebedingten Spannungen deutlich erkennbar, dass am Anfang des Abkühlprozesses die Eigenschaft des Asphalts, die über die Zeit aufbauenden Spannungen zu relaxieren, zu tragen kommt. Erst ab einem Zeitpunkt, bei dem das Mischgut die auftretenden Spannungen nicht mehr relaxieren kann, steigen die kryogenen Spannungen deutlich schneller an. Somit zeigt sich eindeutig, dass Zusammenhänge zwischen Hohlraumgehalt (4,5%, 8% und 12%) und Spannungssituation bei tiefen Temperaturen vorhanden sind.

Der Trend, dass die kryogenen Spannungen bei überprüften Temperaturbereichen mit steigenden Hohlraumgehalt abnehmen, ist bei allen Diagrammen erkennbar. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse werden die zuvor präsentierten Kurven wieder in ein gemeinsames Diagramm gelegt (Abb. 43: Vergleich der kryogenen Spannungen [43]).

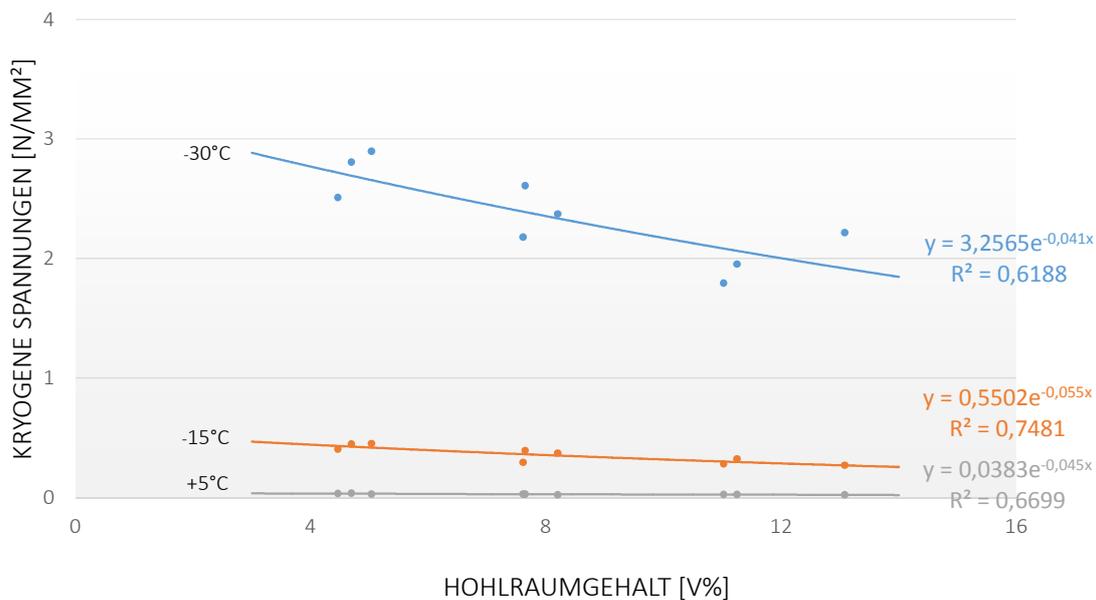


Abb. 43: Vergleich der kryogenen Spannungen [43]

3.5.3 Zugfestigkeitsreserve

In Bezug auf die Zugfestigkeitsreserve galt es zu überprüfen, ob ein geringerer Hohlraumgehalt (daher größere Bruchfläche) auch zu einer größeren Zugfestigkeit und in weiterer Folge zu einer größeren Zugfestigkeitsreserve führt.

Die drei unten angeführten Abbildungen zeigen die Auswertungen der Zugfestigkeitsreserve. Die Ermittlung der Zugfestigkeit ist deshalb von großer Bedeutung, da sie die Differenz der kryogenen Spannung (Klima) und der Zugfestigkeit bildet. Das Ergebnis der Zugfestigkeitsreserve gibt Auskunft wieviel Verkehrslasten ein Asphalt zusätzlich zu den thermischen Spannungen noch aufnehmen kann. Dazu wurde in der Auswertungsphase mit der UTST-Prüfung die Zugfestigkeit des Materials und mit der TSRST-Prüfung die Bruchspannung ermittelt. Aus dem Zusammenspiel beider Kurven lässt sich die Zugfestigkeitsreserve ablesen. In den unten angeführten Diagrammen sind die Ergebnisse der einaxialen Kältezugsprüfung (UTST) jeweils aus der roten Kurve und die Ergebnisse der Abkühlprüfung (TSRST) jeweils aus der blauen Kurve abzulesen. Die grüne Kurve zeigt jeweils die Zugfestigkeitsreserve an.

In Abb. 44 wird die Zugfestigkeitsreserve bei einem Hohlraumgehalt von 4,5% ermittelt. Dabei zeigt sich, dass die maximale Spannungsreserve bei 5,85 N/mm² liegt. Die größte Zugfestigkeitsreserve liegt bei ca. -15°C.

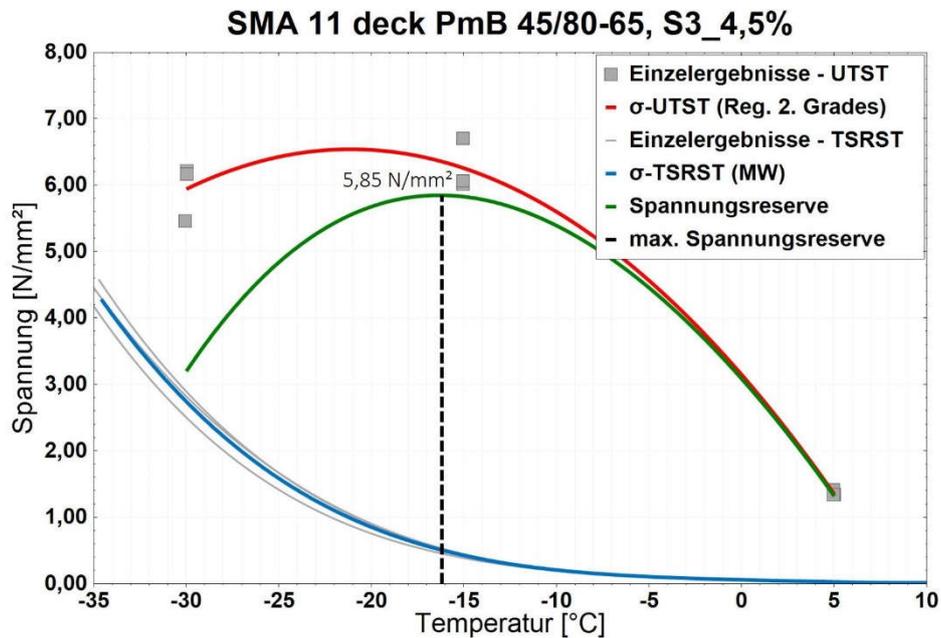
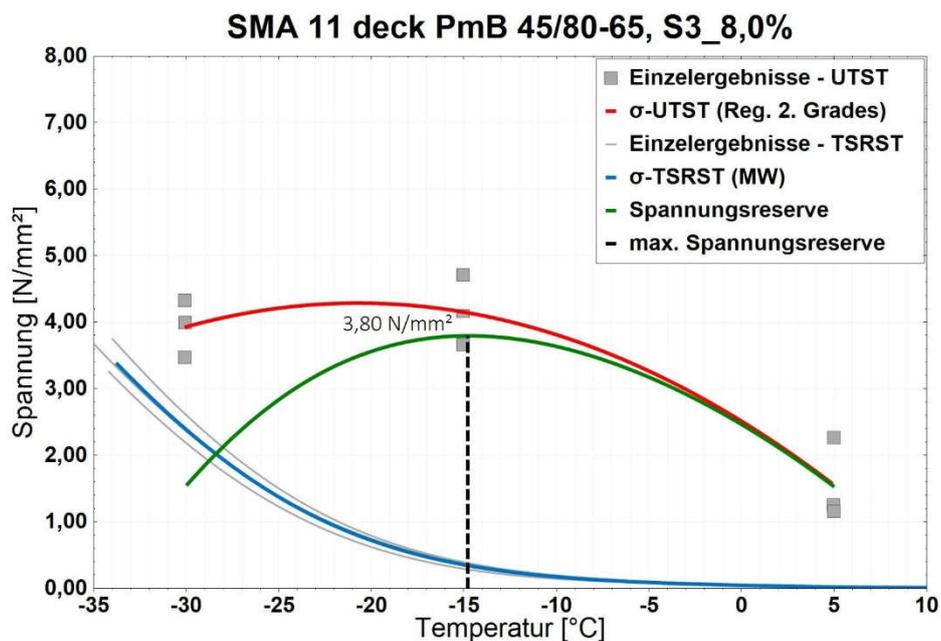
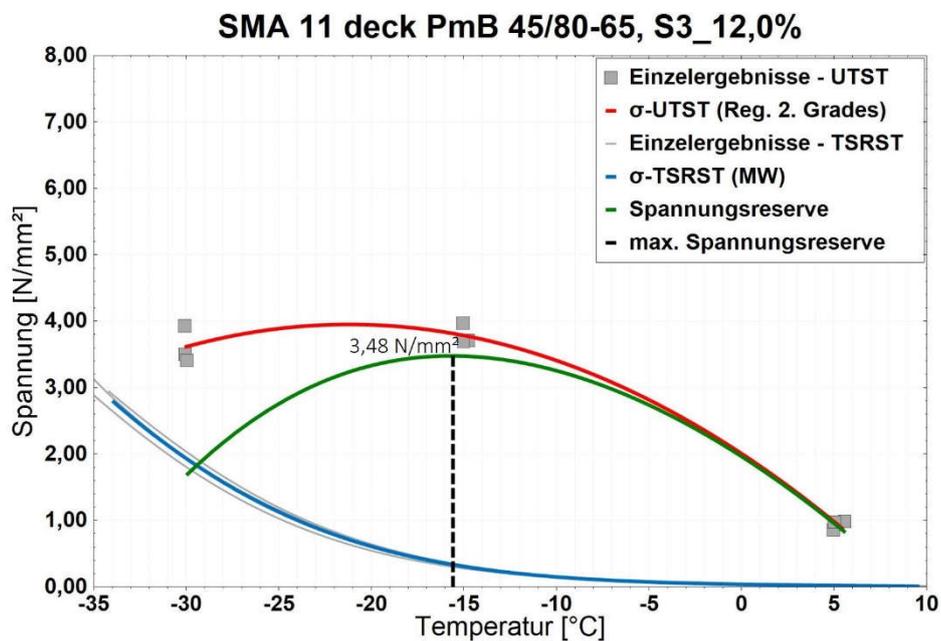


