

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Einfluss der Produktionstemperatur auf die Verarbeitbarkeit und das Alterungsverhalten von Gussasphalt

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

unter der Leitung von

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

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

und als verantwortlich mitwirkender Betreuer

Dipl.-Ing. Mariyan Dimitrov

am

Institut für Verkehrswissenschaften

E230

Forschungsbereich für Straßenwesen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Benjamin Lucas Peternell, BSc

0726169

Webergasse 5/10
1200 Wien

Wien, am 04. Okt. 2016

DANKSAGUNG

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken die mich im Studium und während meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Als allererstes möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab und Herrn Ass. Prof Dipl.-Ing Dr. techn. Bernhard Hofko für die Bereitstellung sowie die Betreuung meines Diplomarbeitsthemas bedanken.

Besonderer Dank gebührt Dipl.-Ing. Mariyan Dimitrov, der mir während der Erstellung dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Ich möchte mich auch herzlich bei Herrn Thomas Riedmayer und dem ganzen Team des Straßenwesen-Labors für die Einschulung an den Laborgeräten bedanken.

Dank gebührt auch meinen Freunden und Studienkollegen, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben, insbesondere Raimund Brandmüller, mit dem ich mich auf fast alle schwierigen Prüfungen vorbereitet habe. Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Schwester Sarah Peternell für das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich meinen größten Dank an meine Mutter Silvia Peternell richten, die mir meine Ausbildung überhaupt erst ermöglicht hat.

“Everyone has a plan until they get punched in the mouth.” - Mike Tyson

KURZFASSUNG

Seit August 2015 werden im Rahmen des Forschungsprojekt „iMAS (Innovative Mastic Asphalt): Innovativer Gussasphalt zur Energie- und Emissionseinsparung“ marktreife, temperaturabgesenkte Gussasphaltnischgüter entwickelt. Für dieses Forschungsprojekt wird in dieser Diplomarbeit ein neues Prüfverfahren zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt vorgestellt und untersucht, ob eine geringere Herstellungstemperatur zu einer langfristigen Verbesserung des Tieftemperaturverhaltens führt.

Die Verarbeitbarkeit von Gussasphalt kann derzeit nur durch eine aufwendige Drehmomentmessung in einem Labor überprüft werden. Direkt am Einbauort können alle Beteiligten nur den subjektiven Empfindungen der Einbaupartie beim Verstreichen des Mischgutes vertrauen. Im Zuge dieser Arbeit wird versucht, einen Schnelltest zu entwickeln, der es ermöglicht, die gleichbleibende Qualität des Gussasphaltes in Bezug auf die Verarbeitbarkeit vor Ort zu überprüfen.

Durch das viskoelastische Materialverhalten von Bitumen ist Gussasphalt in der Lage, sich einer aufgebrachten Beanspruchung durch Verformung zu entziehen. Dadurch werden nach einer gewissen Zeit Spannungen abgebaut. Eigenspannungen, die bei einer Abkühlung mit verhinderter thermischer Verkürzung entstehen, können auf diese Weise schadlos abgebaut werden, solange die Temperatur nicht zu schnell und nicht zu tief sinkt. Mit dem Anstieg der Herstellungstemperatur verstärkt sich auch die Alterung. Die Alterung sorgt dafür dass Asphalte spröder und steifer werden und daher Eigenspannungen geringer relaxiert werden. Dies führt zu einer Verstärkung der Anfälligkeit für Kälterisse und einer Reduzierung der Bruchtemperatur. Ein Ziel dieser Arbeit ist festzustellen, ob sich die geringere Alterung bei der Herstellung von temperaturabgesenkten Gussasphalten zu einem höheren Widerstand gegen Kälterisse führt und sich somit die Lebensdauer der entwickelten Mischgüter verlängert.

ABSTRACT

Since August 2015 market-ready temperature reduced mastic asphalts have been developed as part of the research project “iMAS (Innovative Mastic Asphalt): Innovative mastic asphalt for energy and emissions savings”. Within this research project and the purpose of this thesis two scientific questions are discussed: A new method for testing the workability of mastic asphalt is presented and it is determined whether a lower mixing temperature leads to an improvement of the long-term performance behaviour of the mixture at the low temperature range.

The workability of mastic asphalt can be tested currently only by a complex torque measurement in a laboratory. In this work an attempt is made to develop a quick method to control the workability of mastic asphalt directly at the construction site.

Due to the viscoelastic material behaviour of bitumen, mastic asphalt is able to evade an applied stress by creep deformation. After a certain amount of time the internal tension is relaxed. Internal thermal stresses due to cooling with restrained tensile strain can be reduced to a harmless level as long as the temperature does not drop too quickly or too low. The increase of mixing temperature also increases the aging and makes asphalts stiff and brittle. Therefore the stress relaxation capability is strongly decreased. This affects the low-temperature resistance and influences the cracking temperature negatively. A goal of this work is to determine if decreased aging during mixing results in a higher resistance to cracking at low temperatures and thus extending the life of temperature reduced mastic asphalts.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	1
2	LITERATURRECHERCHE	2
2.1	BITUMEN	2
2.1.1	GEWINNUNG VON BITUMEN	3
2.1.2	ZUSAMMENSETZUNG	4
2.1.3	EIGENSCHAFTEN	5
2.1.3.1	KONSISTENZ UND VERFORMUNGSVERHALTEN	5
2.1.3.2	KLEBE- UND HAFTVERHALTEN (ADHÄSION)	6
2.1.3.3	VERHALTEN GEGENÜBER WASSER UND LUFTSAUERSTOFF	6
2.1.3.4	VERHALTEN GEGENÜBER CHEMIKALIEN, ÖL UND LÖSUNGSMITTELN	7
2.1.4	PRÜFVERFAHREN	7
2.1.5	BITUMENALTERUNG	8
2.1.5.1	ALTERUNGSMECHANISMEN	8
2.1.5.2	ALTERUNGSSTUFEN	10
2.1.5.3	ALTERUNGSARTEN	11
2.2	GESTEINSKÖRNUNGEN	11
2.2.1	GESTEINSARTEN	12
2.2.2	ANFORDERUNGEN	13
2.3	ASPHALT	14
2.3.1	EINTEILUNG VON ASPHALTEN	15
2.3.1.1	NACH DER FUNKTION	16
2.3.1.2	NACH DER STRUKTURELLEN LASTABTRAGUNG	16
2.3.1.3	NACH DEM HOHLRAUMGEHALT	17
2.3.1.4	NACH DER EINBAUTEMPERATUR	17
2.3.2	PRÜFVERFAHREN	18
2.3.2.1	EMPIRISCHE PRÜFVERFAHREN	18
2.3.2.2	GVO-PRÜFUNGEN	18
2.3.3	MISCHGUTBEZEICHNUNG	19
2.3.4	GUSSASPHALT	20
2.3.4.1	ANFORDERUNGEN AN GUSSASPHALT	21
2.3.4.2	TEMPERATURABGESENKTER GUSSASPHALT	22
2.4	VERARBEITBARKEIT	23
2.4.1	PRÜFUNG DER VERARBEITBARKEIT	23
2.4.2	VERARBEITBARKEIT VON FRISCHBETON	24
2.4.2.1	AUSBREITMAß	24
2.4.2.2	VERDICHUNGSMAB	25
2.4.2.3	SETZMAß	26
2.4.2.4	VEBE-ZEIT ODER SETZZEITVERSUCH	27
2.4.2.5	FLIEßVERSUCH	28

2.4.2.6	EINDRINGVERSUCH	28
2.4.3	VERGLEICH KONSISTENZPRÜFVERFAHREN	29
2.4.4	VERARBEITBARKEIT VON FRISCHMÖRTEL	30
2.4.5	VERARBEITBARKEIT VON GUSSASPHALT	30
3	PRÜFMETHODEN UND MATERIALIEN	32
3.1	PRÜFMETHODEN	32
3.1.1	SIMULATION DER BITUMENALTERUNG IM LABOR	32
3.1.1.1	KURZEITALTERUNG - ROLLING THIN FILM OVEN TEST (RTFOT)	32
3.1.1.2	LANGZEITALTERUNG - PRESSURE AGING VESSEL (PAV)	34
3.1.2	ALLGEMEINE VERFAHREN	35
3.1.2.1	NASSSIEBVERFAHREN	35
3.1.2.2	GEGENLAUFZWANGSMISCHER	37
3.1.3	ANGEWENDETE GVO ASPHALTPRÜFUNGEN	39
3.1.3.1	ABKÜHLVERSUCH (TSRST) NACH EN 12697-46	39
3.1.3.2	EINAXIALE KÄLTEZUGVERSUCH (UTST) LAUT EN 12697-46	40
3.2	MATERIALIEN	41
3.2.1	BITUMEN	41
3.2.2	VERWENDETE GUSSASPHALTMISCHGÜTER	41
3.2.3	GESTEIN	41
4	PRÜFPROGRAMM	42
4.1	PRÜFUNG DER VERARBEITBARKEIT	42
4.1.1	PRÜFAUFBAU AUSBREITVERSUCH GUSSASPHALT	42
4.1.2	PRÜFPROGRAMM AUSBREITVERSUCH	44
4.1.3	PRÜFABLAUF AUSBREITVERSUCH GUSSASPHALT	44
4.2	TIEFTEMPERATURVERHALTEN VON GEALTERTEM GUSSASPHALT	45
5	ERGEBNISSE	46
5.1	GUSSASPHALT-AUSBREITVERSUCH	46
5.2	ERGEBNISSE ABKÜHLVERSUCHE NACH EN 12697-46	49
6	INTERPRETATION	52
6.1	INTERPRETATION DES AUSBREITMAßES	52
6.2	INTERPRETATION DER TSRST-ERGEBNISSE	53
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	55
8	LITERATURVERZEICHNIS	57
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	60
10	TABELLENVERZEICHNIS	61
11	FORMELVERZEICHNIS	62
12	ANHANG	63

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Anfang August 2015 wurde das Forschungsprojekt „iMAS (Innovative Mastic Asphalt): Innovativer Gussasphalt zur Energie- und Emissionseinsparung“, bestehend aus sieben Arbeitspaketen, durch eine Kooperation von mehreren Forschungspartnern gestartet. Ziel ist die Entwicklung von marktreifen Gussasphaltnischgütern mit einer Reduktion der Produktionstemperatur von mindestens 30 °C und des Energieverbrauches sowie der Treibhausgasemissionen von mindestens 20 Prozent. Beteiligt sind das Institut für Verkehrswissenschaften: Forschungsbereich für Straßenwesen (IVWS - TU Wien), Institut für Materialchemie (TU Wien), Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft (TU Wien) und die Asphalt-Unternehmung Robert Felsinger GmbH.

Die sieben Arbeitspakete (AP) sind:

- (1) Optimierung des Gebrauchsverhalten der temperaturabgesenkten Gussasphaltnischgüter im Labor
- (2) Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung der Eignung eines Mischgutes für den händischen Einbau
- (3) Analyse des Langzeitverhaltens
- (4) Großtechnische Umsetzung in der Mischanlage
- (5) Einrichtung einer Probestrecke mit laufender Zustandserfassung
- (6) Emissionsanalyse
- (7) Energie- und Stoffflussanalyse

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen der Arbeitspakete 2 und 3 erstellt. Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 wird ein Prüfverfahren zur Kontrolle der Eignung eines Mischgutes für den händischen Einbau entwickelt. Die Verarbeitbarkeit ist ein wichtiger Kennwert, ob Gussasphalt problemlos eingebaut werden kann. Es gibt bis jetzt kein baustellene geeignetes Prüfverfahren, um diese Eigenschaft zu kontrollieren und man ist auf die subjektiven Empfindungen der Einbaupartie angewiesen. Durch einen Schnelltest könnte ebenfalls die gleichbleibende Qualität der angelieferten Gussasphaltnischgüter direkt vor Ort, geprüft werden.

Anfang 2015 wurden im Straßenbaulabor des IVWS mehrere temperaturabgesenkte Mischgüter entwickelt. Das zweite Ziel (Arbeitspaket 3) dieser Arbeit ist es zu überprüfen, ob sich eine geringere Alterung bei der Produktion von temperaturabgesenkten Gussasphalt günstig auf das Langzeitverhalten im Tieftemperaturbereich auswirkt. Zu diesem Zweck werden, mit laborgealterten Bitumen, Gussasphalt-Probekörper hergestellt und mit dem Abkühlzugversuch (TSRST) geprüft.

2 LITERATURRECHERCHE

In diesem Kapitel werden die Grundlagen, auf denen diese Arbeit aufgebaut ist, erläutert. Der Aufbau erfolgt dabei in einer stringenten Reihenfolge. Zuerst wird auf die einzelnen Bestandteile von Asphalt eingegangen, dann auf die Asphaltarten selbst. Im Zuge dieser Arbeit ist ein Versuch zur Prüfung der Verarbeitbarkeit entwickelt worden. Aus diesem Grund wird zum Schluss auch definiert was unter „Verarbeitbarkeit“ überhaupt verstanden wird und wie dieser Kennwert bei Beton, Mörtel und Asphalt überprüft wird.

2.1 BITUMEN

Bitumen (siehe Abbildung 1) ist ein aus Erdöl gewonnenes oder natürlich vorkommendes schwarz-bräunliches Gemisch verschiedener organischer Substanzen. Eine der Hauptanwendungsgebiete ist die Verwendung als Bindemittel im Asphalt. In der EN 12597 [1] ist die Terminologie von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemittel definiert. Die wichtigsten Begriffe sind in der Tabelle 1 angeführt. [1], [2]

Bitumen und Teer (Steinkohlenteerpech) hatten früher die gleichen Verwendungszwecke. Aus diesem Grund werden im täglichen Sprachgebrauch diese zwei Baustoffe häufig verwechselt oder gleichgesetzt. Teer wird aus verschiedenen organischen Substanzen (Steinkohle, Braunkohle, Holz, Torf, etc.) durch trockene Destillation gewonnen. Bei der Verkokung von Steinkohle entstehen polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die nachweislich Krebs erregend sind. Aus diesem Grund wurde in der Bundesrepublik Deutschland seit 1984 die Verwendung von Steinkohlenteerpech im Straßenbau verboten. Mittlerweile ist es in den meisten Ländern Europas nicht mehr üblich Teer oder Produkte aus Teer im Straßenbau einzusetzen. Im Gegensatz dazu wird Bitumen aus Erdöl gewonnen und weist keine kanzerogen wirkende Bestandteile auf. [2], [3]



Abbildung 1: links: Bitumen, rechts: Naturasphalt [4]

Tabelle 1: Wichtige Begriffsdefinitionen aus der EN 12597 zusammengestellt aus [1]

Begriff	Definition
Bitumen	Nahezu nicht flüchtiges, klebriges und abdichtendes erdölstämmiges Produkt, das auch in Naturasphalt vorkommt und das in Toluol vollständig oder nahezu vollständig löslich ist, bei Umgebungstemperatur ist es hochviskos oder nahezu fest.
Bitumenhaltiges Bindemittel	Bindemittel, das Bitumen enthält. <i>Anmerkung: Ein bitumenhaltiges Bindemittel darf in folgenden Formen vorliegen: rein; modifiziert; oxidiert; verschnitten; gefluxt, emulgiert.</i>
Straßenbaubitumen (Destillationsbitumen)	Bitumen zur Ummantelung von Körnungen und/oder Recyclingasphalt, das hauptsächlich zur Herstellung von Asphalt für den Bau und die Erhaltung von Verkehrsflächen und im Wasserbau verwendet wird.
Modifiziertes Bitumen	Bitumenhaltiges Bindemittel, dessen rheologische Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung eines oder mehrerer chemischer Zusätze modifiziert worden ist.
Polymermodifiziertes Bitumen	Mit einem oder mehreren organischen Polymeren modifiziertes Bitumen.
Oxidationsbitumen	Bitumen, dessen rheologische Eigenschaften wesentlich durch die Reaktion mit Luft bei erhöhten Temperaturen modifiziert wurde.