Abb. 44: Zugfestigkeitsreserve bei 4,5% Hohlraumgehalt [43]

In Abb. 45 beträgt die maximale Spannungsreserve hinsichtlich des Hohlraumgehaltes von 8% lediglich 3,80 N/mm² und ist hiermit erheblich geringer, als in Abb. 44.



In Abb. 46 beträgt die ermittelte Zugfestigkeitsreserve wie erwartet den geringsten Wert von 3,48 N/mm².



Zusammenfassend wird deutlich, dass die Hohlraumgehalte 4,5 %, 8,0% und 12,0% im direkten Vergleich folgendes Ergebnis zeigen:

Nachdem die maximale Zugfestigkeitsreserve bei einem Hohlraumgehalt von 4,5% einen Wert von 5,85 N/mm² aufweist und der Wert bei einem Hohlraumgehalt von 8,0% hingegen bei 3,80 N/mm² liegt, ergibt sich eine Differenz von 2,05 N/mm².

Der Grund für diese Differenz liegt darin, dass sich der Hohlraumgehalt von 4,5% auf 8% fast verdoppelt. Der Sprung von 8,0% Hohlraumgehalt auf 12,0% Hohlraumgehalt ist hingegen weniger groß, weshalb die Differenz bei der maximalen Zugfestigkeitsreserve mit 0,32 N/mm² deutlich geringer ausfällt.

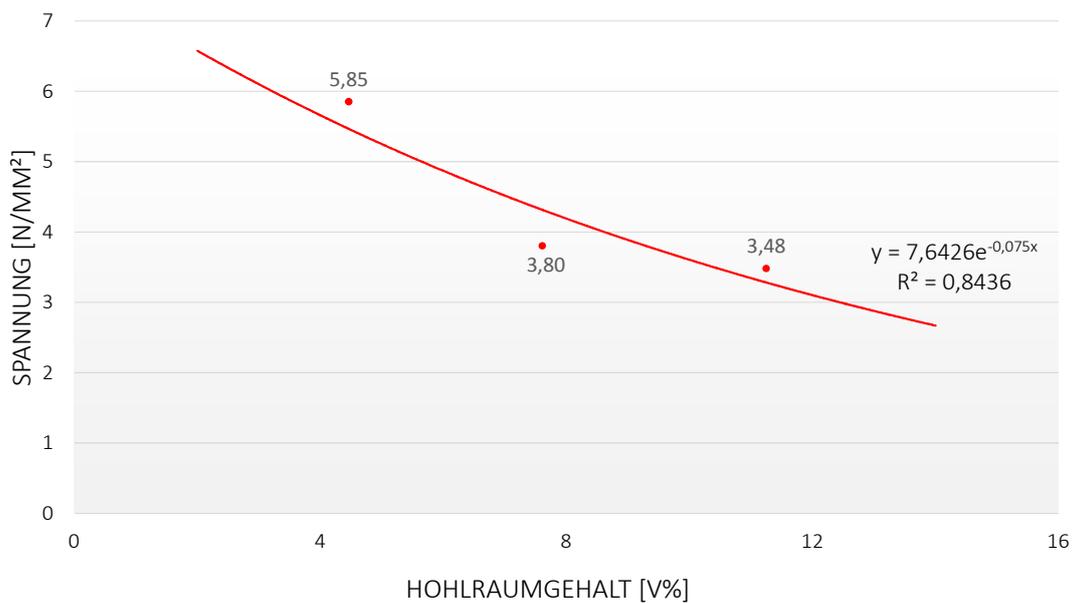


Abb. 47: maximale Zugfestigkeitsreserve bei unterschiedlichen Hohlraumgehalt [43]

Die Hypothese, dass durch den ansteigenden Hohlraumgehalt auch die Zugfestigkeitsreserve geringer ausfällt, wurde wie in Abb. 47 zu entnehmen, bestätigt. Allerdings fiel der Unterschied der Zugfestigkeitsreserven bei 8,0% und 12,0% Hohlraumgehalt deutlich niedriger aus als erwartet.

Ergebnis: Ein ansteigender Hohlraumgehalt führt zu einer geringeren Zugfestigkeitsreserve.

4. Optimierung der Prüfeinrichtung zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Nachdem im Zuge der Prüfungen für den ersten Teil dieser Diplomarbeit, Abweichungen zwischen alter und neuer Prüfmaschine erkannt wurden, ist es das Ziel dieses Teils der

Diplomarbeit, die Abweichung der beiden Prüfeinrichtungen voneinander zu untersuchen und zu verbessern, um die jeweiligen Ergebnisse vergleichen zu können. Als Startpunkt dieser Optimierungsphase gilt es auf den vorangegangenen Forschungsergebnissen weiter aufzubauen. Bei dieser Untersuchung wurde die genormte Abkühlrate von 10°C untersucht und festgestellt, dass das Gerät aus dem Jahr 2013 um circa 3% zu schnell abkühlt während das Gerät aus dem Jahr 2003 zwischen 1% bis 3% zu langsam abkühlt. Diese Informationen können aus Abb. 48 entnommen werden und werden in dieser Arbeit nicht abermals überprüft. [40]

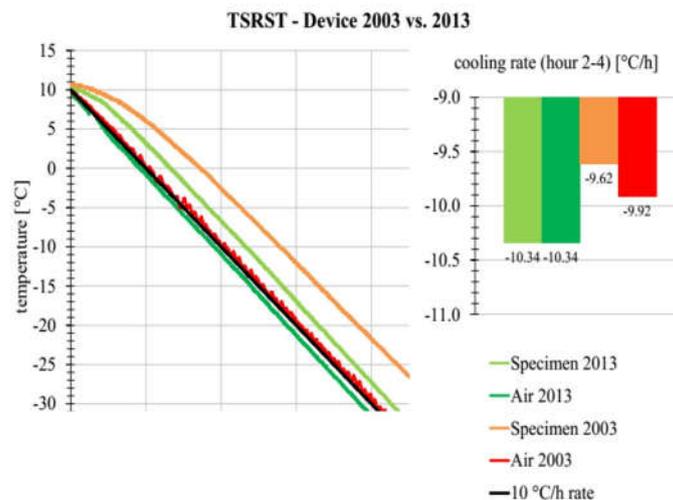


FIGURE 3 Air and specimen core temperature in a TSRST for 2003 and 2013 device.

Abb. 48: Abkühluntersuchung Gerät 2003 vs. 2013 [40]

Um an den Untersuchungen [40] anknüpfen zu können, werden in einem ersten Schritt weitere aussagekräftige Abkühlprüfungen mit drei Temperatursensoren, die an verschiedenen Positionen angebracht werden, durchgeführt. Diese unterschiedlichen Positionen werden im nächsten Punkt ausführlich beschrieben.