2.1.1 GEWINNUNG VON BITUMEN

Bitumen kann mithilfe von Raffinerien aus geeigneten Rohölen gewonnen werden. Eine schematische Darstellung der Bitumenherstellung ist in Abbildung 2 dargestellt. Für gute Bitumeneigenschaften ist vor allem ein hoher Anteil an hochsiedenden Komponenten (über 500 °C) und deren chemische Zusammensetzung wichtig. Bitumen bleiben als Rückstand bei der Destillation zur Gewinnung von Benzin, Diesel sowie Heizöl übrig. Zur Erzeugung von unterschiedlichen Bitumensorten wird die Vakuumdestillation (Destillationsbitumen), die Hochvakuumdestillation (Hochvakuumbitumen) und das Oxidationsverfahren (Oxidationsbitumen) angewendet. [2]

Die Vakuumdestillation ist das häufigste Verfahren zur Gewinnung von Straßenbaubitumen. Im ersten Schritt erfolgt die Reinigung des Rohöls von Wasser, Salz und mechanischen sowie mineralischen Verunreinigungen durch unterschiedliche Abscheidungsverfahren. Anschließend wird das Rohöl zuerst bei atmosphärischen Druckverhältnissen bei 370 °C destilliert und anschließend bei maximal 410 °C bei einem reduzierten Druck von 20-30 mbar vakuumdestilliert. Dabei verflüchtigen sich alle verdampfbaren Teile des Rohöls und der als

2 LITERATURRECHERCHE

Endprodukt verbleibende Rückstand (Vakuumpückstand) wird als Destillationsbitumen bezeichnet. [2]

Mit der Hochvakuumdestillation besteht die Möglichkeit zur Herstellung von harten Straßenbaubitumen durch stärker reduzierten Druck als bei der Vakuumdestillation. Der Anteil an Hochvakuumbitumen an der Bitumenproduktion ist sehr gering. [2]

Beim Oxidationsverfahren wird Sauerstoff bei 230 °C bis 270 °C unter kontrollierten Bedingungen in das Destillationsbitumen eingeblasen bis die gewünschte Viskosität erreicht wird. Durch dieses Verfahren erhöht sich der Anteil an Asphaltene, der zu einem deutlich höheren Penetrationsindex führt. Aus diesem Grund wird das sehr harte Oxidationsbitumen meistens für Industriezwecke (Industriebitumen) eingesetzt. [2]

Eine weitere Möglichkeit zur Gewinnung von Bitumen ist der Abbau von Naturasphalt. Naturasphalte sind in der Natur vorkommende Mischungen aus Bitumen und feinkörnigen Mineralstoffen und werden ausschließlich als Zusätze verwendet, um die Eigenschaften des Asphalts zu verbessern. [5]

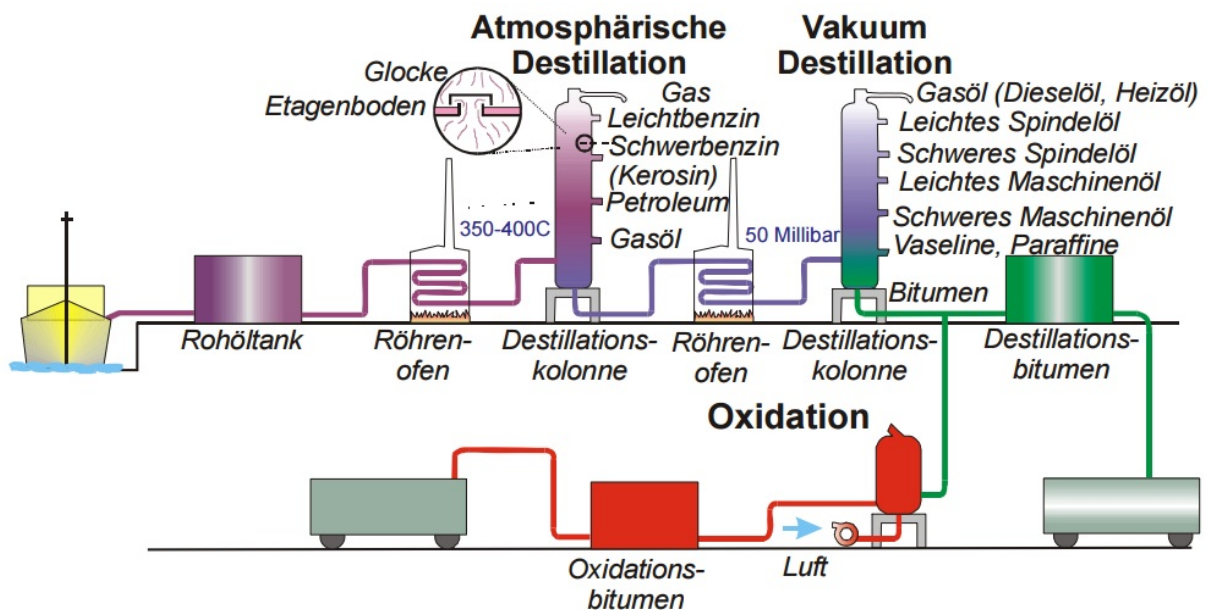


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bitumenherstellung [6]

2.1.2 ZUSAMMENSETZUNG

Bitumen besteht aus einem Gemisch von hochmolekularen Kohlenwasserstoffen (80 - 85 M.-%) und einem geringen Anteil von Wasserstoff (7 - 10 M.-%), Stickstoff (2 - 9 M.-%), Schwefel (0,5 - 7 M.-%) und sonstigen Bestandteilen (< 0,1 M.-%). Die Kohlenwasserstoffverbindungen können sich kettenförmig, verzweigt oder ringförmig ausbilden. Dadurch dass alleine ein einzelner gesättigter Kohlenwasserstoff die Möglichkeit hat 6×10^{13}

Isomere auszubilden, ist es bis jetzt nicht möglich, die genaue chemische Zusammensetzung eines Bitumens zu bestimmen. Obwohl die Bestandteile eines Bitumengemisches durch unterschiedliche Rohölherkunft stark schwanken können, sind die Gebrauchseigenschaften nahezu gleich. Dies liegt daran dass die chemische Struktur einen viel größeren Einfluss auf die Bitumeneigenschaften hat, als die chemische Zusammensetzung. [2], [7]

Ein einfaches Strukturmodell von Bitumen ist das kolloide Zweiphasensystem. Dabei liegt eine disperse Phase (Asphaltene) in einer dispergierenden Phase (Maltene) in stabiler Verteilung vor. In diesem System sind die Micellen (Asphaltene plus umgebende Schutzschicht aus Erdölharzen) die feste, steifigkeitsgebende, elastische Phase und die Maltene (Öle und Erdölharze) die flüssige, ölige, viskose Phase. Die Eigenschaften von Bitumen sind stark temperaturabhängig. Das Kolloidsystem verhält sich normalerweise wie ein Sol (viskose Flüssigkeit, kaum vernetzt). Bei niedrigen Temperaturen kommt es zur Bildung von stark vernetzten Micellen und das Kolloidsystem verhält sich wie ein Gel (elastisches Verhalten, hochvernetzt). Der Übergang von einem Sol-Zustand zu einem Gel-Zustand kann auch durch eine Strukturalterung erfolgen (siehe Kapitel 2.1.5.1). Mithilfe eines Iatroscan TLC-FID, einer Kombination aus Dünnschichtchromatographie und Flammenionisationsdetektor, kann die Bitumenzusammensetzung noch genauer in die SARA Fraktionen unterteilt werden. Dabei werden die Bitumenbestandteile nach der Polarität der Moleküle in Gesättigte (S, geringste Polarität), Aromaten (A), Harze (R) und Asphaltene (A, höchste Polarität) eingeteilt. [2], [3]

2.1.3 EIGENSCHAFTEN

2.1.3.1 KONSISTENZ UND VERFORMUNGSVERHALTEN

Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, zeigt Bitumen ein stark temperaturabhängiges Verhalten. Die Konsistenz ist eine sehr wichtige Eigenschaft, da damit sowohl die Möglichkeit der Verarbeitung, als auch das Verformungsverhalten des eingebauten Baustoffes bei Umgebungstemperatur, beeinflusst wird. Bei niedrigen Temperaturen ist Bitumen hart und spröde. Bei einer Erwärmung wird Bitumen zuerst weicher bis es dann bei hohen Temperaturen flüssig wird. Durch diesen reversiblen Vorgang weist Bitumen das Verhalten eines thermoplastischen Werkstoffes auf. [3]

Grundlage für die Verarbeitbarkeit von Asphalt ist das thermo-viskose Verhalten von Bitumen. Verschiedene Arbeitsvorgänge (Pumpen, Spritzen, Mischen, Einbauen, Verdichten) benötigen einen bestimmten Viskositätsbereich. Die Verarbeitungstemperaturen sind von der Härte der jeweiligen Bitumensorte abhängig. [3]

2 LITERATURRECHERCHE

Bitumen zeigt ein teilweise elastisches, teilweise viskoses, auch als viskoelastisch bezeichnetes, Materialverhalten. Viskoelastische Stoffe vereinen Merkmale von Flüssigkeiten und Feststoffen. Der Verformungswiderstand hängt dabei nicht nur von der Temperatur sowie der Bitumenhärte ab, sondern auch von der Belastungsdauer. Bei einer Belastung zeigt Bitumen sowohl elastische als auch viskose Verformungsanteile. Bei einer kurzen Belastungszeit überwiegt der elastische Anteil und ein Großteil der Verformung ist reversibel. Je länger die Belastungszeit ist, desto größer wird der viskose Anteil und die irreversiblen Verformungen erhöhen sich. Je weicher eine Bitumensorte ist, desto größer ist der viskose Anteil. Durch ein viskoelastisches Materialverhalten ist ein Werkstoff in der Lage sich einer aufgetragenen Beanspruchung durch Verformung zu entziehen. Dadurch werden, nach einer gewissen Zeit, Spannungen abgebaut. Diese Eigenschaft wird als Relaxationsvermögen bezeichnet. Je weicher ein Bitumen ist, desto schneller erfolgt der Spannungsabbau. Die Zugspannungen, die bei starker Abkühlung und verhinderter thermischer Verkürzung entstehen, können auf diese Weise schadlos abgebaut werden, solange die Spannungen nicht zu groß sind und die Temperatur nicht zu tief sinkt. Durch diese Eigenschaft kann eine Straße aus Asphalt, im Gegensatz zu Beton, ohne Fugen hergestellt werden. [3]

2.1.3.2 KLEBE- UND HAFTVERHALTEN (ADHÄSION)

An der Haftfestigkeit haben alle am Verbund beteiligten Stoffe einen Einfluss. Am Haftverbund zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen kann vor allem der Beitrag der Gesteinskörnungen an der Haftfestigkeit, durch unterschiedliche Eigenschaften (Gesteinsart, Gesteinsform, etc.), stark schwanken. Damit Bitumen die Aufgabe des Bindemittels erfüllen kann, müssen Gesteinsoberflächen frei von Trennmitteln (Staub, Feuchtigkeit, etc.) sein. Aus diesem Grund sollte die Gesteinskörnungen vor der Asphaltherstellung gründlich getrocknet und gereinigt werden. [3]

2.1.3.3 VERHALTEN GEGENÜBER WASSER UND LUFTSAUERSTOFF

Die Witterungsbeständigkeit von Bitumen gegenüber Wasser und Luft ist sehr gut, dennoch kann ein geringer aber vorhandener Einfluss festgestellt werden. Bitumen ist annähernd unlöslich in Wasser (Löslichkeit 0,001 bis 0,1%). Durch eine Diffusionswiderstandskonstante von rund 10^{-8} g/(cm h mbar) bzw. einer Diffusionswiderstandszahl μ von rund 50.000 wirkt Bitumen dampfsperrend und kann hervorragend als Abdichtungsmaterial verwendet werden. Das Wasseraufnahmevermögen ist ebenfalls sehr gering. Langzeitversuche über 10 Jahre haben gezeigt, dass eine 5 mm dicke Bitumenschicht die mit Wasser- oder Wasserdampf umspült wird, nur 1 bis 3% Wasser, größtenteils nahe der Oberfläche, aufnimmt. Die Einwirkung von Luftsauerstoff führt bei Bitumen zu einer langsamen oxidativen Alterung. Auf die Alterung von Bitumen wird genauer im Kapitel 2.1.5 eingegangen. [2], [3]

2.1.3.4 VERHALTEN GEGENÜBER CHEMIKALIEN, ÖL UND LÖSUNGSMITTELN

Durch die Reaktionsträgheit der bitumenbildenden Kohlenwasserstoffe zeigt Bitumen eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber organischen sowie anorganischen Salzen, anorganischen schwachen Säuren, den meisten aggressiven Wässern, Basen und stark polaren Lösungsmitteln (Alkohol, Wasser). Die Beständigkeit gegenüber starken Säuren ist davon abhängig, ob die Säuren oxidierend wirken. Von technischer Bedeutung sind vor allem der Widerstand gegen Tausalzlösungen (Winterdienst), Harnstoff (Enteisungsmittel für Flugbetriebsflächen) und Jauche (ländlicher Wegebau). Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Chemikalien nimmt bei erhöhten Temperaturen ab. Harte Bitumen sind in der Regel widerstandsfähiger als weiche Bitumensorten. [2], [3], [7]

Bitumen verhalten sich dagegen unbeständig gegenüber Ölen, Fetten, oxidierenden starken Säuren (Salpetersäure, Schwefelsäure) und artverwandten unpolaren organischen Lösungsmitteln wie Benzol, Toluol, Tetrachlorkohlenstoff, Schwefelkohlenstoff, Trichlorethen, Benzin usw. [2], [3], [7]

2.1.4 PRÜFVERFAHREN

Zur Überprüfen der Eigenschaften von Bitumen werden die empirischen und die gebrauchsvorhaltensorientierten (GVO) Prüfverfahren verwendet. Im Regelfall erfolgt die Beurteilung von Bitumen in Europa durch die empirischen Prüfmethode. Der Grund liegt an den einfachen und kostengünstigen Prüfaufbauten und die jahrelange Verwendung dieser Prüfungen. Die beurteilten Eigenschaften sind Härte (Pen), Gebrauchsspanne-Plastizitätsspanne (ERK, BP), Streckeigenschaften und Eigenschaften der Polymere (Ela) und werden durch die Prüfverfahren Penetration (Pen), Erweichungspunkt Ring-Kugel (ERK), Brechpunkt nach Fraaß (BP), Duktilität (Duk) und elastische Rückstellung (Ela) geprüft. [2], [7]

Die Bitumenarten werden durch unterschiedliche Eigenschaften kategorisiert. Zur Kategorisierung von Destillationsbitumen wird der Penetrationsversuch verwendet. Der Penetrationspunkt wird in zehntel Millimeter angegeben. So hat ein 70/100 Destillationsbitumen einen Penetrationspunkt von 70 bis 100 mm/10. Zur Kategorisierung von Oxidationsbitumen werden der Erweichungspunkt sowie der Penetrationspunkt verwendet. Der Erweichungspunkt beschreibt das Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen. Ein Oxidationsbitumen 90/10 hat einen Erweichungspunkt von 85-95 °C und einen Penetrationspunkt von 5 bis 15 mm/10. Zur Kategorisierung von polymermodifizierten Bitumen werden der Penetrationsbereich und die untere Grenze des Erweichungspunktes verwendet. Ein PmB 25/55-65 erzielt Penetration zwischen 25 mm/10 bis 55 mm/10 und einen Erweichungspunkt von > 65 °C. Als Gebrauchsspanne (GS) ist der Temperaturbereich (in Kelvin) zwischen dem Brechpunkt und

2 LITERATURRECHERCHE

dem Erweichungspunkt definiert. Die Gebrauchsspanne von Destillationsbitumen ist mit rund 50 K bis 60 K relativ klein. Oxidationsbitumen weist einen Gebrauchsbereich von rund 90 K bis 95 K auf und polymermodifiziertes Bitumen kann innerhalb einer Spanne von rund 120 K bis 140 K verwendet werden. [2], [7]

Die empirischen Prüfverfahren prüfen die Bindemittel weder bei im Feld relevanten Temperaturen, noch werden die realen Belastungen ausreichend simuliert. Aus diesem Grund kann mit den konventionellen Prüfmethode Bitumen nicht dem Anwendungszweck realitätsnah beurteilt werden. Die zunehmende Verkehrsbelastung und die daraus resultierenden höheren Anforderungen an das Bindemittel machten die Entwicklung von realitätsnäheren Prüfverfahren notwendig. Mit der Definition von physikalischen Kenngrößen und der Durchführung von GVO-Prüfungen können die leistungsorientierten Eigenschaften von Bitumen als Bindemittel vorhergesagt werden. Die Prüfungen werden bei im Feld relevanten Temperaturen durchgeführt und es besteht die Möglichkeit gebrauchsverhaltensrelevante Alterung des Bindemittels zu berücksichtigen. Die verwendeten Prüfverfahren sind der Rotational Viscosimeter (RV), der Dynamisches Scherrheometer (DSR), der Bending Beam Rheometer (BBR) sowie der Direct Tension Test (DTT) und es werden die Verarbeitbarkeit (RV), die Standfestigkeit (DSR), die Verformbarkeit (DSR), das Ermüdungsverhalten (DSR) und das Tieftemperaturverhalten (BBR, DTT) beurteilt. [2], [7]

2.1.5 BITUMENALTERUNG

2.1.5.1 ALTERUNGSMECHANISMEN

Wie alle organischen Substanzen altert Bitumen während seines Lebenszyklus. Unter dem Begriff „Bitumenalterung“ werden alle Alterungsmechanismen, die die Gebrauchseigenschaften von Bitumen verändern, zusammengefasst. Die Veränderungen der Gebrauchseigenschaften führen dazu, dass das Bitumen härter (verformungsbeständiger) und spröder wird. Dies reduziert die Fähigkeit zur Relaxation von Spannungen (siehe Kapitel 2.1.3.1), und bedingt ein schlechteres Tieftemperaturverhalten. Die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Alterung sind die Temperatur, Konzentration des Luftsauerstoffes, Feuchtigkeit und die Stärke der Sonneneinstrahlung (UV-Licht). Die maßgebenden drei irreversiblen Alterungsmechanismen von Bitumen sind die destillative Alterung, die oxidative Alterung und die Strukturalterung. [3], [8], [9]

DESTILLATIVE ALTERUNG

Bei der destillativen Alterung bzw. Verdunstungsalterung verdunsten leichtsiedende Komponenten wie niederviskose Öle, bei Temperaturen unterhalb ihrer Siedepunkte, aus dem Bi-

tumen. Dieser Vorgang ist rein physikalisch und tritt ausschließlich bei hohen Temperaturen auf, wie sie bei der Verarbeitung und Herstellung von Asphalten vorkommen. Einflussfaktoren auf das Ausmaß und die Geschwindigkeit dieses Alterungsvorganges sind die Bitumensorte, die Temperatur und die spezifische Oberfläche. Weiche Bitumensorten altern, durch einen höheren Anteil an niedrigviskosen Ölen, leichter als harte. Durch eine höhere Temperatur erhöht sich auch der Dampfdruck und damit die Menge an verdunstenden leichtsiedenden Komponenten. Je größer die Luftzutrittsmöglichkeit (Mischgutzusammensetzung, Verweildauer, nichtvorhandene Abdeckung des Mischgutes) ist, desto größer ist die Verdampfungsgeschwindigkeit. Bei fortgeschrittener Bitumenverhärtung verringert sich die Geschwindigkeit der destillativen Alterung. [3], [8], [9]

OXIDATIVE ALTERUNG

Die oxidative Alterung ist ein rein chemischer Vorgang und tritt sowohl bei der Herstellung bzw. Verarbeitung von Asphalt, als auch während der Liegedauer auf. Während der Kurzzeitalterung laufen die oxidativen Prozesse durch die höhere Temperatur und den hohen Sauerstoffeintrag beschleunigt ab. Bei der Langzeitalterung war es lange Zeit gängige Lehrmeinung, dass hauptsächlich die UV-Strahlung und der Luftsauerstoff die Hauptquellen der oxidativen Alterung sind. Die Oxidation verläuft im dunklen zwar stark verlangsamt ab, jedoch ist die Eindringtiefe von UV-Strahlen auf rund 5 µm begrenzt. Andere reaktive Gase und wassergelöste Oxidationsmittel sind zwar nur in geringer Konzentration vorhanden, jedoch haben sie teilweise ein Vielfaches an Oxidationspotenzial (Ozon) oder dringen tiefer in die Schichten ein und haben dort eine längere Verweildauer. In den im [10] vorgestellten Modell (Abbildung 3, rechts) können die verfügbaren Oxidationsmittel durch ihre Eindringtiefe unterschieden werden. Während UV-Strahlung und Mineralstaub auf den Oberflächenbereich begrenzt sind, dringen, abhängig vom Hohlraumgehalt, reaktive Gase (Stickstoffoxide, Ozon und OH⁻ Radikale) schon mehrere Zentimeter tief ein. Wasserlösliche Oxidationsmittel (Salpetrige Säure, Schwefelsäure, Wasserstoffperoxid) können die Asphaltsschicht vollständig durchdringen und durch eine lange Verweildauer Alterungsvorgänge in tieferen Schichten auslösen. [10]

Die Herkunft der Oxidationsmittel bildenden Schadstoffe ist unterschiedlich. Durch bodennahe Ozon, Stickoxide und UV-Strahlung werden OH-Radikale gebildet, die nach Niederschlägen unterschiedliche Säuren bilden. Der Kreislauf des OH-Radikals ist in Abbildung 3 (links) dargestellt. Die Stickoxide stammen aus Verkehrsabgasen, die Schwefeldioxide und -trioxide aus Hausbrand oder der Industrie. [8]

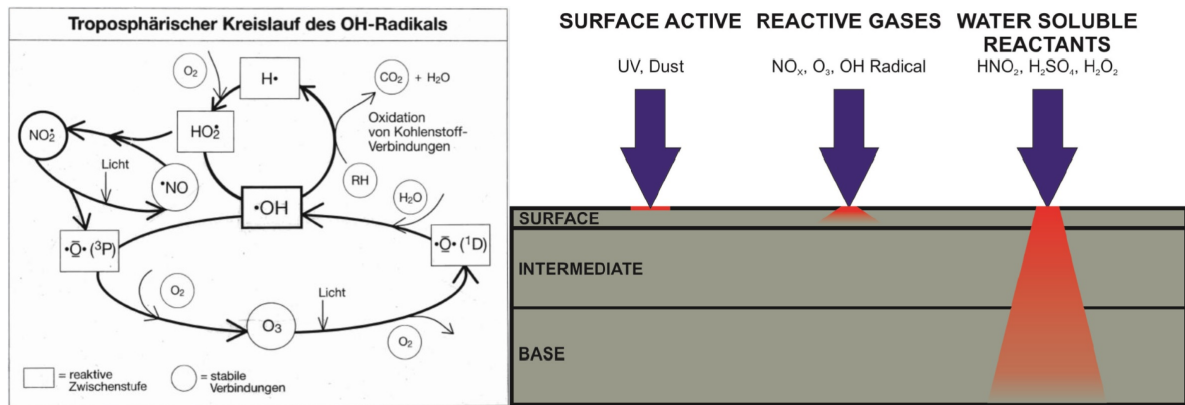


Abbildung 3: links: Kreislauf des OH⁻ Radikals [7], rechts: Eindringtiefen der Oxidationsmittel [10]

STRUKTURALTERUNG

Die Strukturalterung ist weniger eine eigenständige Alterungsform als eine strukturelle Betrachtungsweise der Veränderungen in der kolloidalen Struktur des Bitumens, verursacht durch die destillative und oxidative Oxidation. Bei diesem Vorgang koagulieren sich die dispergierten Teile (Asphaltene, Erdölharze) zu größeren Aggregaten zusammen und das Bitumen geht von einem Sol-Zustand über zu einem Gel-Zustand. Durch diesen irreversiblen Vorgang steigt die Konzentration von Asphaltene und Erdöl-Harzen und es treten Wechselwirkungen zwischen den Micellen auf, die zu einer Erhöhung der Strukturviskosität führen. Durch diesen Vorgang wird das Bitumen härter und spröder. [9]

2.1.5.2 ALTERUNGSSTUFEN

Bitumen kann in die drei Alterungsstufen (nichtgealtert, kurzzeitgealtert und langzeitgealtert) eingestuft werden. Der schematische Alterungsverlauf von Bitumen ist in Abbildung 4 dargestellt. Als nichtgealtertes Bitumen wird gebrauchsfertiges, unverwendetes Frischbitumen nach der Raffinierung bezeichnet. Der kurzzeitgealterte Zustand bildet die Alterungsvorgänge nach dem Mischvorgang, dem Transport und dem Einbau des Asphalttes ab. Die Langzeitalterung vereint die Kurzzeitalterung und einer fünf bis zehnjährige Liegezeit der fertig eingebauten Schicht. Eine genauere Angabe der Liegezeit ist aufgrund von Schwankungen der Umwelteinflüsse nicht möglich. In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass ein Großteil der Alterung bereits nach der Kurzzeitalterung erfolgt ist. Der Alterungsindex berechnet sich aus der Viskosität des gealterten Bitumens durch die Viskosität des gleichen nichtgealterten Bitumens. [7]

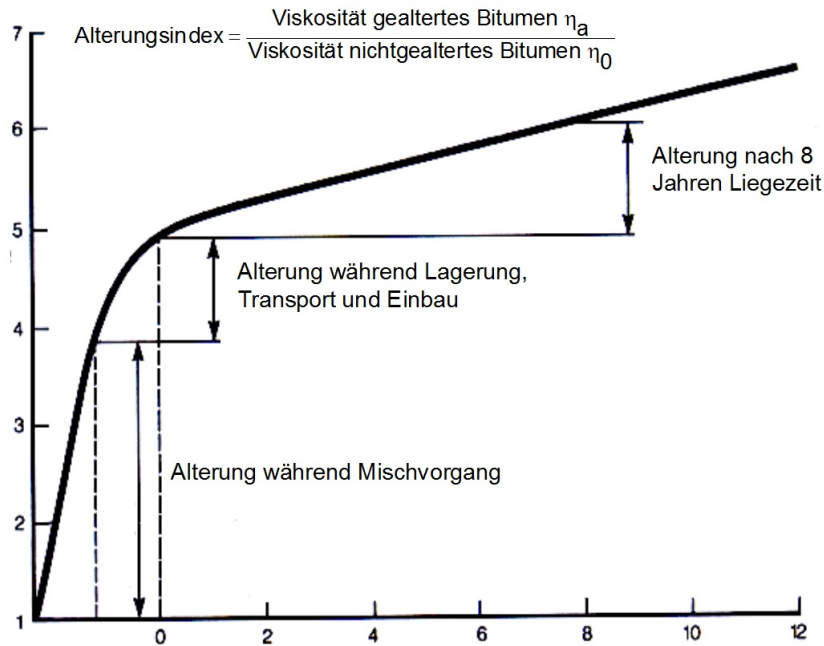


Abbildung 4: Schematischer Alterungsverlauf von Bitumen [7]

2.1.5.3 ALTERUNGSARTEN

Als Alterungsarten werden die Feldalterung und die Laboralterung unterschieden. Als Feldalterung wird die Alterung während des „natürlichen“ Lebenszyklus in der Umwelt bezeichnet. Im Labor durchgeführte Alterung wird als Laboralterung bezeichnet. Dabei wird das Bitumen zeitlich komprimiert kurz- und langzeitgealtert und die Eigenschaften mit den in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Verfahren geprüft. Eine Übersicht der verschiedenen Kurz- und Langzeitalterungsverfahren sind in Tabelle 2 dargestellt. In Österreich ist für Erzeugung von kurzzeitgealterten Bitumen vor allem der RTFOT (siehe Kapitel 3.1.1.1) und für die Erzeugung von langzeitgealterten Bitumen der PAV-Versuch (siehe Kapitel 3.1.1.2) üblich. [7]

Tabelle 2: Alterungsverfahren für Kurz- und Langzeitalterung [8]

Kurzzeitalterung	Langzeitalterung
Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)	Pressure Aging Vessel (PAV)
Modified Rolling Thin Film Oven Test (MRT-OT)	Rotating Cylinder Aging Test (RCAT)
Thin Film Oven Test (TFOT)	Long-Term Rotating Flask Test (LTRFT)
Rotating Flask Test (RFT)	

2.2 GESTEINSKÖRNUNGEN

Gesteinskörnungen (frühere Bezeichnung: Zuschlag) sind der massenprozentuale Hauptbestandteil von Asphalten. Die Bestandteile können natürlich, recycelt oder industriell herge-

2 LITERATURRECHERCHE

stellt (Stahl-, Metallhüttenschlacken) sein. Natürliche Gesteine sind definiert als ein Konglomerat von einem oder mehreren natürlichen Mineralen. [2], [7]

Eine Gesteinskörnung setzt sich aus groben sowie feinen Gesteinskörnungen und dem Füller (Feinanteil) zusammen. Die Bestandteile können sowohl aus Rund- und/oder Kantkorn bestehen. Grobe Gesteinskörnungen sind alle Gesteine mit einer oberen Siebgröße $D \leq 45$ mm und einem unteren Siebgröße $d \geq 2$ mm. Feine Gesteinskörnungen sind Gesteine mit einem $D \leq 2$ mm und einem $d \geq 0,063$ mm. Als Füller werden Feinanteile mit einem $D \leq 0,063$ mm bezeichnet. Die grobe und feine Gesteinskörnung können zusammen auch als Korngemisch bezeichnet werden. [2]

Zwei wichtige Begriffe sind die Kornklasse und die Korngruppe. Als Kornklasse wird eine Gesteinskörnung bezeichnet, bei welcher sich alle Gesteinsgrößen innerhalb von zwei Sieben bewegen. In einer Kornklasse 4/8 gibt es keine Bestandteile die kleiner als 4 mm und größer als 8 mm sind. Eine Korngruppe ist eine werksmäßig hergestellte Körnung mit Unter- und Oberkorn und wird durch die untere Siebgröße (d) und die obere Siebgröße (D) bezeichnet. Eine Korngruppe 4/8 kann also auch einen Anteil an Gestein das kleiner als 4 mm bzw. größer als 8 mm ist aufweisen. [7]

2.2.1 GESTEINSARTEN

Die im Zuge dieser Arbeit geprüften Gussasphaltmischgüter beinhalten die Gesteinsarten Kalkstein, Dolomitstein und Kersantit.

Kalkstein ist ein weitverbreitetes Sedimentgestein und besteht zum überwiegenden Teil aus den Mineralien Kalzit und Aragonit. Die meisten Kalksteinarten sind biogenen Ursprungs und wurden durch Mikroorganismen oder gesteinsbildenden Korallen abgelagert. Chemisch ausgefällte Kalksteine wurden durch chemische Prozesse gebildet, die häufig durch Aktivität von Lebewesen (Algen, Moose) unterstützt worden sind. Kalkstein ist chemisch wenig beständig, polierbar und verbessert die Bitumenhaftung mit dem Gestein. [7], [11]

Dolomitstein ist ein Sedimentgestein und besteht zu mindestens 90 Prozent aus dem Mineral Dolomit. Dolomit entsteht durch Umwandlung von Kalkstein, indem das Magnesium im Wasser mit dem Kalk im Gestein in Bindung geht. Bei einem geringen Dolomitgehalt liegt ein dolomitischer Kalkstein vor. Dolomit- und Kalksteinvorkommen treten häufig gemeinsam auf. Im Vergleich zu Kalkstein ist Dolomitstein etwas härter, sehr viel spröder und weist eine langsamere Reaktionsgeschwindigkeit mit Säure auf. [12]

Kersantit ist eine Unterart der Gesteinsart Lamprophyr und tritt als Ganggestein auf. Ganggesteine sind Erstarrungsgesteine (Magmatite) und Entstehen durch Erstarren von Ge-

steinsschmelze (Magma) in Spalten (Trennflächen im Gestein) in einer geringen Krustentiefe. Kersantit ist zäh, hart und hat eine gute Bitumenhaftung. [13]

2.2.2 ANFORDERUNGEN

Die Anforderungen der Regelwerke und Normen an die Baustoffe folgen grundsätzlich immer dem gleichen Schema. Die **EN XXXXX** sind die harmonisierten Europäischen Rahmennormen und legen Anforderung und deren charakteristische Niveaus innerhalb von Anforderungskategorien fest. So definiert die EN 13043 [14] für natürliche, recycelte sowie industriell hergestellte Gesteinskörnungen die Anforderungen in vier Hauptkategorien. Diese Kategorien sind geometrische, physikalische, chemische und sonstige Anforderungen (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4). Mit diesen Kategorien kann die Gesteinskörnung in die Klassen G1 bis G9 und GS eingeteilt werden. [14], [15]

Die **ÖNORM XXXX** sind die österreichische Umsetzung der EN XXXXX. Dabei werden geographische, topographische, klimatische und geologische Verhältnisse berücksichtigt und für Österreich geeignete Anforderungskategorien bestimmt. [15]