4.1 Überprüfung des IST- Stands

Bei dieser Optimierungsphase handelt es sich um zwei Prüfeinrichtungen gleichen Herstellers, aber unterschiedlichen Baujahres. Das ältere Versuchsgerät aus dem Jahr 2003 wird in weiterer Folge „Kälte-ALT“ genannt und das andere Versuchsgerät, welches zehn Jahre später (2013) für das Labor angeschafft wurde, wird mit dem Namen „Kälte-NEU“ bezeichnet. Um mit dem Prüfprogramm starten zu können, werden in einem ersten Schritt an beiden Geräten bei

unterschiedlichen Positionen, Temperaturmessungen vollzogen. In jeder Prüfkammer wurden drei Temperatursensoren positioniert, die die unterschiedlichen Temperaturverläufe darstellen. Der erste Sensor, der in den Auswertungen „Grün“ gekennzeichnet ist, symbolisiert die Abkühlrate innerhalb der Prüfzelle und wurde an der Oberseite der Kammer angebracht. Der nächste Sensor weist die Farbe „Rot“ auf und liefert jene Temperaturdaten, die innerhalb des Probekörpers herrschen. Dieser Sensor wurde direkt im Probekörper in der Mitte der Prüfkammer eingebaut. Der dritte und letzte Sensor der zur Temperaturüberprüfung herangezogen wird weist die Farbe „Violett“ auf und liefert die Abkühlrate innerhalb des Blindkörpers (Dummie). In den Abb. 49 und Abb. 50 sind für die Kälte-NEU und der Kälte-ALT die Positionen der Temperatursensoren gekennzeichnet.

Somit ergeben sich aus diesen drei unterschiedlich positionierten Temperatursensoren Abkühlkurven, die zum Vergleich herangezogen werden. Jede Prüfkammer wird, wie in der Norm EN-12697-46 beschrieben, mit einer Abkühlrate von 10°C/h abgekühlt. Die Starttemperatur ist ebenfalls in der Norm definiert und liegt bei +10°C. Diese Temperaturüberprüfung des Abkühlprozesses dauert circa acht Stunden und die Abkühlung erfolgt bis maximal -40°C. [26]



Abb. 49: Position Temperatursensoren Kälte-NEU [43]



Abb. 50: Position Temperatursensoren Kälte-ALT [43]

IST – Stand Kälte-NEU

Das Prüfgerät, welches im Jahr 2013 angeschafft wurde unterscheidet sich vor allem durch die unterschiedliche Größe der Temperierkammer gegenüber dem Gerät aus dem Jahr 2003. Diese

Kammer weist eine Breite von 60cm, eine Höhe von 90 cm und eine Tiefe von 60 cm auf. Bei einem größeren Volumen von 0,324 m³ (324 dm³), kann in der Kammer die abgekühlte Luft gut zirkulieren und den in der Mitte platzierten Probekörper abkühlen. Die Abkühlmessungen, welche bei der Kälte-NEU untersucht wurden sind in Abb. 51 zu erkennen. Beim Temperaturvergleich zeigt sich, dass der Probekörper (Kurve 3) schneller abkühlt als der Blindkörper (Kurve 4). Am Ende des Abkühlvorganges, der bis -40°C durchgeführt wird, treffen sich die drei Temperaturkurven nahezu in einem Punkt. Während sich die Lufttemperatur und die Probekörpertemperatur bei -39,7°C einpendeln, weist der Blindkörper mit -39,5°C eine höhere Temperatur auf. Allgemein betrachtet liegt die Temperaturdifferenz zwischen vordefinierten und tatsächlich ermittelten Temperaturen bei rund 1,25%, welches als sehr gutes Ergebnis bezeichnet wird.

Beim Vergleich der Kurven untereinander zeigt sich, dass die Differenz zwischen Kammertemperatur und Probekörpertemperatur bei maximal 4,2°C liegt. Die maximale Abweichung zwischen Probekörpertemperatur und Blindkörpertemperatur liegt bei lediglich 1,1°C. Diese beiden Werte werden als Referenzwerte für die Optimierung des Prüfgerätes aus dem Jahr 2003 herangezogen.

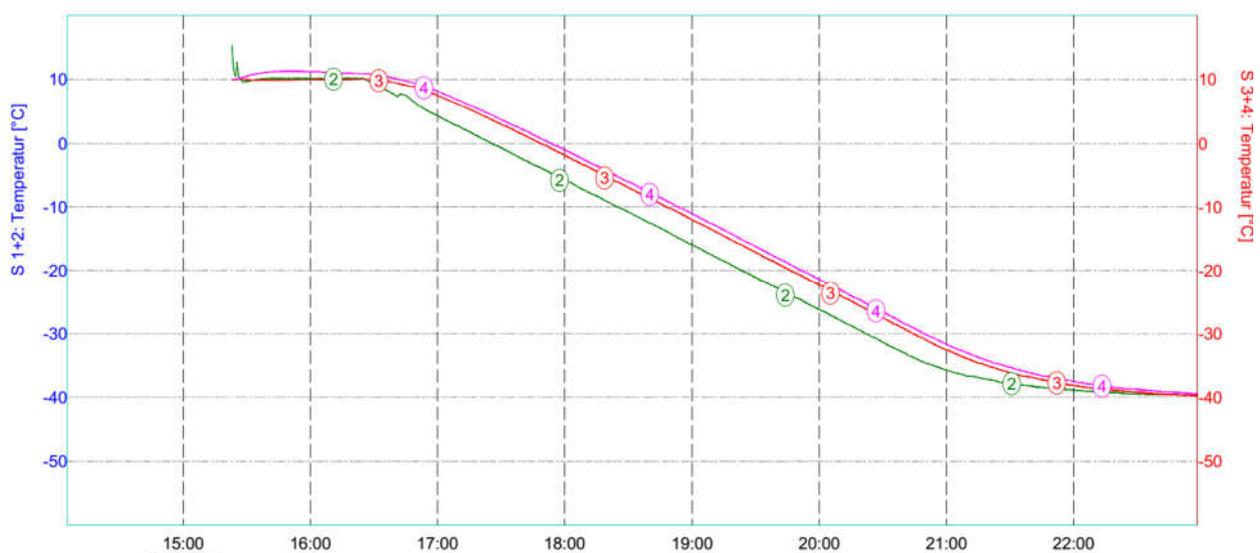


Abb. 51: Temperaturverlauf Kälte-NEU [43]

IST – Stand Kälte-ALT

Das Prüfgerät aus dem Jahre 2003 hat deutlich geringere Abmessungen, als die Kälte-NEU. Die Kammer weist eine Breite von 40cm, eine Höhe von 60cm und eine Tiefe von 35cm auf. Somit kann durch ein geringeres Volumen der Prüfkammer von $0,084 \text{ m}^3$ (84 dm^3) die Luft deutlich schlechter zirkulieren, wie dies bei der Kälte-NEU der Fall ist.

Zusätzlich behindert die massive Blindkörperhalterung die Zirkulation der abgekühlten Luft in der Kammer. Gut zu erkennen ist in Abb. 52, dass der Blindkörper (Kurve 4) schneller als der Probekörper (Kurve 3) abkühlt. Umgekehrt ist dies bei der Kälte-NEU der Fall.

Der Abkühlvorgang, wird wieder bis -40°C durchgeführt. Dabei wird deutlich, dass sich die Kurven nicht, wie bei der Kälte-NEU in einem Punkt schneiden, sondern erhebliche Unterschiede aufweisen.

Während sich die Lufttemperatur und die Blindkörpertemperatur bei $-38,6^\circ\text{C}$ einpendeln, weist der Probekörper eine deutlich höhere Temperatur von $-36,3^\circ\text{C}$ auf. Dies bedeutet, dass es mit der Prüfmaschine aus dem Jahr 2003 technisch nicht möglich ist den Probekörper auf die vordefinierte Temperatur von -40°C abzukühlen. Zusätzlich zeigen die Kurven eine deutliche Streuung gegenüber der Abb. 51 auf. Beim Vergleich der Kurven untereinander zeigt sich, dass die Abkühlkurve (Kurve 2) und die Probekörpertemperatur (Kurve 3) eine maximale Temperaturdifferenz von $10,8^\circ\text{C}$ aufweist. Dieser Wert bedeutet, dass eine 2,5-fach größere Differenz als in der Kälte-NEU ermittelt wurde. Die Abkühlkurve des Probekörpers und die des Blindkörpers zeigen eine maximale Differenz von $4,5^\circ\text{C}$.