Die **EN XXX** sind die harmonisierten Prüfnormen der in der EN XXXXX definierten Anforderungen. [15]

Zusätzlich können weitere Anforderung bzw. Regeln für die Anwendung durch weitere ÖNORMEN und/oder Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) gefordert werden. [15]

Tabelle 3: Anforderungen an den Füller für Asphalt nach EN 13043 zusammengestellt aus [14], [15]

Geometrische Anforderungen	
Korngrößenverteilung	Schädliche Feinteile
Physikalische Anforderungen	
Wassergehalt	Versteifende Eigenschaften
Rohdichte	
Chemische Anforderungen	
Wasserlöslichkeit	Wasserempfindlichkeit

2 LITERATURRECHERCHE

Tabelle 4: Anforderungen an grobe und feine Gesteinskörnungen für Asphalt nach EN 13043 zusammengestellt aus [14], [15]

Geometrische Anforderungen	
Korngrößenverteilung	Kornform v. groben Gesteinskörnungen (GK)
Gehalt und Qualität von Feinanteilen	Anteil gebrochener Oberflächen in groben GK
Physikalische Anforderungen	
Widerstand gegen Zertrümmern von groben GK	Dauerhaftigkeit:
Widerstand gegen Polieren von groben GK für Deckschichten	Wasseraufnahme als Vorversuch zum Frostwiderstand
Widerstand gegen Oberflächenabrieb	Frostwiderstand (Frostbeständigkeit)
Widerstand von groben GK für Deckschichten gegen Abrieb durch Spikereifen	Widerstand gegen Hitzebeanspruchung
Rohdichte und Wasseraufnahme	Affinität von groben GK zu bitumenhaltigen Bindemittel
Schüttdichte	"Sonnenbrand" von Basalt
Chemische Anforderungen	
Chemische Zusammensetzung	Bestandteile, die die Raumbeständigkeit beeinflussen
Grobe organische Verunreinigungen	

2.3 ASPHALT

Die Hauptbestandteile von Asphalt sind Bindemittel (Kapitel 2.1) und Gesteinskörnungen (Kapitel 2.2). Die Zusammensetzung einer Asphaltmischung wird maßgeblich vom gewünschten Verhalten im eingebauten Zustand sowie den Begrenzungen der maschinellen Einbautechnik beeinflusst. Die Asphaltarten werden unterschieden in Asphaltbeton (AC), Splittmastixasphalt (SMA), Gussasphalt (MA), offenporiger Asphalt (PA) und lärmindernde Dünnschichtdecken (BBTM). [2]

Die Asphaltproduktion erfolgt in Durchlaufmischanlagen oder Chargenmischanlagen (stationäre oder mobil). Durchlaufmischanlagen produzieren kontinuierlich eine einzige Mischgutsorte. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnung wird ausschließlich durch die Vordoseure (Lager von verschiedenen Korngrößen bzw. Kornformen) beeinflusst. Durch das Fehlen einer Heißversiebung besteht keine nachträgliche Eingriffsmöglichkeit in die Rezeptur. Dieser Anlagentyp wird selten eingesetzt und ist ideal für Großbauvorhaben um große Mengen einer Mischgutsorte zu erzeugen.

2 LITERATURRECHERCHE

Bei Chargenmischanlagen erfolgt die Heißversiebung nach der Trocknung des Gesteins in der Trockentrommel. Das heiße Gestein wird gesiebt und in Heißmineralsilo gelagert. Dadurch können verschiedene Asphaltarten hergestellt werden ohne den Materialfluss in der Trockentrommel unterbrechen zu müssen. Chargenmischanlagen ermöglichen das Erzeugen verschiedener Mischgutsorten in kurzen Abständen. Diese Anlagenart wird heute hauptsächlich eingesetzt und besteht in der Regel zumindest aus Vordoseure (Materialdeponie, Materialaufgabe), Trockentrommel, Entstaubung, Füllersilo, Bitumentank, Heißversiebung, Heißsilierung, Waage, Mischer, Mischgutsilo sowie einer Steuerkabine. Weitere Erweiterungen z.B. für das effiziente recyceln von Asphalt (Paralleltrommel) sind möglich. Eine mobile Chargenmischanlage ist in Abbildung 5 dargestellt. [2]

Anforderungen an Asphaltmischgütern finden sich in der EN 13108-XX, der ÖNORM B 358X-X sowie in den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS). Die RVS sind in Österreich für alle Straßen mit öffentlichem Verkehr gültig, können aber auch für ähnliche, private Flächen angewendet werden. Wichtige Asphalteeigenschaften sind Verarbeitbarkeit, Bearbeitungsfrist, Verdichtungswilligkeit, Standfestigkeit, Verzahnung des Korngerüst, Rissicherheit, Relaxation, Hohlraumgehalt, Wasserundurchlässigkeit, Dichtigkeit, Verschleißfestigkeit und Griffbarkeit.[16], [17]

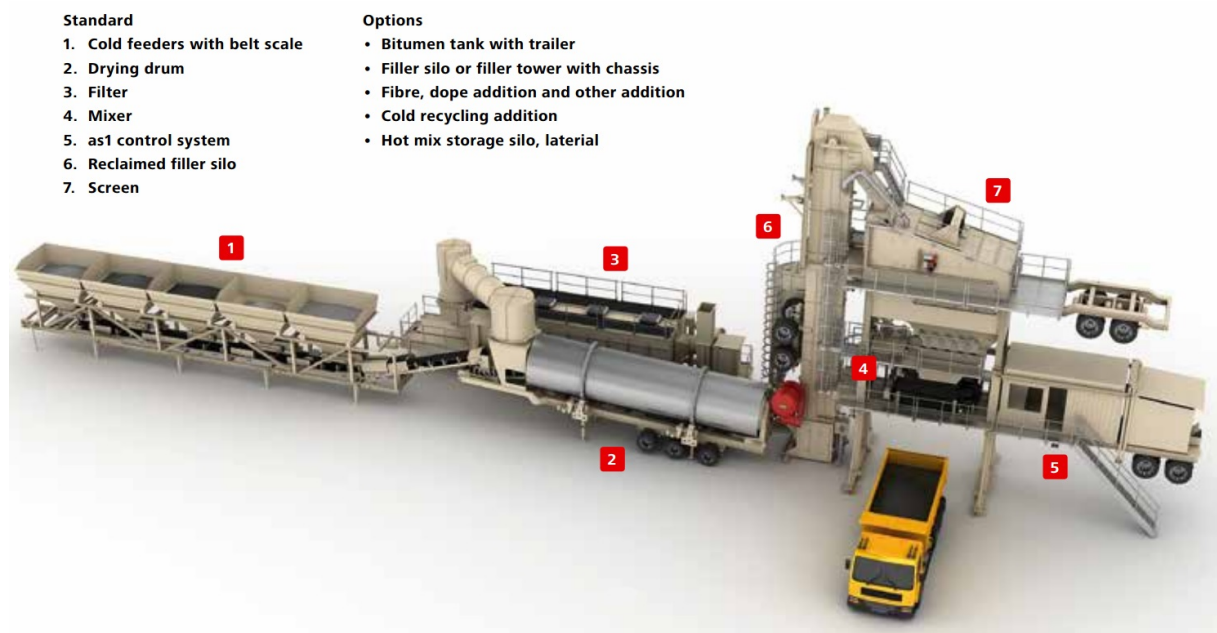


Abbildung 5: Black Move II mobile Asphaltmischanlage (Fa. Ammann) [18]

2.3.1 EINTEILUNG VON ASPHALTEN

Asphalte können durch unterschiedliche Kriterien wie Funktion (Position), Art der idealisierten Modelle der strukturellen Lastabtragung (siehe Tabelle 5), Hohlraumgehalt, Einbautemperatur, etc. eingeteilt werden.

2.3.1.1 NACH DER FUNKTION

Bei der Einteilung nach der Funktion bezieht man sich auf die Position im Straßenaufbau. Der Straßenaufbau von unten nach oben ist Tragschicht (trag), Binderschicht (binder) und Deckschicht (deck). Die Aufgabe der Tragschicht ist es die Verkehrslasten in den Untergrund zu verteilen und ist ungeeignet Verkehrslasten direkt aufzunehmen. Die Binderschicht wird ausgeführt bei hochbelasteten Aufbauten zur besseren Lastverteilung, um Spannungen in der Tragschicht zu reduzieren. Die Aufgabe der Deckschicht ist die direkte Aufnahme der Verkehrsbelastung und muss besondere Anforderungen an die Griffbarkeit, Schub- und Scherfestigkeit erfüllen. Im untergeordneten Straßennetz wird in Österreich häufig eine Tragdeckschicht ausgeführt. Das ist eine Schicht die die Funktionen einer Deck- und Tragschicht kombiniert. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Schichten bestehen vor allem im Größtkorn, Schichtdicke sowie Hohlraum und Bindemittelgehalt. In Österreich sind die Standardaufbauten AC11/SMA11 für Deckschichten, AC22 für Binder- und AC32 für Tragschichten. Die Mischgutbezeichnungen werden im Kapitel 2.3.3 erläutert. [2], [7]

2.3.1.2 NACH DER STRUKTURELLEN LASTABTRAGUNG

Grundsätzlich wird bei Asphalt die Last durch drei Effekte, nämlich Klebung (Mastix-Konzept), Reibung (Packungs-Konzept) und Abstützung (Stützgerüst-Konzept) abgetragen. Bei den verschiedenen Asphaltarten gibt es jedoch immer einen primären Lastabtragungseffekt, der als idealisiertes Modell (siehe Tabelle 5) der strukturellen Lastabtragung bezeichnet werden kann. Beim Mastix-Konzept ist vor allem das Bindemittel in Kombination mit dem Füller (Mastix) verantwortlich für die Lastabtragung, während beim Packungskonzept der Schub zwischen den Gesteinskörnern und beim Stützgerüst-Konzept der Korn-zu-Korn Kontakt sowie der seitliche Stützrand maßgebend sind. [6]

Tabelle 5: Idealisierte Modelle der strukturellen Lastabtragung nach [6]

<p>Mastixkonzept Bindemittelgehalt < 8,5 M.-% Hohlraumgehalt ~ 0 V.-% Gussasphalt MA</p>		<p>Analogie: „eingefrorene Flüssigkeit“ Hoher Bindemittelgehalt (Bitumen) Annähernd hohlraumfrei Gesteinskörnung "schwimmt" in Asphaltmastix Lastabtragung hauptsächlich durch Bitumen <u>Versagen:</u> Deviat. Fließen, Schub</p>
<p>Packungskonzept Bindemittelgehalt < 6,5 M.-% Hohlraumgehalt ~ 4,0 V.-% Asphaltbeton AC</p>		<p>Analogie: „Betonprinzip“ Theoretisch dichteste Lagerungsdichte der Körner Sieblinie entspricht Fuller Parabel Minimaler Bindemittelgehalt bei maximalem Gesteinskörnungsanteil Lastabtragung durch Stützgerüst und Materialverbund <u>Versagen:</u> Druck im Mikrobereich, Deviat. Fließen, Schub</p>
<p>Stützgerüstkonzept mit dichtem Stützgerüst Bindemittelgehalt < 7,5 M.-% Hohlraumgehalt ~ 4,0 V.-% Splittmastixasphalt SMA</p> <p>Stützgerüstkonzept mit offenporigen Stützgerüst Bindemittelgehalt < 5,0 M.-% Hohlraumgehalt ~ 20,0 V.-% Drainasphalt PA</p>		<p>Analogie: „Makadamprinzip“ Korn-Korn-Abstützung der Körner Sieblinie mit Ausfallkörnung Verzahnung des Mineralgerüsts (innere Reibung) Lastabtragung hauptsächlich durch Gesteinsgerüst Seitliche Abstützung erforderlich <u>Versagen:</u> hauptsächlich durch Keilzugspannungen</p>

2.3.1.3 NACH DEM HOHLRAUMGEHALT

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal von Asphalten ist der Hohlraumgehalt. Unterschieden werden hohlraumarme und hohlraumreiche Walzasphalte (3-Phasen-System) und annähernd hohlraumfreier Gussasphalt (2-Phasen-System). [17]

2.3.1.4 NACH DER EINBAUTEMPERATUR

Asphaltmischgüter können mit der Einbautemperatur eingeteilt werden in Kaltmischgüter (< 30 °C), Warmmischgüter (40 – 120 °C), Temperaturabgesenkte Mischgüter (100 - 130 °C, ~ 200 °C bei MA) und Heißmischgüter (> 130 °C bis 250 °C bei MA). Heißmischgüter sind die konventionellen Standardverfahren bei der Mischgutherstellung. Bei den temperaturabgesenkten Mischgütern wird versucht eine Energie- und Emissionsreduktion

durch Bitumen-, Asphaltadditiven oder verfahrenstechnischen Veränderungen zu erzielen. Auf Kalt- und Warmmischgüter wird nicht weiter eingegangen, da sie nicht relevant für diese Arbeit sind. [7]

2.3.2 PRÜFVERFAHREN

Die Prüfverfahren für Asphaltmischgüter können in allgemeine, empirische und gebrauchsvorhaltensorientierte Verfahren eingeteilt werden. Bei den allgemeinen Verfahren werden allgemeine Kenngrößen ermittelt, wie Rohdichte, Raumdichte, volumetrische Kennwerte, Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung, Verdichtbarkeit, Abmessungen von Asphaltprobekörper, usw. [7]

Wie beim Bitumen (Kapitel 2.1.4) gibt es beim Asphalt empirische und gebrauchsvorhaltensorientierte Prüfverfahren. Die Beurteilung von Asphalten erfolgt im Regelfall noch immer mit den einfachen und kostengünstigen empirischen Prüfmethode. Die zunehmende Verkehrsbelastung und die daraus resultierenden höheren Anforderungen an die Mischgüter machten die Entwicklung von realitätsnäheren Prüfverfahren notwendig. Die komplexen und teuren GVO-Prüfungen sind in der Lage, Asphalt über das im Feld relevante Temperaturspektrum zu prüfen und materialspezifische Kenngrößen abzuleiten. [15]

2.3.2.1 EMPIRISCHE PRÜFVERFAHREN

Zu den empirischen Prüfverfahren zählen Affinität Gestein/Bitumen (Ablösen des Bindemittels vom Gestein), Spurbildungstest (Anfälligkeit gegen bleibende Verformung), Marshall-Prüfung (Stabilität, Fließwert, Marshallquotient), Treibstoffbeständigkeit, Beständigkeit gegen Enteisungsmittel und Eindringversuche an Würfeln und Platten (Gussasphalt). [7]

2.3.2.2 GVO-PRÜFUNGEN

Die gebrauchsvorhaltensorientierten Prüfungen bestimmen das Gebrauchsverhalten von Asphalt bei praxisrelevanten Temperaturen. Für jeden Temperaturbereich stehen mehrere GVO-Prüfungen zur Auswahl. In diesem Kapitel werden ausschließlich die Prüfverfahren vorgestellt, an welche beim gebrauchsvorhaltensorientierten Ansatz gemäß ÖNORM B 3580-2 [19] (Asphaltbeton) sowie ÖNORM B 3584-2 [20] (Splittmastixasphalt), Anforderungen gestellt werden. Die angewendeten Prüfverfahren im Tieftemperaturbereich nach EN 12697-46 [21] (siehe Kapitel 3.1.3) sind die Abkühlprüfung (TSRST) und die einaxiale Kältezugsprüfung (UTST). Diese Versuche simulieren extreme Abkühlraten (TSRST) und eine Verkehrslast bei tiefen Temperaturen (UTST). Beim TSRST werden die kältebedingten kryogenen Zugspannungen ermittelt. Der charakteristische Kennwert ist die Bruchtemperatur T_{Crack} . Beim UTST soll die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt werden. Die

2 LITERATURRECHERCHE

erhaltenen Ergebnisse sind die Zugfestigkeit $\beta_t(T)$ und die Ausfallzugdehnung $\varepsilon_t(T)$ bei der Prüftemperatur T . Bei einer Kombination der Ergebnisse von TSRST und UTST kann die Zugfestigkeitsreserve ermittelt werden. Die Zugfestigkeitsreserve (N/mm^2) ist ein Maß für die ertragbaren Verkehrsbelastungsspannungen bei gleichzeitiger kryogener Zugspannung ohne Ausbildung von Kälterissen im Asphalt. [2], [7], [21]

Im Hochtemperaturbereich wird der triaxiale zyklische Druckschwellenversuch (TCCT – EN 12697-25) zur Bestimmung der Beständigkeit gegen bleibende Verformung (Spurrinnen) verwendet. Die Prüftemperatur ist abhängig von der Lage der Schicht. Die Prüfung von Binder- und Tragschichten erfolgt bei 40 °C und von Deckschichten bei 50 °C . Als Ergebnis erhält man den Verlauf der bleibenden Verformung in Abhängigkeit von den Lastwechseln (Kriechkurve) und der Kriechrate f_c . Die Kriechrate ist ein Maß für die Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und kann durch eine Tangente im quasilinearen Teil der Kriechkurve bestimmt werden. [7]

Die 4-Punkt-Biegeprüfung (4PBB – EN 12697-24 [22] und -26 [23]) kann als Steifigkeits- und Ermüdungsversuch angewendet werden. Beim Steifigkeitsversuch wird bei verschiedenen Temperaturen die für die Verformung des Probekörpers erforderliche Kraft als Funktion der Zeit gemessen. Bei dieser schädigungsfreien Prüfung sind die Ergebnisse das viskoelastische Materialverhalten (dynamischer E-Modul und Phasenwinkel) in Abhängigkeit von der Temperatur sowie der Frequenz und die Berechnung von Primärwirkungen aus äußeren Belastungen für Bemessungsaufgaben. Beim Ermüdungsversuch wird die Anzahl der Lastwechsel bestimmt bis der Probekörper den Zustand der Ermüdung erreicht hat. Als ermüdet gilt ein Probekörper wenn der komplexe Steifigkeitsmodul auf die Hälfte des Ausgangswerts gefallen ist. Eine Einzelprüfung, bei gegebener Temperatur und Frequenz, besteht aus mindestens drei Belastungsstufen (Dehnungsstufe mit konstanter Durchbiegung) und mindestens sechs Wiederholungen. Im zweiten Schritt wird aus den Einzelversuchen eine Wöhlerkurve aufgestellt. Die Wöhlerkurve stellt den Zusammenhang zwischen Belastung und Ermüdungsbeständigkeit dar und wird zur Ermittlung der Dauerhaltbarkeit ε_6 verwendet. Die Dauerhaltbarkeit ist die Dehnungsstufe bei der 10^6 Lastwechsel ertragen werden. [7], [22], [23]

2.3.3 MISCHGUTBEZEICHNUNG

Die Bezeichnung von Asphaltmischgütern hängt davon ab, ob empirische (rezeptorientiert) oder funktionale (GVO) Anforderungen gestellt werden. Ist in der Mischgutbezeichnung von Asphaltbeton ein Bindemittel und eine Sieblinie gemäß EN 13108-1 und ÖNORM B 3580-1 angegeben, so müssen Vorgaben zur Zusammensetzung und den Bestandteilen eingehalten

werden. Die rezeptorientierte Kennzeichnung besteht aus der Angabe der Asphaltart mit dem Größtkorn D, der Funktionskennzeichnung des Bindemittels, dem Sieblinientyp (A1 bis A7) und der Gesteinsklasse (G1 bis G3, GS). Ein Beispiel wäre AC11 deck PmB45/80-65, A2, G1. Wird hingegen eine funktionale Anforderung (z.B. R1) gemäß EN 13108-1 und ÖNORM B3580-2 gestellt, so müssen nur die Anforderungen an bestimmte bautechnische Eigenschaften erfüllt werden. Bei der funktionalen Kennzeichnung wird kein Bindemittel definiert und anstatt des Sieblinientyps werden die Anforderungen an das Gebrauchsverhalten angegeben. Ein Beispiel für eine funktionale Bezeichnung wäre AC11 deck, R1, G1. Dadurch hat der Produzent einen größeren Freiheitsgrad bei der Konzeption des Asphaltbetonmischgutes, aber auch eine höhere Verantwortung. Für Gussasphalt gibt es derzeit nur eine Normierung für den empirischen Ansatz (EN 13108-6 [24], ÖNORM 3585 [25]). [7]

2.3.4 GUSSASPHALT

Im Gegensatz zu den anderen Asphaltarten hat Gussasphalt annähernd keine Hohlräume und kann verdichtungsfrei eingebaut werden. Die Hohlräume der kornabgestuften Korngemische sind vollständig durch Bitumen ausgefüllt und es ist sogar ein geringer Bitumenüberschuss vorhanden. Durch den hohen Bitumengehalt (~7,5 – 10 M%) sowie den hohen Füllergehalt (~20 -32 M%) verhält sich Gussasphalt wie eine mit Mineralstoffen versteifte Flüssigkeit (siehe Tabelle 5). Die Gesteine „schwimmen“ in der Mastix (Bitumen und Füller) und haben nur wenige Berührungspunkte miteinander. Aus diesem Grund hat die Gesteinskörnung nur einen geringen Einfluss auf die Standfestigkeit des Gussasphaltes. Um eine ausreichende Verformungsstabilität zu gewährleisten, ist es notwendig sehr hartes Bitumen zu verwenden. Das verwendete Größtkorn beträgt 4, 8 oder 11 mm. [17]

Um eine ausreichende Viskosität für den Einbau von konventionellem Gussasphalt zu erzielen wird eine Temperatur von rund 220 bis 250 °C benötigt. In der EN 13108-6 [24] wird eine maximale Einbautemperatur von 230 °C festgelegt, während die ÖNORM B 3585 [25] eine Temperatur von maximal 250 °C zulässt. Der Transport zur Baustelle erfolgt unter ständiger Wärmezufuhr in einem liegenden oder stehenden Asphaltkocher mit Rührwerk (siehe Abbildung 6). Der Einbau kann maschinell oder händisch erfolgen. Bei dem in Österreich üblicheren händischem Einbau wird der Gussasphalt aus dem Asphaltkocher in Kübel abgefüllt, zur Einbaustelle getragen, ausgeleert und verstrichen (siehe Abbildung 7). Um eine für den Straßenbau ausreichende Griffbarkeit zu erhalten, wird auf die heiße Oberfläche bituminierte Edelkankörnung aufgebracht und eingewalzt. [17]



Abbildung 6: links: liegender Asphaltkocher, rechts: stehender Asphaltkocher



Abbildung 7: Händischer Einbau von Gussasphalt

2.3.4.1 ANFORDERUNGEN AN GUSSASPHALT

Anforderungen an das Gussasphaltnischgut sind in der EN 13108-6 [24] sowie der nationalen Umsetzung ÖNORM B 3585 [25] geregelt. In der EN 13108-6 werden je nach Gussasphalt-Kategorie die zu erfüllenden Werte festgelegt wie Mindest-Bindemittelgehalt B_{min} , Mindestwert der Eindringtiefe nach 30 Minuten I_{min} , Höchstwert der Eindringtiefe nach 30 Minuten I_{max} , maximale Zunahme der bleibenden Verformung nach 30 weiteren Minuten I_{nc} , maximale dynamische Eindringtiefe I_{dyn} , Treibstoffbeständigkeit, verbleibende Festigkeit β , maximale Bruchtemperatur $TSRST_{max}$ und Höchsttemperatur des Asphaltmischgutes. Ebenso werden die Grenzwerte der Korngrößenverteilung und die Kennzeichnung von Gussasphalt definiert. Für Gussasphalte kann gemäß [25] Oxidationsbitumen (90/10), Destillationsbitumen (20/30, 30/45, 50/70, 70/100), Polymermodifizierte Bitumen (PmB 45/80-65, PmB 25/55-65, PmB 25/55-55) und Mischungen daraus verwendet werden. In Tabelle 6 werden anhand eines exemplarischen Beispiels die Bestandteile einer Gussasphaltkennzeichnung erläutert. [24], [25]

Die in der Tabelle 6 erläuterte Art der Mischgutkennzeichnung ist keine gültige Bezeichnung nach Europäischer Norm, findet jedoch häufig in Österreich Anwendung und wird auch in dieser Arbeit verwendet. Für Gussasphalt gibt es zwei Standfestigkeitsklassen M1 und M2, welche in der ÖNORM B 3585 hinsichtlich ihres Widerstands gegen bleibende Verformung definiert werden. M1 wird bei hochbelasteten Flächen verwendet und darf eine maximale

2 LITERATURRECHERCHE

Eindringtiefe I_{\max} von 3,5 mm nach 30 Minuten aufweisen. Der Kugeleindruckdurchmesser KE wird mithilfe der Kugeleindruckprüfung (ÖNORM B 3638 [26]) ermittelt. Nach §3 Normengesetz 1971 ist eine Normbezeichnung nach der nicht mehr gültigen ÖNORM B 3638 unzulässig. Weder in der EN 13108-6 noch in der ÖNORM B 3585 werden Anforderungen an diesen Kennwert gestellt. Trotzdem wird in Österreich häufig der Durchmesser des Kugeleindrucks bei Gussasphaltemischgütern angegeben. [25], [26]

Tabelle 6: Erläuterung der Bestandteile einer in Österreich häufig benutzten Gussasphaltkennzeichnung [24], [25]

Bezeichnung: MA8 90/10, M1, G1, KE36	
Bezeichnung	Bedeutung
MA	MA bedeutet „mastic asphalt“ und ist die englische Bezeichnung von Gussasphalt
8	Das Korngemisch hat ein Größtkorn von 8 mm
90/10	Das Oxidationsbitumen 90/10 hat den größten Anteil am Bindemittel
M1	Standfestigkeitsklasse M1
G1	Verwendetes Gestein hat die Gesteinsklasse G1
KE36	Kugeleindruckdurchmesser von 36 mm

2.3.4.2 TEMPERATURABGESENKTER GUSSASPHALT

Gussasphalt wurde lange bei Temperaturen bis zu 250 °C eingebaut. Bei diesen hohen Temperaturen kommt es zu einer sehr hohen Exposition von Dämpfen und Aerosolen, die seit einigen Jahren in Verdacht stehen gesundheitsschädlich zu sein. Aus diesem Grund darf in Deutschland seit 2008 Gussasphalt nur bei maximal 230 °C eingebaut werden um die Bildung von Dämpfen zu reduzieren. Diese Temperaturabsenkung wurde erreicht durch die Anwendung von viskositätsveränderten Bitumen- und Asphaltadditiven. Zur Anwendung kamen organische (Wachse, Fettsäureamide) und mineralische Zusätze (Zeolithe). Die erhofften Vorteile waren weniger Dämpfe sowie Aerosole, geringerer Energieverbrauch, geringerer Anlagenverschleiß, Reduzierung der CO₂ Produktion, geringere Alterung des Mischgutes, verbesserte Gebrauchseigenschaften und eine frühere Verkehrsfreigabe. [27]

Als problematisch hat sich herausgestellt dass die notwendige Energie zur Produktion von Additiven höher ist, als die eingesparte Energie durch die Temperaturabsenkung. Das macht diese Zusätze kostspielig und ineffizient. Seit 2014 wird am Straßenbaulabor des Instituts für Verkehrswissenschaften (IVWS) der Technischen Universität Wien an der Entwicklung von innovativen Methoden zur Temperaturabsenkung von Gussasphalt geforscht. Das Ziel ist eine Reduktion der Herstellungstemperatur um min. 30 °C und eine Einsparung von Energie sowie Treibhausgasen um min. 20%. Die Gebrauchseigenschaften des temperaturabge-

senkten Gussasphalts sollen dabei nicht schlechter werden. Die Absenkungen wurde dabei auch durch verfahrenstechnischen Änderungen wie die Verwendung von Rund- anstatt Kantkorn erzielt. [28]

In dieser Arbeit wird anhand eines der von der TU Wien entwickelten temperaturabgesenkten Rundkorn-Mischgutes überprüft, ob sich das Gebrauchsverhalten bei tiefen Temperaturen durch die geringere Herstellungstemperatur verbessert.

2.4 VERARBEITBARKEIT

Die Verarbeitbarkeit von Asphalt wurde im Buch „Wendehorst Baustoffkunde“ [3] folgendermaßen definiert

„Der in der Praxis immer wieder auftauchende Begriff der Verarbeitbarkeit von Asphaltmischungen ist nicht eindeutig definiert. Im Allgemeinen beschreibt man damit das Verhalten des Mischgutes beim Einbau, also ob es sich beispielsweise gut und einwandfrei verteilen und verdichten lässt“. (Wendehorst Baustoffkunde [3])

Das Verhalten beim Einbau hängt vor allem von der Zusammensetzung und Temperatur des Mischgutes ab. Die Verarbeitungsfrist ist die Zeit zwischen der Herstellungstemperatur und dem Zeitpunkt bei dem ein Einbau gerade noch möglich ist. Dieser Zeitraum wird, neben der Zusammensetzung sowie der Temperatur des Mischgutes, zusätzlich von den Witterungsbedingungen und der Einbaudicke beeinflusst. [3]

2.4.1 PRÜFUNG DER VERARBEITBARKEIT

Infolge des nicht klar definierten Begriffs der Verarbeitbarkeit, gibt es für Gussasphalt auch kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren. Im Zuge des Forschungsprojekts „High Efficient Low Emission Mastic Asphalt“ [28] wurde vom Forschungsbereich für Straßenwesen (IVWS) zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit eine Drehmomentenmessung entwickelt. Die Bestimmung des Drehmoments erfolgt durch die Verwendung eines Gegenlaufzwangsmischers mit Messsystem (siehe Kapitel 3.1.2.2). Dabei ist das Drehmoment definiert als der Widerstand (Nm) des Mischwerkzeugs bei der Drehbewegung im Mischgut. Der Vorteil dieser Methode sind die reproduzierbaren Versuchsergebnisse. Die Nachteile sind der hohe Versuchsaufwand und die Anschaffung eines kostspieligen Laborgerätes. [7]

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Prüfaufbaus zur Abschätzung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Im Idealfall soll der Versuch vor Ort auf der Baustelle durchgeführt werden können. Zu diesem Zweck werden in den nächsten Kapiteln Versuchsauf-

bauten aus anderen Fachartikel bzw. Baudisziplinen vorgestellt. Auf Basis dieser Informationen wird versucht eine neue Methode zur Prüfung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt zu entwickeln.