Diese beiden Werte gilt es mit unterschiedlichen Umbauten in der Prüfkammer zu verbessern und an die Referenzwerte der Kälte-NEU anzunähern.

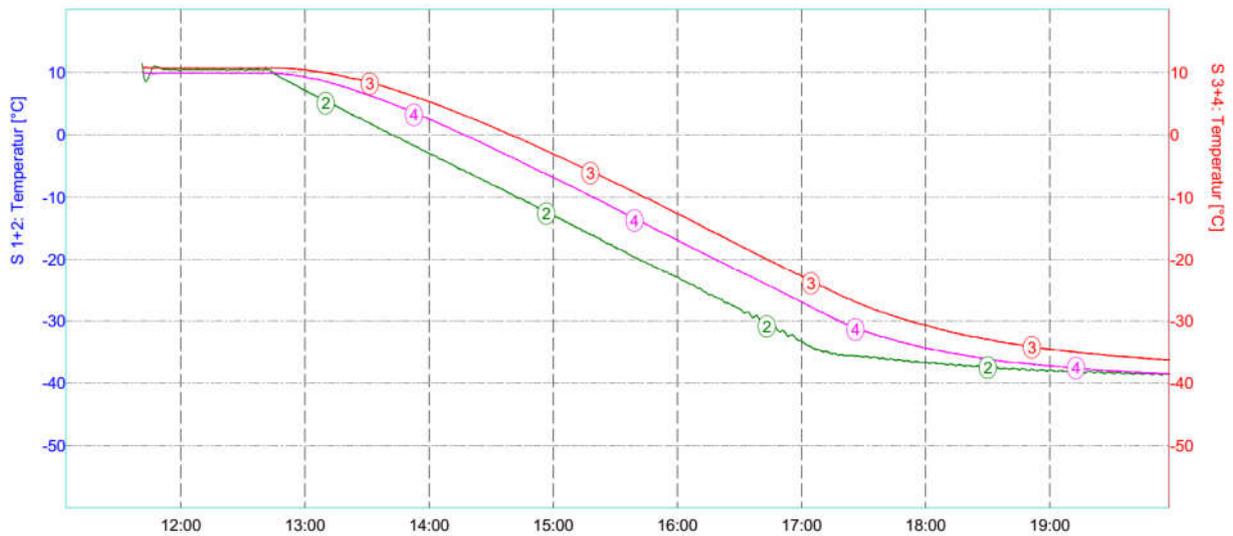


Abb. 52: Temperaturverlauf Kälte-ALT [43]

4.2 Optimierung der Prüfgeräte

Ergebnisse IST – Stand Kälte-ALT mit verändertem Prüfaufbau

Probekörper- und Blindkörperhalterung

Um die Temperaturdifferenz zwischen Blindkörper und Probekörper, wie in Abb. 52 ersichtlich, zu verringern, werden in einem ersten Schritt bei der Prüfeinrichtung der Kälte-ALT Anbauteile innerhalb der Abkühlkammer ausgetauscht, die beim Abkühlen entstehende Luftzirkulation stören. Wie zuvor bei der Kälte-NEU und Kälte-ALT wird auch bei der optimierten Kälte-ALT die Positionen der Temperatursensoren farblich markiert (Abb. 53)



Abb. 53: Position Temperatursensoren Kälte-ALT optimiert [43]

Da bei vorhergegangenen Forschungen herausgefunden wurde, dass die Luftzirkulation verbessert werden muss, werden die massiven Platten aus Stahl, die den Probekörper mit den Bewegungssensoren verbinden, durch filigranere Platten aus Aluminium ersetzt. [40]

Diese neuen und leichteren Platten sind in Abb. 54 ersichtlich. Somit hat der Probekörper die Möglichkeit besser mit der abgekühlten Luft angestrahlt zu werden. Als nächste Veränderung in der Prüfkammer wird der Aufbau auf dem der Blindkörper steht getauscht. Anstelle des alten massiven Aufbaus, der die Luftzirkulation in der Kammer stört, wird ein neuer Aufbau verwendet, der es ermöglicht die abkühlende Temperatur besser zirkulieren zu lassen.



Abb. 54: Alte und Neue PK-Halterung [43]

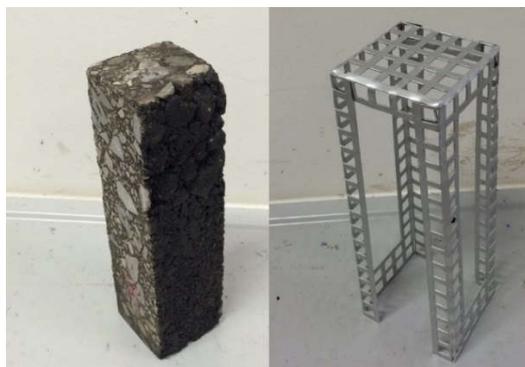


Abb. 55: Alte und Neue Blindkörperhalterung [43]

Diese neue Halterung für den Blindkörper wurde aus einem Art Lochblech, mit denselben Abmessungen wie die der alten Halterung, hergestellt (Abb. 55) Diese Abmessungen betragen in der Breite und Tiefe circa 5cm und in der Höhe circa 22,5cm.

Bei der Wiederholung des Abkühlprozesses mit den neuen Einbauten konnte festgestellt werden, dass sich die Temperaturkurven im Blindkörper, im Probekörper, aber auch in der Kammer einander gegenüber dem alten Aufbau annähern. Die ermittelten Kurven sind der Abb. 59 zu entnehmen. Wie bei den vorherigen Abkühlvorgängen wurde die vordefinierte Zieltemperatur in der Kammer wieder auf -40°C eingestellt.

Dies bedeutet, dass es mit der Prüfmaschine aus dem Jahr 2003, trotz neuer Einbauten, technisch nicht möglich ist den Probekörper auf die gewünschte Temperatur von -40°C abzukühlen. Erstaunlich in diesem Diagramm ist die Abkühlkurve des Blindkörpers. Dieser wurde in der Prüfkammer rechts vorne aufgestellt (Abb. 56). Bei vorausgegangenen Prüfungen hinsichtlich der optimalen Position des Blindkörpers wurde diese Position als am passendsten festgestellt. Die Position der zusätzlichen Ventilatoren sind in Abb. 57 und Abb. 58 ersichtlich.

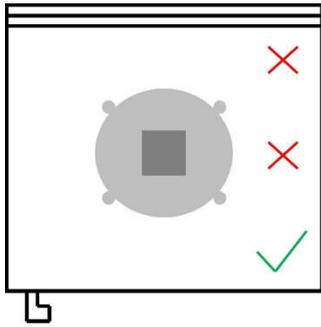


Abb. 56: Blindkörperposition [43]

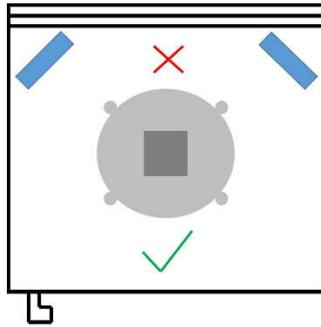
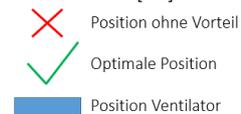


Abb. 57: Dummy Position mit Ventilatoren [43]



Abb. 58: Position der Ventilatoren [43] nach [40]



Beim Vergleich der Kurven untereinander zeigt sich in Abb. 59, dass die Abkühlkurve (Kurve 2) und die Probekörpertemperatur (Kurve 3) eine maximale Temperaturdifferenz von $7,2^{\circ}\text{C}$ aufweisen. Dies ist eine Verbesserung gegenüber den alten Einbauten in der Kammer von $3,6^{\circ}\text{C}$. Die Abkühlkurve des Probekörpers und die des Blindkörpers weisen eine maximale Differenz von $4,0^{\circ}\text{C}$ auf. Das bedeutet eine geringe Verbesserung von $0,5^{\circ}\text{C}$ gegenüber den alten Einbauten.