2.4.2 VERARBEITBARKEIT VON FRISCHBETON

Dass der Frischbeton sachgerecht transportiert und eingebaut werden kann, ist eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen der gewünschten Gebrauchseigenschaften des ausgehärteten Betons. Aus diesem Grund ist die Verarbeitbarkeit eine der wichtigsten Eigenschaften von Frischbeton und wird in der Regel durch Prüfung der Konsistenz überwacht. Für Beton wurden über 50 verschiedene Verfahren zur Konsistenzprüfung entwickelt. Die am häufigsten verwendeten Verfahren wurden im Fachartikel „Konsistenzprüfung von Frischbeton“ [29] in sechs Kategorien (Ausbreitversuch, Verdichtungsversuch, Setzversuch, Umformversuch, Fließversuch und Eindringversuch) eingeteilt. Im deutschen und europäischen Raum werden zur Konsistenzprüfung vor allem das Ausbreitmaß (EN 12350-5 [30]), das Verdichtungsmaß (EN 12350-4 [31]), das Setzmaß (EN 12350-2 [32]) und die Vebe-Zeit (EN 12350-3 [33]) verwendet. In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Verfahren zur Prüfung der Konsistenz von Beton beschrieben und auf ihre Eignung zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt untersucht. [29]

2.4.2.1 AUSBREITMAß

In Abbildung 8 ist die Durchführung eines Ausbreitversuchs gemäß [34] dargestellt. Der Ausbreittisch besteht aus einer Platte mit einer Grundfläche von (700 ± 2) mm mal (700 ± 2) mm und ist mit Scharnieren an einem Rahmen befestigt. Der Behälter aus Metall, in der Form eines Kegelstumpfes, hat eine Höhe von (200 ± 2) mm, einen unteren Durchmesser von (200 ± 2) mm und einen oberen Durchmesser von (130 ± 2) mm. Der Behälter wird mittig auf dem Ausbreittisch positioniert. Anschließend wird die Form mit zwei gleich großen Betonschichten befüllt. Jede Schicht wird durch zehn leichte Stöße mit einem Stößel ausgeglichen. Nach der zweiten Schicht wird der Beton mit dem Stößel bündig mit der Oberkante des Behälters abgestrichen. Nach ungefähr dreißig Sekunden wird die Form innerhalb von 1 s bis 3 s angehoben. Im nächsten Schritt muss die Platte 15 Mal bis zum Anschlag angehoben und frei fallen gelassen werden. Dabei darf jeder Einzelvorgang nicht kürzer als eine und nicht länger als drei Sekunden dauern. Das Höchstausbreitmaß wird in zwei Richtungen (d_1 und d_2) parallel zu den Tischkanten gemessen und mit einer Genauigkeit von 10 mm angegeben. Auf die Verarbeitbarkeit wird mit dem Ausbreitmaß laut Formel 1 geschlossen. Das Ausbreitmaß kann gemäß DIN EN 206 [34] in sechs Konsistenzklassen (F1 bis F6) eingeteilt

2 LITERATURRECHERCHE

werden und eignet sich für Beton mit einer Konsistenz zwischen steif und sehr fließfähig. [30], [34]

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Formel 1: Ausbreitmaß f in mm [30]

Dabei ist

d_1 größte Ausbreitung des Betons in mm parallel zu einer Kante des Ausbreittisches

d_2 größte Ausbreitung des Betons in mm parallel zur anderen Kante des Ausbreittisches



Abbildung 8: Ausbreitversuch [35]

Anmerkung: Die Prüfungsergebnisse des Ausbreitversuchs können verfälscht werden durch Nachschwingen des Ausbreittisches (falsche Lagerung bzw. ungeeigneter Untergrund), Erschütterungen durch zu hartes anschlagen beim Anheben der Platte und durch Verringerung der Fallgeschwindigkeit durch zu langsames Öffnen der Finger beim Fallenlassen der Platte. Ebenfalls können Prüfer das Ausbreitmaß durch den großen Zeitraum (eine bis drei Sekunden) beim Anheben und Fallenlassen der Platte beeinflussen. [36]

2.4.2.2 VERDICHTUNGSMAß

Für den Verdichtungsversuch gemäß [31] wird Beton mit einer Kelle in einen quaderförmigen Behälter (siehe Abbildung 9), mit einer Grundfläche von (200 ± 2) mm mal (200 ± 2) mm und einer Innenhöhe von (400 ± 2) mm, eingefüllt. Jede Verdichtung während des Einfüllens ist zu vermeiden. Anschließend wird mit einem Abstreichlineal überschüssiger Beton abgestrichen und solange mit einem Innenrüttler oder Rütteltisch verdichtet, bis keine weitere Verringerung des Betonvolumens feststellbar ist. Die benötigte Verdichtungszeit ist dabei irrelevant. Auf die Verarbeitbarkeit wird mit dem Verdichtungsmaß gemäß Formel 2 geschlossen. Dabei muss das Verdichtungsmaß immer $\geq 1,04$ sein und kann gemäß [34] in vier Konsistenzklassen eingeteilt werden. Der Verdichtungsversuch eignet sich für Beton mit einer Konsistenz zwischen sehr steif und weich. [31], [34]

$$c = \frac{h}{h - s}$$

Formel 2: Verdichtungsmaß c [31]

Dabei ist

- h die Innenhöhe des Behälters, in Millimeter
- s der Mittelwert der vier Messwerte für den Abstand zwischen der Oberfläche des verdichteten Betons und der Oberkante des Behälters, in Millimeter

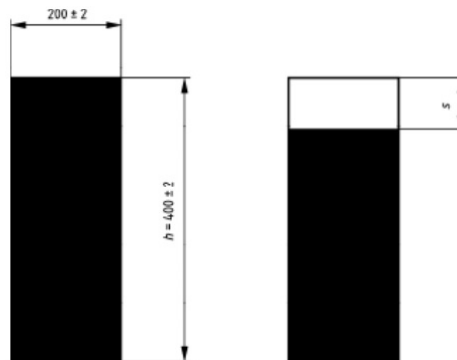


Abbildung 9: Beton im Behälter, vor und nach dem Verdichten [31]

2.4.2.3 SETZMAß

Der Metallbehälter für den Setzversuch gemäß [32] hat die Form eines Kegelstumpfes mit einer Höhe von (300 ± 2) mm, einem unteren Durchmesser von (200 ± 2) mm und einem oberen Durchmesser von (100 ± 2) mm. Die Form ist mit drei Schichten Beton zu befüllen. Jede Schicht wird mit 25-Stößen verdichtet. Als Verdichtungswerkzeug wird ein genormter Stampfer verwendet. Nach dem Einfüllen der obersten Schicht, wird der überschüssige Beton bündig mit der Oberkante abgestrichen. Anschließend wird die Form gleichmäßig innerhalb von zwei bis fünf Sekunden lotrecht angehoben. Das Einfüllen sowie das Hochziehen der Form muss, ohne Unterbrechung, innerhalb von 150 Sekunden durchgeführt werden. Danach ist das Setzmaß h mit einer Genauigkeit von 10 mm zu bestimmen. Wie in der Abbildung 10 (links) ersichtlich, ist das Setzmaß die Differenz zwischen der Form und dem Betonkörper nach der Setzung. Die Prüfung ist nur gültig wenn ein "wahres Setzmaß" gemessen werden kann. Das bedeutet der Probekörper sollte seine Form und Symmetrie annähernd behalten. Sollte der Probekörper abscheren (Abbildung 10, rechts), so ist eine weitere Prüfung durchzuführen. Kann im zweiten Versuch wieder kein "wahres Setzmaß" gemessen werden, so besitzt der Beton nicht die erforderliche Plastizität und Kohäsion um einen Setzversuch durchzuführen. Das Setzmaß kann gemäß [34] in fünf Setzmaßklassen (S1 bis S5) eingeteilt

2 LITERATURRECHERCHE

werden. Der Setzversuch eignet sich für Beton mit einer Konsistenz zwischen plastisch und fließfähig [32], [34]

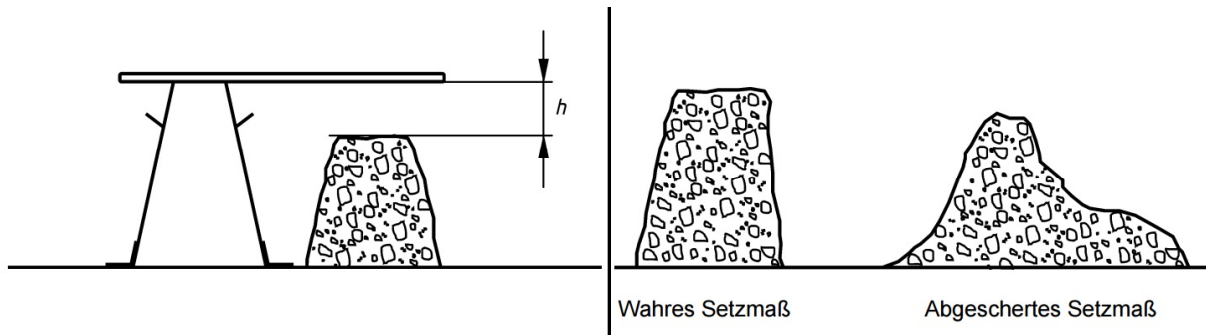


Abbildung 10: Setzmaß [32]

2.4.2.4 VEBE-ZEIT ODER SETZZEITVERSUCH

Die Vebe-Zeit gemäß [33] gehört zur Kategorie der Umformversuche. Wie in Abbildung 11 (rechts) dargestellt, hat der Metallbehälter für den Setzzeitversuch die Form eines Kegelstumpfes mit einer Höhe von (300 ± 2) mm, einem unteren Durchmesser von (200 ± 2) mm und einem oberen Durchmesser von (100 ± 2) mm. Dieser Metallbehälter wird in einer zylindrischen Form mit einer Höhe von (220 ± 2) mm und einem Innendurchmesser von (240 ± 5) mm positioniert. Die Kegelstumpfform ist mit drei Schichten [31]Beton zu befüllen. Jede Schicht wird mit 25-Stößen verdichtet. Als Verdichtungswerkzeug wird ein genormter Stampfer verwendet. Nach dem Einfüllen der obersten Schicht, wird der überschüssige Beton bündig mit der Oberkante abgestrichen. Nun wird die Kegelstumpfform vorsichtig nach oben abgehoben und eine durchsichtige Scheibe auf den Betonkegel positioniert. Durch die Auflast und die Verwendung eines Rütteltisches setzt sich der Betonkegel langsam in eine zylindrische Form. Mithilfe einer Stoppuhr kann die Vebe-Zeit ermittelt werden. Diese ist definiert als die Zeit vom Beginn des Rüttelvorganges bis zur vollständigen Benetzung der Unterseite der durchsichtigen Scheibe mit Zementleim (siehe Abbildung 11 rechts). Der Setzzeitversuch ist für Betone mit sehr steifer bis plastischer Konsistenz geeignet. [33], [37]

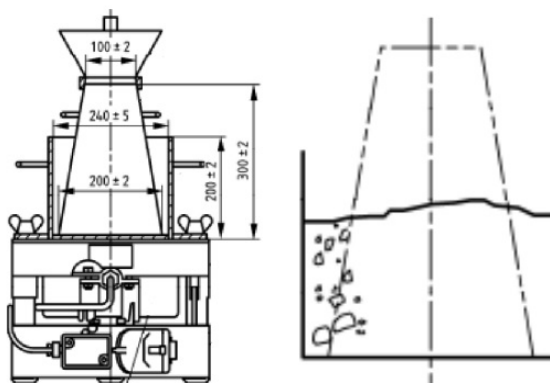


Abbildung 11: links: Vebe-Zeit-Messgerät, rechts: zusammengefallenes Setzmaß [33]

2.4.2.5 FLIEßVERSUCH

Als Beispiel für einen Fließversuch wird die „Auslaufzeit nach Werse“ vorgestellt. Ein Behälter mit einer 100 mm hohen unteren Auslauföffnung wird mit Beton gefüllt. Zuerst wird das Verdichtungsmaß bestimmt, anschließend wird der abgesunkene Betonspiegel bei gleichzeitigem Rütteln wieder aufgefüllt. Eine Auflastplatte wird im Behälter auf den Beton positioniert und die Auslauföffnung geöffnet. Die Auslaufzeit ist die Zeit, die benötigt wird damit die Betonoberfläche um 10 cm, durch die Verwendung einer Auflastplatte und eines Rütteltisches, absinkt. [38] zitiert in [37]

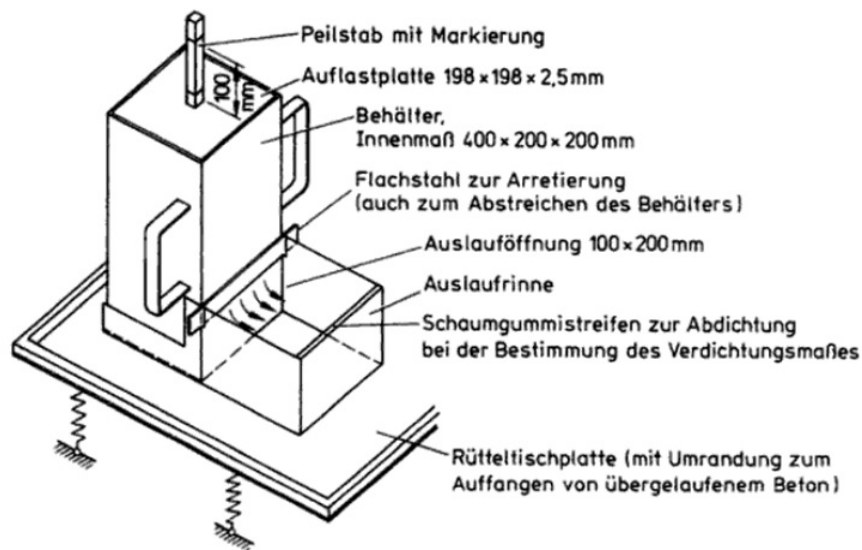


Abbildung 12: Prüfeinrichtung zur Ermittlung der Auslaufzeit nach Werse [37]

2.4.2.6 EINDRINGVERSUCH

Für den Eindringversuch in Beton kann eine Betonsonde verwendet werden. Der Eindringversuch eignet sich für die Überprüfung der Verarbeitbarkeit von erdfeuchten bis plastischen Betonmischungen. Die in diesem Kapitel beschriebene Sonde ist sozusagen ein kleines „Rambär“-Eindringgerät mit einem Gewicht von 1 kg (Rambär wiegt 0,5 kg), einer Länge von 50 cm, einem Durchmesser von 20 mm (entspricht rund $\frac{2}{3}$ D des Größtkorns) und einer Rambär-Fallhöhe von 20 cm. Bei diesem Versuch wird die Anzahl der Rammschläge gezählt, die nötig ist um 10 cm in den Frischbeton einzudringen. [39]

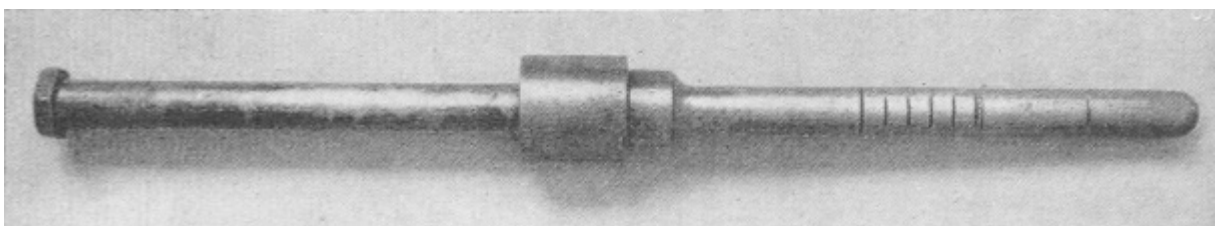


Abbildung 13: Betonsonde Durchmesser 20 mm [39]

2.4.3 VERGLEICH KONSISTENZPRÜFVERFAHREN

In [29] wurden verschiedene Konsistenzprüfverfahren miteinander verglichen, um bei verschiedenen Konsistenzbereichen die optimale Prüfmethode zu finden. Dazu wurden rund 1000 Frischbetonversuche an Betonen mit drei unterschiedlichen Zementen ausgewertet. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Abbildung 14 ersichtlich. Dabei wurden die verschiedenen Prüfverfahren in "bedingt geeignet", "geeignet" und "gut geeignet" unterschieden. [29]

Bei einem Vergleich zwischen Ausbreitmaß und Setzmaß wurde festgestellt, dass das Ausbreitmaß weitaus geringere Streuungen aufweist und deshalb das bessere Verfahren für Betone mit einer baustellenüblichen Konsistenz ist. Bei einer Gegenüberstellung von Verdichtungsmaß und Vebe-Zeit wurde festgestellt, dass das Verdichtungsmaß Ergebnisse besser reproduziert. [29]

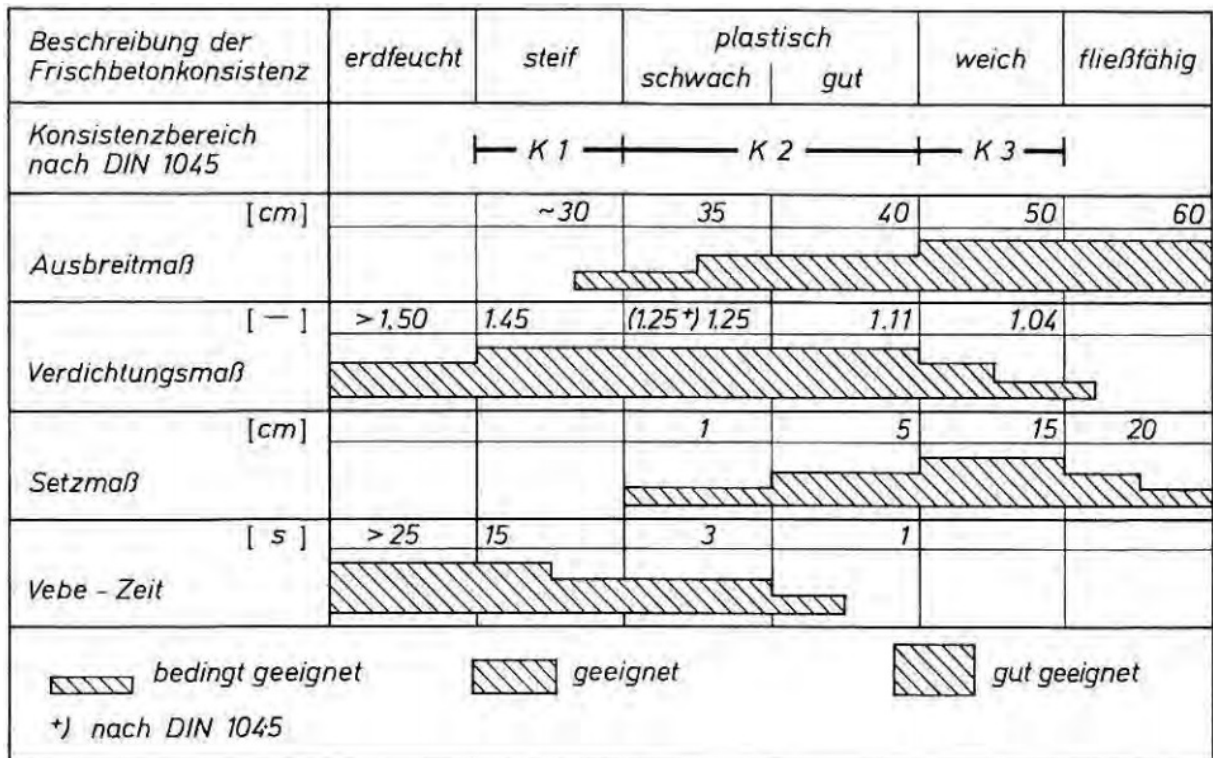


Abbildung 14: Eignungs- und Anwendungsbereiche der Konsistenzprüfverfahren [29]

Bis auf den Ausbreitversuch können die im Kapitel 2.4.2 beschriebenen Prüfverfahren nicht für die Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt modifiziert werden. Die Prüfung der Vebe-Zeit sowie die Verwendung einer Betonsonde (Eindringversuch) sind für Gussasphalt ungeeignet, da diese Verfahren nur bei sehr steifen Konsistenzen anwendbar sind. Der Verdichtungsversuch kann nicht verwendet werden, da Gussasphalt nicht verdichtet wird und es den fließfähigen Bereich nicht abdeckt. Der Fließversuch wird hauptsächlich zur Prüfung der

Pumpfähigkeit von Frischbeton eingesetzt und erzeugt bei Gussasphalt einen zu hohen Reinigungsaufwand. Beim Setzversuch ist es unwahrscheinlich, dass bei den hohen Verarbeitungstemperaturen oder der Zugabe von Licomont ein wahres Setzmaß erhalten wird. Zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt sollte der Ausbreitversuch am ehesten geeignet sein, da er für die Prüfung von weichen und fließfähigen Konsistenzbereichen verwendet werden kann. Die Versuche sollen direkt auf der Baustelle durchgeführt werden, dadurch ist es von Vorteil, dass sowohl der Ausbreittrichter als auch der Ausbreittisch aus robusten Materialien hergestellt sind und leicht gereinigt sowie transportiert werden können.

2.4.4 VERARBEITBARKEIT VON FRISCHMÖRTEL

Zur Prüfung der Verarbeitbarkeit von Frischmörtel wird ein Ausbreitversuch nach EN 1015-3 [40] angewendet, der dem Ausbreitversuch von Frischbeton ähnelt. Für die Prüfung wird mindestens 1,5 l Mörtel benötigt, der durch einen Probenteiler oder durch eine Viertelung, geteilt wird. Ein kegelstumpfförmiger Setztrichter Höhe ($60 \pm 0,5$) mm, Innendurchmesser unten ($100 \pm 0,5$) mm und oben ($70 \pm 0,5$) mm) wird mittig auf eine Glasplatte eines Ausbreittisches (Hägermantisch) positioniert. Im nächsten Schritt wird der Setztrichter in zwei Schichten mit Mörtel befüllt. Nach jeder Schicht muss der Mörtel, mithilfe eines Stampfers, mit zehn Stößen verdichtet werden. Bei der obersten Schicht wird der überschüssige Mörtel bündig mit der Oberkante abgestrichen. Nach rund 15 Sekunden wird der Setztrichter langsam vertikal angehoben und der Versuch gestartet. Der Ausbreittisch wird 15-mal mit einer konstanten Frequenz von einem Hub pro Sekunde angehoben und fallen gelassen. Der Durchmesser des ausgebreiteten Mörtels wird in zwei zueinander rechtwinkligen Richtungen, mit einer Genauigkeit von 1 mm, gemessen. Der Mittelwert der zwei Messwerte wird als Ausbreitmaß bezeichnet, falls die beiden Messwerte um weniger als 10% vom Mittelwert abweichen. Weichen die beiden Messwerte um mehr als 10% ab, so ist die Prüfung mit einer weiteren Teilprobe zu wiederholen. Weichen bei der Wiederholungsprüfung die Messwerte wieder um mehr als 10% vom Mittelwert ab, so muss die Prüfung mit einer frischen Prüfprobe (aus Teilproben oder aus einem im Labor hergestellten Mörtel) wiederholt werden. [40]

Ein modifizierter Frischmörtel-Ausbreitversuch sollte zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt geeignet sein.

2.4.5 VERARBEITBARKEIT VON GUSSASPHALT

In der Studie „Untersuchungen zum maximalen Verformungswiderstand ohne Rissbildung von hochstandfestem Gussasphalt bei Einsatz verschiedener Bitumenarten und bitumenadditiven“ [41] zitiert im Fachartikel „Einfaches Verfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit

2 LITERATURRECHERCHE

von Gussasphalt“ [42] wurde versucht, eine neue Variante zur Abschätzung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt zu finden. [42]

Der Aufbau der Prüfeinrichtung ist dem Aufbau zur Prüfung der Verarbeitbarkeit von Frischmörtel ähnlich. Zur Anwendung ist ein Ausbreittisch (Hägermantisch), eine Kupferplatte und ein Formzylinder in der Form eines Marshall Probekörpers mit einem Volumen von 729,3 cm³ gekommen. Vor dem Versuch war das Anwärmen der Kupferplatte und des Formzylinders auf 300 °C erforderlich. Die Mischgutmenge je Versuch hat 550 cm³ betragen. Die erhitzte Kupferplatte wurde auf dem Ausbreittisch befestigt und sowohl Ausbreittisch, als auch die Metallform wurden mit einer Silikonwasseremulsion benetzt. Der mittig auf der Kupferplatte positionierte Formzylinder wurde mit Gussasphalt gefüllt und anschließend wurde der Zylinder vertikal angehoben. Nach der Durchführung von 15 Hieben in 15 Sekunden mit dem Hägermantisch konnte der Durchmesser in zwei senkrecht zueinander liegenden Richtungen gemessen werden und zu einem Ausbreitmaß gemittelt werden. Der Versuch wurde für verschiedene Gussasphaltmodifikationen mit einer Temperatur von 180 °C bis 250 °C durchgeführt. Es konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Ausbreitmaß festgestellt werden. Gussasphaltnischgüter die ein Ausbreitmaß von mindestens 15,5 cm hatten, haben bei einem händischen Einbau eine gute Verarbeitbarkeit gezeigt. Über die Genauigkeit des Verfahrens konnte keine eindeutige Aussage getroffen werden. [42]

Die Studie „Temperaturabgesenkte Asphalte gebrauchsvorhaltensorientierte Untersuchungen an Bitumen und Asphalten“ [43] hat sich ebenfalls mit einem ähnlichen Versuchsaufbau befasst. Im Gegensatz zu [41] wurde der Gussasphalt direkt in den Marshallformen erhitzt und es kam kein Gleitmittel zur Anwendung. Die Marshallformen wurden sofort nach dem Entfernen aus dem Ofen auf die Stahlplatte positioniert und die Form wurde innerhalb einer bis drei Sekunden angehoben. Nach einer Dauer von 3 Minuten wurde das Höchstaubreitmaß in zwei Richtungen parallel zum Ausbreittisch gemessen. Das Ausbreitmaß wurde durch das Mitteln der beiden Messwerte berechnet. Die Ergebnisse der Untersuchung waren widersprüchlich und der Versuch wurde nur als „bedingt als Schnelltest geeignet“ eingestuft. [43]

3 PRÜFMETHODEN UND MATERIALIEN

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit angewendeten Prüfungen und die verwendeten Materialien beschrieben.

3.1 PRÜFMETHODEN

3.1.1 SIMULATION DER BITUMENALTERUNG IM LABOR

Durch die in den Kapitel 3.1.1.1 und 3.1.1.2 beschriebenen Versuche wird Bitumen kurzzeit- und langzeitgealtert. Mit dem gealterten Bitumen werden Probekörper aus Gussasphalt hergestellt und durch weitere GVO-Prüfungen auf die Gebrauchseigenschaften bei tiefen Temperaturen geschlossen.

3.1.1.1 KURZEITALTERUNG - ROLLING THIN FILM OVEN TEST (RTFOT)

Mithilfe des RTFOT wird die Bitumenalterung während der Herstellung, des Transportes und des Einbaus simuliert. Im Detail deckt der Versuch den Bitumentransport, Heißlagerung, Pumpvorgänge, Mischen im Asphaltmischwerk, Asphalttransport zur Baustelle und den Mischguteinbau ab. [44]:

Die Durchführung des RTFOT sowie die Prüfeinrichtung werden in der EN 12607-1 [45] geregelt. Gemäß [45] muss der Versuch mit einer Temperatur von $(163 \pm 1)^\circ\text{C}$ durchgeführt werden. Davon abweichend wurden die RTFOT – Prüfungen in dieser Arbeit bei einer Temperatur von 190°C sowie 240°C durchgeführt, um die Bitumenalterung bei der Herstellung eines temperaturabgesenkten Gussasphalt mit einen konventionellen Gussasphalt vergleichen zu können. [44], [45]

Die Prüfeinrichtung ist ein spezieller, elektrisch beheizbarer Ofen (Abbildung 15, links). Im hinteren Bereich befindet sich eine Flaschentrommel für acht spezielle „RTFOT-Glasflaschen“. Im oberen Bereich befindet sich ein Ventilator, der die Lufttemperatur von 190°C bzw. 240°C im ganzen Ofen verteilt. Die Glasflaschen werden mit jeweils $(35,0 \pm 0,5)\text{g}$ Bitumen befüllt und in die Flaschentrommel gesteckt. In der Abbildung **15** (rechts, unten) ist eine leere, eine volle und eine geprüfte Flasche dargestellt. Durch die langsame Bewegung der Trommel mit 15 Umdrehungen pro Minute bildet sich ein dünner, ständig fließender Bitumenfilm, der eine große Reaktionsoberfläche bietet. Die beschleunigte Oxidation erfolgt einerseits durch die hohe Temperatur und andererseits durch das Einblasen von auf Prüftemperatur vorgeheizte Luft in die Glasflaschen mittels einer Luftlanze

3 PRÜFMETHODEN UND MATERIALIEN

(Abbildung 15, rechts, oben). Nach 85 Minuten Prüfdauer werden die Glasflaschen entnommen und das Bitumen in eine Metalldose entleert. [44]

Anmerkung: Nach dem Aufheizen des Ofens auf die Prüftemperatur werden die RTFOT-Glasflaschen in die Flaschentrommel gesteckt. Aus diesem Grund kommt es zu einem Temperaturabfall im Ofen. Nach der EN 12607-1 besteht die Prüfzeit aus einer Alterungszeit von 75 Minuten plus einer Temperierungszeit von 10 Minuten. Wird nach 10 Minuten die Prüftemperatur nicht erreicht, so ist der Versuch abzubrechen. Auf Grund der hohen Temperaturen von 190 °C sowie 240 °C kann eine Temperierungszeit von 10 Minuten nicht eingehalten werden. Bei einer Prüftemperatur von 190 °C beträgt die notwendige Temperierungszeit rund 15 Minuten und bei 240 °C wird die Prüftemperatur erneut nach rund 36 Minuten erreicht. [45]



Abbildung 15: links: Rolling Thin Film Oven Test, rechts oben: Luftlanze und vertikale Flaschentrommel, rechts unten: RTFOT – Glasflaschen [8]

Zusammengefasste Prüfbedingungen:

- (1) Gerätebezeichnung: MATEST B066-01
- (2) Prüftemperatur: 190 °C und 240 °C
- (3) Alterungsdauer: 85 Minuten
- (4) Drehzahl Flaschentrommel: 15 U/min
- (5) Luftmenge Luftlanze: 4 Liter/min
- (6) Bitumenmenge: 8 x 35 g = 280 g

Prüfresultat(se): Die Bitumenkonditionierung mit dem RTFOT liefert kein Prüfergebnis, sondern kurzzeitgealtertes Bitumen.

3.1.1.2 LANGZEITALTERUNG - PRESSURE AGING VESSEL (PAV)

Mit dem PAV-Versuch simuliert man eine Bitumenalterung während einer Asphaltliegedauer von etwa 5 bis 10 Jahren. Eine genauere Angabe der Liegedauer ist nicht möglich, da die Alterung vom verwendeten Frischbitumen, Asphalteeigenschaften (Hohlraumgehalt, Durchlässigkeit, Eigenschaften der Gesteine), äußeren Umwelteinflüssen (Sauerstoff, Ozon, Wasser, Salz, Sonneneinstrahlung, Luftdruck) und weiteren Faktoren abhängig ist. Während der Liegezeit kann das Bitumen als annähernd starrer und dichter Körper betrachtet werden und die flüchtigen Bestandteile können nicht mehr verdampfen. Während des Versuches wird dies mit einem Luftdruck von 300 PSI (20,7 bar) und einer Temperatur von 110 °C simuliert. Um die Kurzzeitalterung bei der Gesamtalterung zu berücksichtigen, werden ausschließlich RTFOT kurzzeitgealterte Bitumen für die PAV-Versuche verwendet. Die Durchführung des PAV-Versuches sowie die Prüfeinrichtung werden in der EN 14769 [46] geregelt. [44], [46]

Die Prüfeinrichtung des PAV besteht, wie in Abbildung 16 ersichtlich, aus einem elektrisch beheizten Druckbehälter und einem Schalengestell mit zehn Blechschalen. Durch den relativen großen Schalendurchmesser von 14 cm, bietet der Bitumenfilm eine große Reaktionsoberfläche. Durch die geringe Einfüllhöhe von rund 3 mm, kann Luftsauerstoff in das Bindemittel eindringen und die Oxidation verstärken. Um das Bindemittel mit dem PAV zu altern, wird im ersten Schritt der Innenraum des Druckbehälters auf 100 °C erwärmt. In jede der zehn Schalen wird 50 Gramm kurzzeitgealtertes Bitumen gefüllt und die Blechschale im Schalengestell gestellt. Anschließend wird das Schalengestell, möglichst zügig, in der Prüfeinrichtung positioniert. Während dem Einstellen des Schalengestells in den Druckkessel, kommt es zu einem Temperaturabfall im Inneren. Um diesen Effekt nicht zu verstärken wird der Schalenhalter mit den befüllten Blechschalen auf 110 °C vortemperiert. Nachdem der Deckel des Druckbehälter geschlossen und verschraubt wurde, wird Druckluft (20,7 bar) eingelassen. Anschließend wird der Innenraum wieder auf die Alterungstemperatur von 100 °C aufgeheizt. Dabei kommt es durch den Temperaturanstieg zu einem Überdruck (Gesetz von Amontos), der über ein Überdruckventil abgelassen wird. Diese Druckluftschwankung beeinflusst wiederum die Temperatur im Inneren. Aus diesem Grund muss dauernd der Druckluftkessel beheizt bzw. gekühlt werden und Druckluft ein- bzw. abgelassen werden. Der Alterungsvorgang startet sobald der Innenraum des Druckluftbehälters die Prüftemperatur mit einer Genauigkeit von ± 2 °C erreicht hat. Während der Alterungsdauer von 20 Stunden werden die Temperatur und der Druck im Inneren des Kessels mit einem angeschlossenen Computer aufgezeichnet. Nach dem Ende der Alterung wird der Druck langsam (8 bis 10 Minuten) über ein Ventil abgelassen. Bei einer zu schnellen Druckreduktion entweicht die Luft zu schnell aus dem Bindemittel und das Bitumen schäumt aus den Blechschalen. Nachdem der Überdruck vollständig abgebaut wurde, wird der Schalenhalter entnommen und für 30 Minu-

3 PRÜFMETHODEN UND MATERIALIEN

ten in einem Trockenschrank bei 163 °C temperiert. Durch diesen Vorgang kann die restliche Luft entweichen. [44]

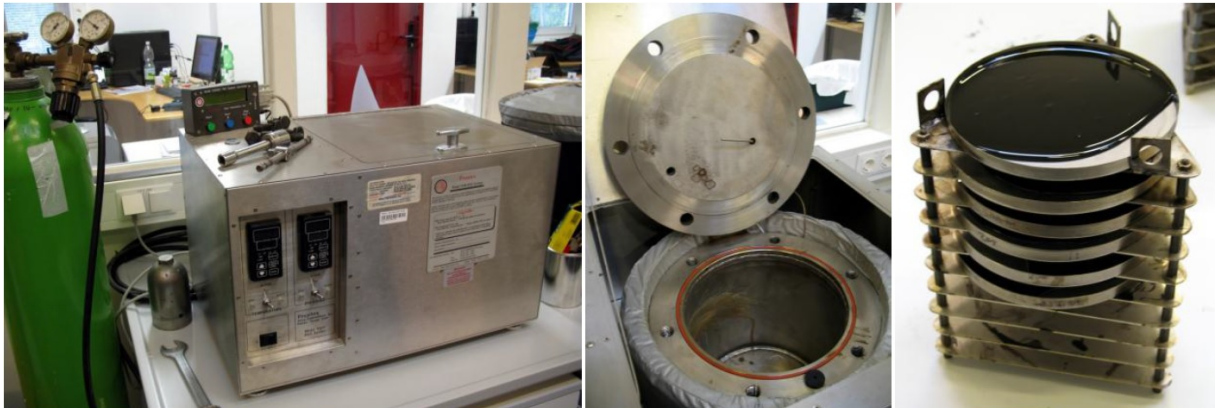


Abbildung 16: links: Pressure Aging Vessel, mitte: Druckbehälter, rechts: Schalenhalter mit befüllten Schalen [8]

Zusammengefasste Prüfbedingungen:

- (1) Gerätebezeichnung: PRENTEX 9300PAV + 9300SC PAV System Controller
- (2) Prüftemperatur: 100 °C
- (3) Luftdruck: 300 PSI (20,7 bar)
- (4) Alterungsdauer: 20 Stunden
- (5) Nacherhitzung: 163° C für 30 Minuten
- (6) Bitumenmenge: 10 x 50 g = 500 g

Prüfresultat(se): Die Bitumenkonditionierung mit dem PAV liefert kein Prüfresultat, sondern langzeitgealtertes Bitumen.