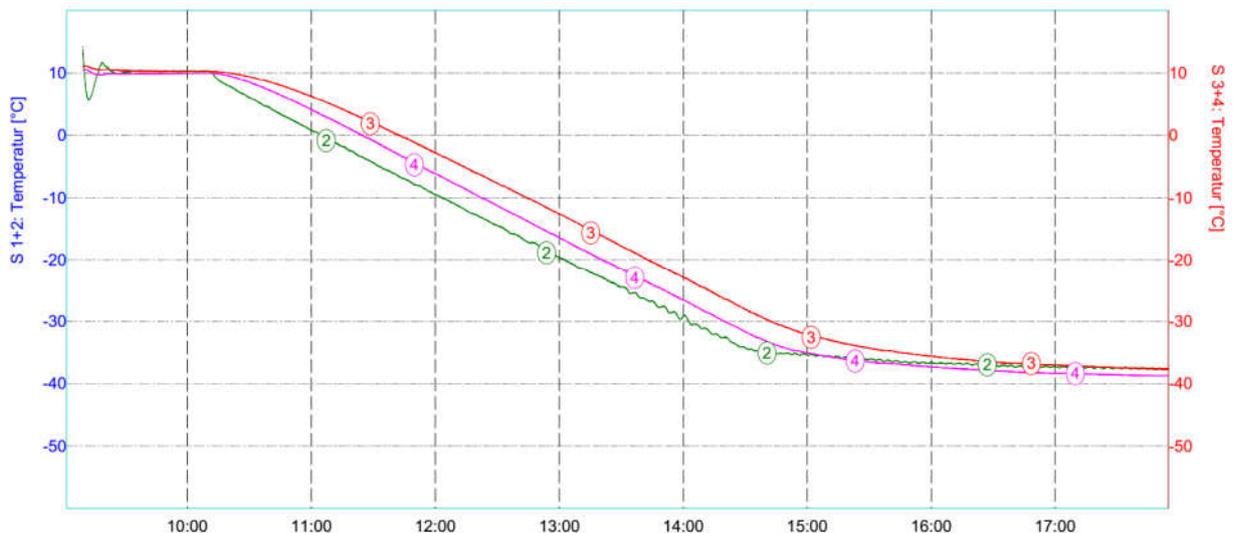


Abb. 59: Temperaturverlauf Kälte-ALT mit neuen Einbauten [43]

Probekörper- und Blindkörperhalterung und Einbau von Ventilatoren

Um weitere verbesserte Ergebnisse aus der Optimierungsphase zu erhalten, werden zusätzlich zu den neuen Probekörper- und Blindkörperhalterungen, zwei Ventilatoren mit 29 Volt in die Prüfkammer integriert. Diese Ventilatoren vom Hersteller Papst, Typ 4124 FS, besitzen die

Abmessungen von 119x119x38 (Länge/ Breite/ Tiefe). Bei Voruntersuchungen zeigte sich, dass die Luftgeschwindigkeit innerhalb der beiden unterschiedlichen Kammern deutliche Unterschiede aufweisen. Während in der Prüfkammer der Kälte-NEU eine Luftgeschwindigkeit von 1,4m/s herrscht, wurde innerhalb der Kammer der Kälte-ALT eine Luftgeschwindigkeit von lediglich 0,5 m/s gemessen. Diesen Unterschied von 0,9m/s gilt es mit den beiden Lüftern verringern (Abb. 57 und Abb. 58). [40]

Auch bei diesem Abkühlversuch wurde vorab die optimale Blindkörperposition untersucht. Nach einigen Messungen wurde die Position direkt vorne mittig gewählt. Dadurch wird gewährleistet, dass durch die Ventilatoren transportierte und abgekühlte Luft gleichmäßig zum Probekörper und Blindkörper geleitet wird.

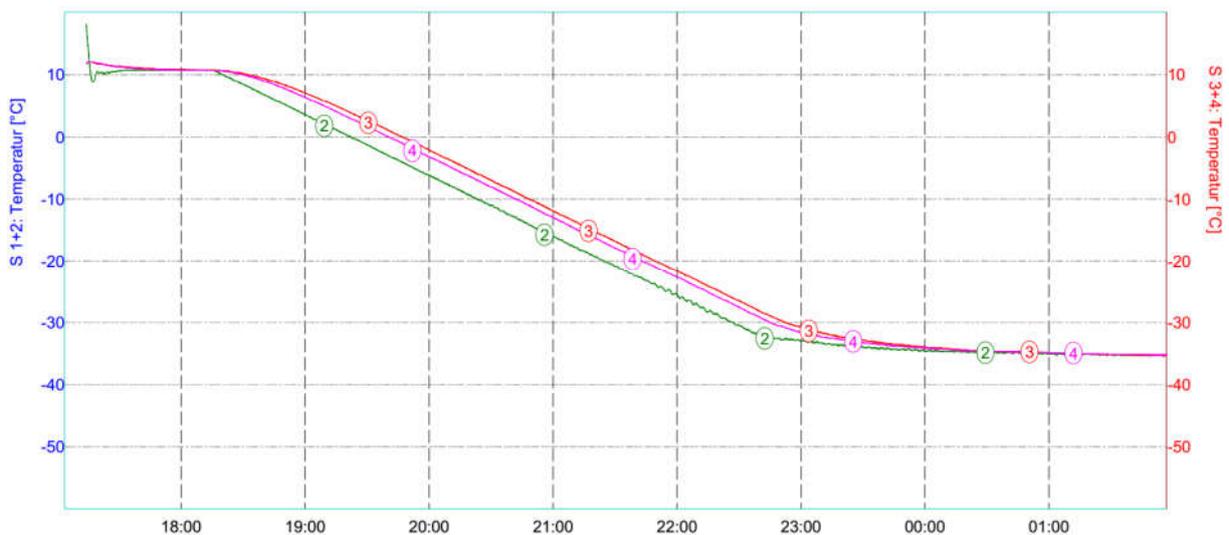


Abb. 60: Temperaturverlauf Kälte ALT mit neuen Einbauten und Ventilatoren [43]

Beim Vergleich der Kurven untereinander zeigt sich in Abb. 60, dass die Abkühlkurve (Kurve 2) und die Probekörpertemperatur (Kurve 3) eine maximale Temperaturdifferenz von 4,4 °C aufweist. Die Referenzergebnisse in der Abb. 51, von der Kälte-NEU liegen bei 4,2°C (Temperaturdifferenz zwischen Kammer und Probekörper) und 1,1°C (Temperaturdifferenz zwischen Probekörper und Blindkörper). Bei der Gegenüberstellung vom Referenzergebnis und diesem Ergebnis ergibt sich einen Temperaturunterschied von 0,2 °C. Die Abkühlkurve des Probekörpers und die des Blindkörpers weisen eine maximale Differenz von 1,3°C auf. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Optimierungen innerhalb der Prüfkammer, um auf die Referenzergebnisse der Kälte-NEU zu kommen, einen deutlichen Erfolg bringen.

In den folgenden Diagrammen sind die beschriebenen Temperaturdifferenzen grafisch gegenübergestellt. Der Abb. 61 sind die Temperaturdifferenzen zwischen Kammer- und Probekörpertemperatur zu entnehmen. Zusätzlich wurde auch die Blindkörpertemperatur mit der Probekörpertemperatur verglichen (Abb. 62), um eine Aussage treffen zu können. Durch die zuvor beschriebenen Optimierungsmaßnahmen konnte die Luftzirkulation deutlich der Kälte-NEU angenähert werden.

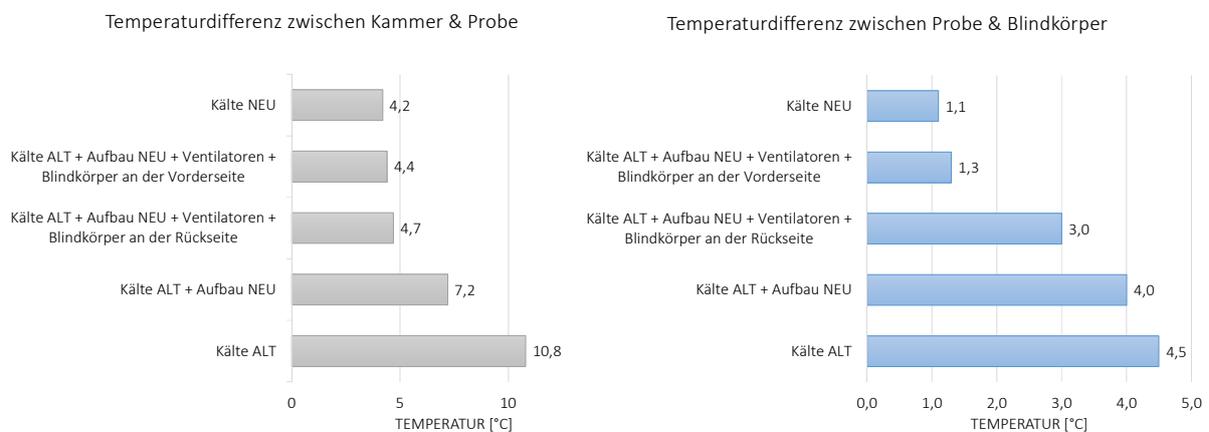


Abb. 61: Temperaturdifferenz zw. Kammer & Probe [43]

Abb. 62: Temperaturdifferenz zw. Probe & Blindkörper [43]

4.3 Start des Prüfvorgangs mit Probekörpern

Der Versuchsablauf mit Probekörperprüfungen wird in zwei Teile getrennt. Der erste Teil, wird mit circa 18 Monate luftgelagerten Probekörpern gestartet, um die Unterschiede zu den Ergebnissen mit frisch hergestellten Probekörpern zu untersuchen. Da nur ein geringer Anteil an luftgelagerten Probekörpern vorhanden war, gibt es nur Vergleichsuntersuchungen zwischen der Kälte-NEU und der optimierten Kälte-ALT. Die Abb. 63 und Abb. 64 zeigen Bruchtemperatur und Bruchspannung der luftgelagerten Probekörper. Diese Ergebnisse fallen, wie erwartet, hinsichtlich der Bruchtemperatur, deutlich geringer aus, wie der Abb. 63 zu entnehmen (vgl. Abb. 65). Der mögliche Grund dafür könnte eine Verschlechterung der Relaxationsfähigkeit der luftgelagerten Probekörper sein. Das bedeutet, dass sich die kryogenen Spannungen im Probekörper beim Vergleich mit den frisch hergestellten Probekörper rascher aufbauen. Hingegen bei der Bruchspannung der luftgelagerten PK,

dargestellt in Abb. 64, konnte keine wesentliche Verschlechterung gegenüber der frisch hergestellten Probekörper festgestellt werden (vgl. Abb. 66). Das bedeutet, es gibt keinen Unterschied hinsichtlich Festigkeit und Struktur der Probekörper. Allerdings kommt es durch die 18-monatige Lagerung zu einer Verschlechterung der Bruchtemperatur.

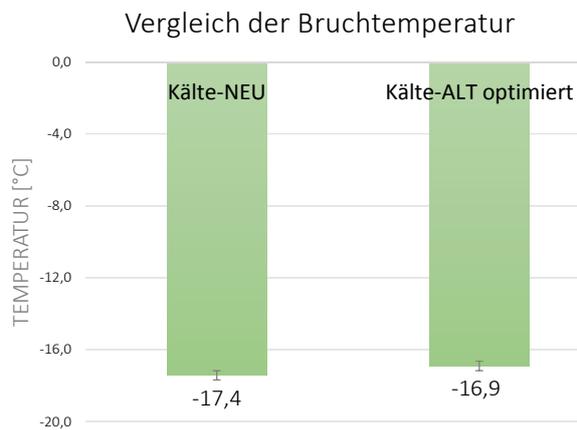


Abb. 63: Bruchtemperatur luftgelagerter Probekörper [43]

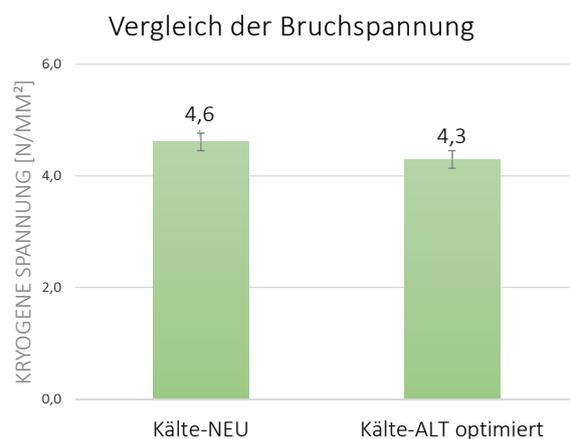


Abb. 64: Bruchspannung luftgelagerter Probekörper [43]

Der zweite Teil des Prüfprogramms, wird mit frisch hergestellten Probekörpern gestartet. Dabei werden die Ergebnisse von mindestens drei Proben pro Versuchsaufbau ermittelt. Das bedeutet es werden mit der Kälte-NEU, mit der Kälte-ALT und mit der optimierten Kälte-ALT, insgesamt neun Ergebnisse ermittelt und gegenübergestellt.

Beim Vergleich der gewonnenen Ergebnisse (Abb. 65) ist deutlich zu erkennen, dass die Bruchtemperatur im Gegensatz zu den luftgelagerten Probekörpern deutlich höher ausfällt.

Die Differenz zwischen Kälte-ALT und der Kälte-NEU ist dem Diagramm mit über 5°C zu entnehmen. Erfreulich hingegen ist, dass sich die Ergebnisse der Bruchtemperatur zwischen Kälte-NEU und optimierter Kälte-ALT bis auf circa 1°C annähern. Bei der Bruchspannung in Abb. 66 zeigen sich in Bezug auf die Bruchspannung keine erheblichen Unterschiede zwischen den Prüfgeräten.

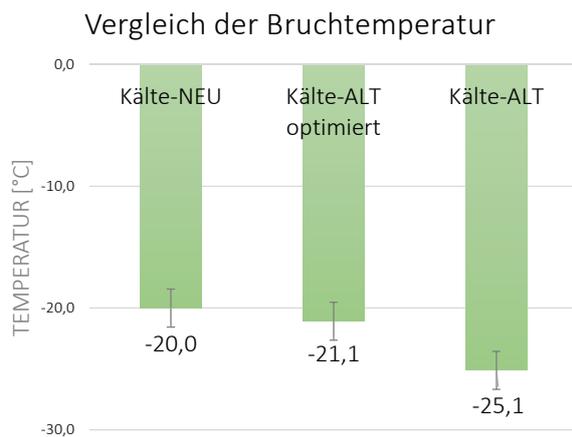


Abb. 65: Vergleich der Bruchtemperatur von frisch hergestellten Probekörpern [43]

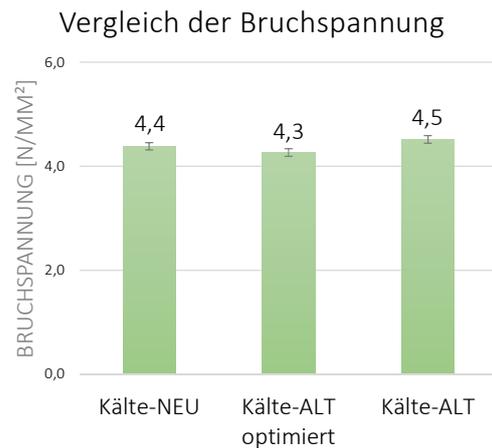


Abb. 66: Vergleich der Bruchspannung von frisch hergestellten Probekörpern [43]

Um diese Problemstellung nochmals deutlich darzustellen werden die Ergebnisse aus den TSRST-Versuchen grafisch in einem Diagramm festgehalten (Abb. 67). An dieser Stelle werden auf der X-Achse die Abkühltemperatur und auf der Y-Achse die kryogenen Spannungen aufgezeigt. Auch hier ist die höhere (schlechtere) Bruchtemperatur die mit der Kälte-ALT gewonnen wurden, gut zu erkennen (roten Kurven). Hinsichtlich der beiden anderen Kurvenfarben, wobei die blaue Kurve für die optimierte Kälte-ALT und die grüne Kurve für die Kälte-NEU steht, zeigen deutlich die Annäherungen zueinander (Abb. 67). Das bedeutet, dass diese überprüften Optimierungsmaßnahmen einen Erfolg gebracht haben und beide Prüfeinrichtungen nun auch untereinander verglichen werden können.

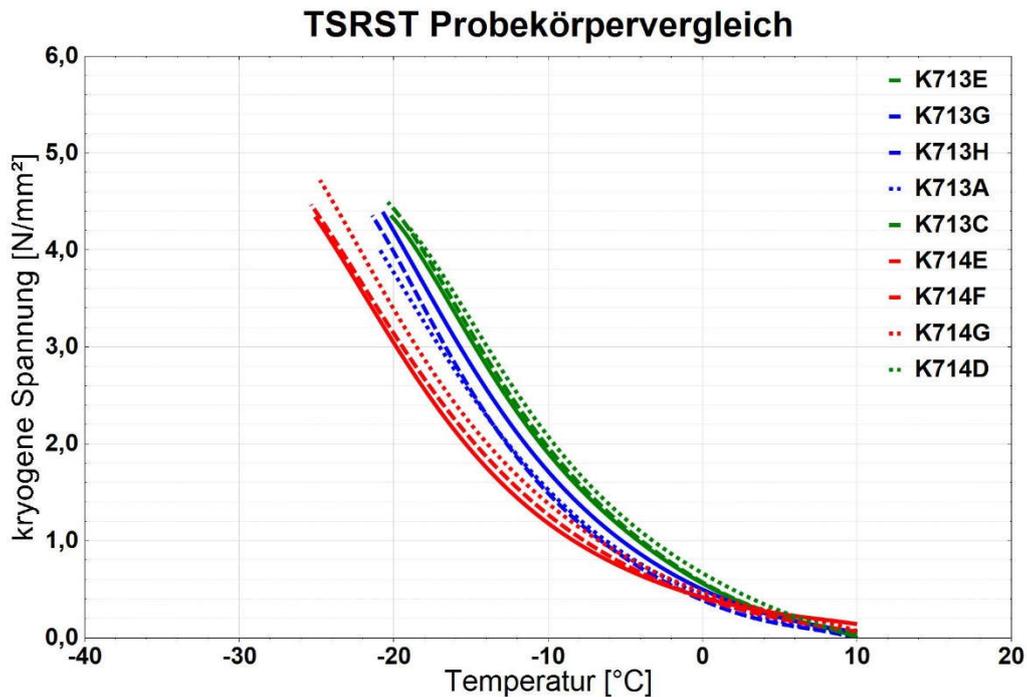


Abb. 67: Probekörpervergleich von Kälte-ALT (rot), Kälte-NEU (grün) und optimierte Kälte-ALT (blau) [43]

5. Conclusio und Ausblick

In dieser Diplomarbeit werden Untersuchungen angestellt, die kältebedingten Spannungen eines Asphaltmischguts im Tieftemperaturbereich simulieren. Zusätzlich zu den mechanischen Spannungen, die durch die Verkehrsbeanspruchung entstehen, wird der Asphalt in den Wintermonaten mit kryogenen (kältebedingten) Spannungen beansprucht.

Im Mittelpunkt des Forschungsinteresses stand folgende Fragestellung:

Wie verhält sich der Asphalt bei unterschiedlichen Hohlraumgehalten im Tieftemperaturbereich?

Mittels TSRST-Versuchen (Abkühlprüfung) und UTST-Versuchen (Einaxiale Kältezugsprüfung) wurde dieses Thema näher beleuchtet und konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden.

Der Hohlraumgehalt hat erheblichen Einfluss auf die Zugfestigkeit. Umso größer der Hohlraumgehalt, desto geringer fallen die Zugfestigkeit aus. Wie vermutet, tritt die größte Zugfestigkeit beim kleinsten Hohlraumgehalt auf und wird immer kleiner je höher der Hohlraumgehalt. Diese Versuche wurden bei drei unterschiedlichen Hohlraumgehalten durchgeführt (4,5%, 8,0% und 12,0%). Deutliche Unterschiede bei den Ergebnissen sind bei 4,5% und 8% Hohlraumgehalt zu erkennen. Hingegen eher kleine Unterschiede bei den Ergebnissen zeigte sich beim Vergleich von 8,0% und 12,0% Hohlraumgehalt.

Diese Versuche die zuvor aufgezeigt wurden (TSRST/ UTST Verfahren) sind im Labor für Straßenwesen an der Technischen Universität Wien mittels zwei Prüfgeräten durchgeführt worden. Diese Geräte sind vom selben Hersteller und haben ein unterschiedliches Baujahr. Das alte Gerät wurde im Jahr 2003 angeschafft, das neuere Gerät im Jahr 2013.

Im Zuge dieser Tieftemperaturuntersuchungen wurde festgestellt, dass sich diese Geräte hinsichtlich Bruchtemperatur deutlich unterscheiden. Das neuere Modell liefert deutlich höhere Bruchtemperaturen und somit schlechtere Ergebnisse. Dadurch gab es folgendes Forschungsinteresse für den zweiten Teil der Diplomarbeit:

Woher kommen diese Ergebnisunterschiede der Prüfgeräte und wie können beide Maschinen angeglichen werden?

Durch voran gegangene Untersuchungen wurde als primäres Problem die unterschiedliche Luftgeschwindigkeit beider Prüfgeräte festgestellt. Diese Differenz der Luftgeschwindigkeit von 0,7 m/s konnte mittels zusätzlich eingebauten Ventilatoren innerhalb der Prüfkammer verkleinert werden. Zusätzlich wurden Anbauteile in der Prüfkammer getauscht, um die Luftzirkulation zu verbessern. Diese erneuerten Teile waren einerseits eine schlankere Halterung der Wegaufnehmer und andererseits eine filigrane Blindkörperhalterung. Beides bewirkt eine bessere Zirkulation der Luft. In weiteren Schritten wird es notwendig sein die Norm EN 12697-46 hinsichtlich der Prüfgerät (Kälte-NEU und Kälte-ALT) aufzuarbeiten und in weiterer Folge zu ändern.

Aus den Ergebnissen dieser Diplomarbeit ergeben sich weitere spannende Fragestellungen für die Forschung, welche in einem Ausblick kurz zusammengefasst werden können:

- Gibt es zu den gewonnenen Ergebnissen Parallelen in Hinblick der Zugfestigkeitsreserve bei anderen Mischgütern?
- Kann durch höhenverstellbare Positionierung der Ventilatoren und/ oder Stärke der Ventilatoren weiter eine Annäherung an die Kälte-NEU erfolgen?

Abschließend kann gesagt werden, dass diese Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses des Hohlraumgehalts auf das Tieftemperaturverhalten als Vorstudie dient.

Als Teil eines Forschungsprojekts, werden diese Referenzergebnisse, in naher Zukunft mit Ergebnissen von künstlich gealterten Probekörpern verglichen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Zander, Ulf (2011): Bitumenhaltige Baustoffe. In: Neroth, Günther/ Vollenschaar, Dieter (Hrsg.): Wendeorst Baustoffkunde. Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz. 27.Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien: 751-812.
- [2] Emberger, Günter (2017): Verkehrsträger- und Mobilitätsmanagement. TU Wien: Institut für Verkehrswissenschaften, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.
- [3] Spiegl, Markus/ Bleier, Hans/ Loibl, Andreas (2010): Bitumenhaltige Bindemittel. In: Gestrata (Hrsg.): Asphalt Handbuch. 4.Auflage, Wien: Gestrata: 17-70.
- [4] Blab, Ronald/ Eberhardsteiner, Lukas (2017): Konstruktiver Straßenbau. TU Wien: Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen.
- [5] Müller, Werner/ Vasiljevic, Alexander (2010): Asphalt im Straßenbau. In: Gestrata (Hrsg.): Asphalt Handbuch. 4.Auflage, Wien: Gestrata: 139-218.
- [6] Hofko, Bernhard/ Steiner, Daniel (2017): Baustoffe im Verkehrswegebau. TU Wien: Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen.
- [7] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2015): EN 1426:2015: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel- Bestimmung der Nadelpenetration. Brussels.
- [8] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2015): EN 1427:2015: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel- Bestimmung des Erweichungspunktes- Ring- und Kugel- Verfahren. Brussels.
- [9] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2015): EN 12593: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel- Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß. Brussels.
- [10] Deutsches Institut für Normung e.V. (2007): DIN 52013: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Duktilität. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [11] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2017): EN 13398: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel- Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen. Brussels.
- [12] Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH (2011): Wir über uns. Online unter: <http://www.loja.at/ueberuns.html>. (Abfrage: 31.05.2018).
- [13] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 12697-11: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen. Brussels.
- [14] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2007): EN 12697-22: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Spurbildungstest. Brussels.
- [15] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 12697-30: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Probenvorbereitung, Marshall- Verdichtungsgerät. Brussels.
- [16] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 12697-34: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Marshall- Prüfung. Brussels.
- [17] Müller, Werner/ Blab, Ronald/ Buchta, Martin (2010): Prüfungen. In: Gestrata (Hrsg.): Asphalt Handbuch. 4.Auflage, Wien: Gestrata: 257-304.
- [18] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2010): EN 13302: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel- Bestimmung der dynamischen Viskosität von bitumenhaltigen Bindemittel mit einem Viskositmeter mit rotierender Spindel. Brussels.
- [19] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel- Bestimmung des komplexen Schermoduls und Phasenwinkels- Dynamischer Scherrheometer(DSR). Brussels.
- [20] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 14771: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel- Bestimmung der Biegekiechsteifigkeit- Biegebalkenrheometer (BBR). Brussels.
- [21] Litzka, Johann (1998): Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. In: Mitteilungen des Institutes für Strassenbau und Strassenerhaltung TU Wien, 2018 (Heft 9): 1-198.
- [22] Spiegl, Markus (2008): Tieftemperaturverhalten von bituminösen Baustoffen. Labortechnische Ansprache und numerische Simulation des Gebrauchsverhaltens. Wien: Institut für Straßenbau u. Straßenerhaltung, TU Wien.

- [23] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 12697-24: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Beständigkeit gegen Ermüdung. Brussels.
- [24] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 12697-26: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Steifigkeit. Brussels.
- [25] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2016): EN 12697-25: Asphalt- Prüfverfahren – Druck-Schwellversuch. Brussels.
- [26] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 12697-46: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen. Brussels.
- [27] Steiner, Daniel/ Hofko, Bernhard/ Dimitrov, Mariyan/ Blab, Ronald (2016): Impact of Loading Rate and Temperature on Tensile Strength of Asphalt Mixtures at Low Temperatures. In: Armelle, Chabot/ William G., Buttlar/ Eshan V., Dave/ Christophe, Petit/ Gabriele, Tebaldi (Hrsg.): 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. Netherlands: Springer Verlag: 69-74.
- [28] Hofko, Bernhard/ Steiner, Daniel (2017): Beiträge zur Verbesserung der Vergleichbarkeit des Kälteverhaltens im Abkühlversuch (TSRST). In: 5. Dresdner Asphalttage. Dresden.
- [29] Krzemien, Randolf/ Pfeiler, Andreas (2010): Gesteinskörnungen. In: Gestrata (Hrsg.): Asphalt Handbuch. 4.Auflage, Wien: Gestrata: 71-110.
- [30] Austrian Standards Institute (2016): ÖNORM EN 13043. Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen. Wien: Austrian Standards plus GmbH.
- [31] Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH (2011): Baustoff Stein. Online unter: <http://www.loja.at/ueberuns.html> (Abfrage: 31.05.2018).
- [32] Austrian Standards Institute (2014): ONR 23580. Erstprüfung von Asphaltmischgut Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-20:2009 – Empirischer Ansatz. Wien: Austrian Standards plus GmbH.
- [33] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2016): EN 12697-35: Asphalt- Prüfverfahren – Labormischung. Brussels.
- [34] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2007): EN 12697-33: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät. Brussels.
- [35] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2009): EN 12697-5: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Bestimmung der Rohdichte. Brussels.
- [36] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2012): EN 12697-6: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Bestimmung der Raumdichte von Asphaltprobekörpern. Brussels.
- [37] CEN- CENELEC Management- Zentrum (2003): EN 12697-8: Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Bestimmung der volumetrischen Charakteristiken von Asphalt- Probekörpern. Brussels.
- [38] Wikimedia Foundation (2018): Time–temperature superposition. Online unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Time%E2%80%93temperature_superposition. (Abfrage: 31.05.2018).
- [39] Kappl, Karl- Franz (2007): Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit Hilfe von zyklischen Triaxialprüfungen. Wien: Institut für Straßenbau u. Straßenerhaltung, TU Wien.
- [40] Hofko, Bernhard/ Steiner, Daniel (2018): On the influence of basic thermodynamics on thermal cracking resistance of asphalt mixtures in cooling tests. Wien: TU Wien.
- [41] Arand, Wolfgang (1987): Einfluß der Zusammensetzung von Walzasphalt auf das Verhalten bei Kälte. In: Straße und Autobahn, 1987 (Heft 8): 299-303.
- [42] Ottensmann, Ralf (2018): Typische Schäden von Asphaltflächen. Spurrinnen. Online unter: http://www.gutachter-strassenbau.de/Typische_Schaeden/Asphaltbauweise/schadensbilder_asphalt01.htm. (Abfrage: 31.05.2018).
- [43] Quelle: Eigene Darstellung.
- [44] Universität Kassel (2018): Sachgebiet Bau und Erhaltung von Verkehrswegen. Konventionelle Bitumenprüfung. Online unter: <https://www.uni-kassel.de/fb14bau/institute/ifv/sachgebiet-bau-und-erhaltung-von-verkehrswegen/verkehrswegebau-labor/konventionelle-bitumenpruefung.html>. (Abfrage: 31.05.2018).

7. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ermüdung.....	6
Abb. 2: Verformung.....	6
Abb. 3: Tieftemperatur.....	6
Abb. 4: Systemskizze der Nadelpenetration	16
Abb. 5: Systemskizze Erweichungspunkt Ring und Kugel.....	16
Abb. 6: Systemskizze Brechpunkt nach Fraaß.....	17
Abb. 7: Skizze der Gießform bei Bestimmung der Duktilität oder elastischer Rückformung....	18
Abb. 8: Affinität.....	19
Abb. 9: Prüfaufbau des Spurbildungstests	20
Abb. 10: Versuchsaufbau Marshall Prüfung.....	21
Abb. 11: Einbau eines MPK	21
Abb. 12: Systemskizze Rotational-Viscosimeter	22
Abb. 13: Systemskizze DSR- Versuch	23
Abb. 14: Systemskizze Bending Beam Rheometer	23
Abb. 15: Messprinzip des Direct Tension Tests	24
Abb. 16: Versuchsaufbau Vier Punkt Biegebalken.....	25
Abb. 17: Systemskizze Prüfaufbau TCCT	26
Abb. 18: Systemskizze des UTST & TSRST Versuchs	27
Abb. 19: 4,5% ± 0,5% Hohlraumgehalt.....	30
Abb. 20: 8% ± 1,0% Hohlraumgehalt.....	30
Abb. 21: 12% ± 1,0% Hohlraumgehalt.....	30
Abb. 22: Empfohlene und vorgeschriebene Grenzsieblinie des SMA 11, S3 und Darstellung der IST-Sieblinie.....	32
Abb. 23 Mischgutzusammensetzung in M%- Anteile	32
Abb. 24 Mischgutzusammensetzung	33
Abb. 25:Montagebank, Stahladapter und Probekörper.....	35
Abb. 26: Klebekeil	36
Abb. 27: Prinzipskizze Montagebank.....	36

Abb. 28: Versuchsprinzip TSRST.....	38
Abb. 29: Temperaturschema	38
Abb. 30: Kraft/ Temperaturverlauf über die Zeit.....	39
Abb. 31: Verlauf der kryogenen Zugspannung	39
Abb. 32: Versuchsprinzip	40
Abb. 33: Temperaturschema	40
Abb. 34: UTST Kurve	41
Abb. 35: UTST Probekörpervergleich bei +5°C Prüftemperatur	43
Abb. 36: UTST Probekörpervergleich bei -15°C Prüftemperatur	43
Abb. 37: UTST Probekörpervergleich bei -30°C Prüftemperatur	44
Abb. 38: UTST Probekörpervergleich bei +5°C, -15°C und -30°C.....	45
Abb. 39: TSRST Probekörpervergleich.....	45
Abb. 40: Kryogene Spannungen bei +5°C.....	46
Abb. 41: Kryogene Spannungen bei -15°C	47
Abb. 42: Kryogene Spannungen bei -30°C	48
Abb. 43: Vergleich der kryogenen Spannungen	49
Abb. 44: Zugfestigkeitsreserve bei 4,5% Hohlraumgehalt	50
Abb. 45: Zugfestigkeitsreserve bei 8,0% Hohlraumgehalt	51
Abb. 46: Zugfestigkeitsreserve bei 12,0% Hohlraumgehalt	51
Abb. 47: maximale Zugfestigkeitsreserve bei unterschiedlichen Hohlraumgehalt	52
Abb. 48: Abkühluntersuchung Gerät 2003 vs. 2013.....	53
Abb. 49: Position Temperatursensoren Kälte-NEU	54
Abb. 50: Position Temperatursensoren Kälte-ALT.....	54
Abb. 51: Temperaturverlauf Kälte-NEU	55
Abb. 52: Temperaturverlauf Kälte-ALT.....	57
Abb. 53: Position Temperatursensoren Kälte-ALT optimiert.....	57
Abb. 54: Alte und Neue PK-Halterung	58
Abb. 55: Alte und Neue Blindkörperhalterung	58
Abb. 56: Blindkörperposition	59
Abb. 57: Dummie Position mit Ventilatoren	59

Abb. 58: Position der Ventilatoren	59
Abb. 59: Temperaturverlauf Kälte-ALT mit neuen Einbauten.....	59
Abb. 60: Temperaturverlauf Kälte ALT mit neuen Einbauten und Ventilatoren.....	60
Abb. 61: Temperaturdifferenz zw. Kammer & Probe.....	61
Abb. 62: Temperaturdifferenz zw. Probe & Blindkörper.....	61
Abb. 63: Bruchtemperatur luftgelagerter Probekörper	62
Abb. 64: Bruchspannung luftgelagerter Probekörper	62
Abb. 65: Vergleich der Bruchtemperatur von frisch.....	63
Abb. 66: Vergleich der Bruchspannung von frisch.....	63
Abb. 67: Probekörpervergleich von Kälte-ALT (rot), Kälte-NEU (grün) und optimierte Kälte-ALT (blau)	64