3.1.2 ALLGEMEINE VERFAHREN

3.1.2.1 NASSSIEBVERFAHREN

Zur Bestimmung der Kornverteilung von Gesteinskörnungen wird das Nasssiebverfahren mit einem Siebturm auf einer Vibrationssiebmaschine gemäß EN 933-1 [47] angewendet. Der Siebturm (siehe Abbildung 17) besteht aus Quadratlochsieben (Durchmesser 90; 63; 45; 31,5; 22,4; 16; 11,2; 8; 4 mm), Maschennetzsieben (Durchmesser 2; 1; 0,5; 0,25; 0,063 mm), einem Boden mit einem Wasserauslass und einer Siebspanneinheit mit Wasserdüse. Die Siebe sind der Größe nach absteigend von oben nach unten angeordnet. Nachdem die Messprobe für 12 Stunden bei 110° C temperiert wurde, wird diese in das oberste Sieb geschüttet, die Siebspanneinheit aufgesetzt und der Siebturm verspannt. Anschließend wird die Vibrationssiebmaschine gestartet und der Siebprozess durch das über die Düse eintretende

3 PRÜFMETHODEN UND MATERIALIEN

Wasser unterstützt. Nach ungefähr 15 Minuten ist das aus dem Siebturm auslaufende Wasser wieder klar und frei von Feinanteilen ($\leq 0,063$ mm). Das Siebverfahren wird beendet und die Siebe in einer Wärmekammer für 12 Stunden bei 110 °C getrocknet. Nach dem Auskühlen des Gesteins werden die einzelnen Rückstände auf den Sieben gewogen. Die Korngrößenverteilung kann mithilfe Formel 3 gemäß [47] bestimmt werden. Beurteilungskriterium ist die Summenverteilung der Durchgänge durch die Siebe. [7], [47]

$$M_x = \frac{E - R}{E} \cdot 100$$

Formel 3: Summenverteilung in Prozent [47]

Dabei ist

- M_x Masse des Rückstandes auf Sieb x, in Bezug auf die Einwaage
E Masse der Einwaage
R Masse des Rückstandes auf Sieb x



Abbildung 17: Siebturm

Zusammengefasste Prüfbedingungen:

- (1) Gerätebezeichnung: Siebmaschine Retsch AS 200
- (2) Trocknung Proben vor dem Versuch: 12 Stunden bei 110 °C
- (3) Art der Siebung: Nasssiebung

- (4) Dauer: Rund 15 Minuten
- (5) Trocknung der Proben nach dem Versuch: 12 Stunden bei 110 °C
- (6) Probengröße: Abhängig vom Größtdurchmesser des Gesteins

Prüfresultat(se): Mit der Nasssiebung wird die Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen ermittelt. Mit den Korngrößenverteilungen unterschiedlicher Körnungen werden die Sieblinien von Mischgütern konzipiert.

3.1.2.2 GEGENLAUFZWANGSMISCHER

Der Gegenlaufzwangsmischer ist ein Labormischer, ausgestattet mit einem Messsystem, das eine Ermittlung des Drehmoments, der Mischzeit, der Drehzahlen sowie der Temperatur des Mischgutes ermöglicht. Der Labormischer kann sowohl zur Prüfung der Verarbeitbarkeit (Drehmomentenmessung), als auch zur Herstellung von Asphalt- und Gussasphaltplatten verwendet werden. Für die Drehmomentmessung werden die Messwerte auf einen PC übertragen und in einer MS-Excel Datei gespeichert. Das temperaturabhängige Drehmoment ist definiert als der Widerstand des Mischwerkzeugs bei der Drehbewegung in Nm. Mit diesem Kennwert kann auf die temperaturabhängige Verarbeitbarkeit geschlossen werden. Für diese Arbeit wurden jedoch ausschließlich Gussasphaltplatten hergestellt, um Probekörper für weitere GVO-Prüfungen zu gewinnen. In Abbildung 18 sind ein Gegenlaufzwangsmischer und eine Wärmekammer ersichtlich.

Vor der **Herstellung von Gussasphaltplatten** werden die verwendeten Gesteinskörnungen sowie das Bitumen im Wärmeschrank auf die Herstellungstemperatur temperiert. Die Verweildauer im Ofen beträgt für die Gesteinskomponenten fünf und für das Bitumen drei Stunden. Der Labormischer wird ebenfalls auf die gleiche Temperatur vorgewärmt. Die Gesteinskörnungen werden in die Mischtrommel eingefüllt und für 40 Sekunden homogenisiert. Anschließend wird das Bitumen hinzugegeben und die Mischgutkomponenten für weitere 300 Sekunden gemischt. Nach dem Ende des Mischvorganges wird die erforderliche Menge des Mischgutes entnommen und in der Plattenform verteilt. Nach einem Tag ist die Gussasphaltplatte ausgehärtet und kann in die Probekörper zersägt werden. Die Herstellungstemperatur betrug 210 °C (aus Verarbeitbarkeitsgründen) für das mit 190 °C kurzzeitgealterte Bitumen und 240°C für das mit 240 °C kurzzeitgealterte Bitumen.

Bei der **Drehmomentmessung** wird bei jedem Versuch eine Mischgutmasse von 22 kg verwendet, um unterschiedliche Mischgüter miteinander vergleichen zu können. Die erforderliche Gesteinskörnung wird für fünf Stunden und das Bitumen wird für drei Stunden auf 170 °C temperiert. Der Labormischer wird ebenfalls auf 170 °C vorgewärmt. Im nächsten Schritt wird zuerst die Gesteinskörnung für 40 Sekunden im Labormischer homogenisiert.

3 PRÜFMETHODEN UND MATERIALIEN

Anschließend wird das Bitumen hinzugegeben und das Mischgut für weitere 300 Sekunden gemischt. Direkt anschließend wird die erste Drehmomentmessung gestartet. Die Drehmomentmessungen haben eine Dauer von jeweils 300 Sekunden bei einer Drehzahl von 40 U/min und werden bei einer Prüftemperatur von 170 °C, 180 °C, 200 °C, 220 °C und 250 °C durchgeführt. Bei der Auswertung werden nur die Temperaturen verwendet, für die mindestens zwanzig gleiche Drehmomentmesswerte aufgezeichnet worden sind. Weder in der EN 13108-6 [24] noch in der ÖNORM B 3585 [25] werden Anforderungen an die Verarbeitbarkeit von Gussasphalt gestellt. Im Labor werden die erhaltenen Versuchsergebnisse zum Vergleich der Verarbeitbarkeit von konventionellen Gussasphaltmischgütern und den neu entwickelten temperaturabgesenkten Gussasphaltmischgütern verwendet.



Abbildung 18: Gegenlaufzwangsmischer (links) und Wärmekammer (rechts)

Zusammengefasste Eigenschaften bei der Herstellung von Gussasphaltplatten:

- (1) Gerätebezeichnung: InfraTest Labormischer 35 l Mischtrommel
- (2) Dauer der Temperierung: 5 Stunden für die Gesteinskörnung und 3 Stunden für das Bitumen
- (3) Herstellungstemperatur: 210 °C (RK-Mischgut mit Bitumen welches bei 190 °C gealtert wurde) und 240 °C (KK-Mischgut mit Bitumen welches bei 240 °C gealtert wurde)
- (4) Mischdauer: 40 Sekunden für Homogenisierung der Gesteinskörnung und 300 Sekunden für das gesamte Mischgut
- (5) Abkühlzeit Gussasphaltplatten: Ungefähr 24 Stunden

Ergebnis(se): Mit dem Gegenlaufzwangsmischer wird das Gussasphaltmischgut gemischt und Gussasphaltplatten hergestellt. Aus den Platten werden die Probekörper gewonnen.

3.1.3 ANGEWENDETE GVO ASPHALTPRÜFUNGEN

3.1.3.1 ABKÜHLVERSUCH (TSRST) NACH EN 12697-46

Der Abkühlversuch simuliert ein wetterbedingtes Abkühlen von Asphalt. Ausgehend von einer Anfangstemperatur T_0 von $+10\text{ °C}$ wird die Temperatur eines eingespannten Probekörpers mit einer Geschwindigkeit von -10 °C/h abgekühlt. Durch die Verhinderung des thermischen Schrumpfens kommt es zu kryogenen Zugspannungen σ_{kry} , die bei der Ausfalltemperatur T_{Ausfall} zum Versagen des Probekörpers führen. Während dem Versuch wird der Verlauf der kryogenen Zugspannungen, die Ausfalltemperatur und die Ausfallspannung $\sigma_{\text{kry, Ausfall}}$ aufgezeichnet. Für jedes Mischgut sind mindestens drei Prüfkörper zu prüfen. In Abbildung 19 ist das Prüfgerät für den TSRST- und UTST-Versuch ersichtlich. [2], [21]

Die Proben können sowohl aus hergestellten Platten oder direkt aus Straßenbefestigung gewonnen werden. Die Prüfkörper haben die Form eines prismatischen Balkens mit einer Mindestlänge von 160 mm. Die Breite und Höhe ist abhängig von dem verwendeten Größtkorn D des Asphaltmischgutes. Alle in dieser Arbeit geprüften Probekörper wurden aus, im Labor hergestellten, Gussasphaltplatten (siehe Kapitel 3.1.2.2) gewonnen und haben eine Länge von 200 mm sowie eine Breite bzw. Höhe von 50 mm. Mithilfe einer Einspannbank werden die Prüfkörper mittig auf die Adapter geklebt. [21]

Die Probekörper werden durch Verschrauben der Adapter mit der Belastungseinrichtung in das Prüfgerät eingebaut. Die Dauer der Konditionierungsphase ist abhängig von den Maßen der Proben. Die Anfangstemperatur T_0 muss mindestens 10 Minuten mit einer Genauigkeit von $\pm 1\text{ °C}$ eingehalten werden. Die Messung der Probekörpertemperatur erfolgt mittels Messfühler in einer Blindprobe. Während der Konditionierungsphase muss die Regelung des Prüfgeräts sicherstellen, dass die Prüfkörper keinerlei Belastungen ausgesetzt sind. Um die Dauer der Abkühlung auf die Anfangstemperatur zu reduzieren, wurden alle Probekörper vor dem Einbau für 24 Stunden in einem Kühlschrank auf $+10\text{ °C}$ temperiert. [21]

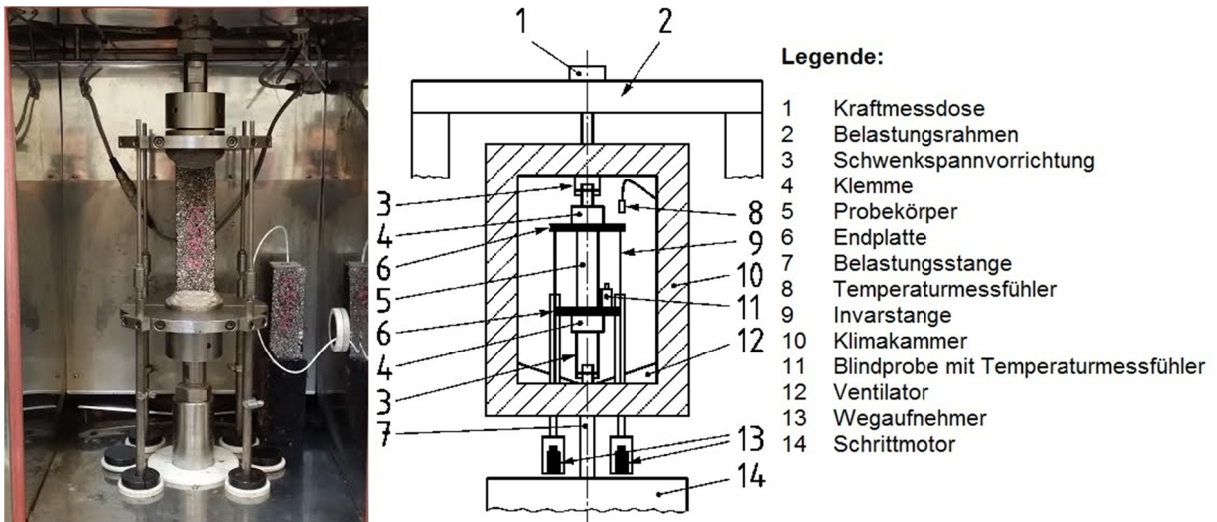


Abbildung 19: Prüfgerät für TSRST und UTST

Zusammengefasste Prüfbedingungen:

- (1) Gerätebezeichnung: Wille Geotechnik T75.IPE20 und LFMZ-50
- (2) Anfangstemperatur: 10 °C
- (3) Abkühlrate: -10 °C/h
- (4) Probekörperabmessungen: 50 mm / 50 mm / 200 mm

Prüfresultat(se): Kryogene Zugspannungen σ_{kry} , die bei der Ausfalltemperatur $T_{Ausfall}$ zum Versagen des Probekörpers führen.

3.1.3.2 EINAXIALE KÄLTZUGVERSUCH (UTST) LAUT EN 12697-46

Bei der einaxialen Kältezugsprüfung werden die gleichen Probekörper und die gleiche Prüfmaschine wie beim Abkühlversuch (siehe Kapitel 3.1.3.1) verwendet. Nach spannungsfreier Konditionierung auf eine Prüftemperatur zwischen +20 und -45 °C werden die Prüfkörper bei konstanter Temperatur mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 mm/min gedehnt. Daraus ergibt sich die maximale Spannung (Zugfestigkeit) $\beta_t(T)$ und die entsprechende Ausfallzugdehnung $\epsilon_{Ausfall}(T)$ bei der Prüftemperatur T . Für jedes Mischgut bzw. Prüfkombination (Temperatur, Dehnung) sind mindestens drei Probekörper zu prüfen. [2], [21]

Prüfresultat(se): Maximale Zugfestigkeit $\beta_t(T)$ und die entsprechende Ausfallzugdehnung $\epsilon_{Ausfall}(T)$ bei der Prüftemperatur T .

3.2 MATERIALIEN

3.2.1 BITUMEN

Bei allen in dieser Arbeit geprüften Mischgütern kam ein Bitumen (Laborcode: B569A) zur Anwendung, das zu 82% aus dem Oxidationsbitumen 90/10 und zu 18% aus dem Straßenbaubitumen 70/100 besteht.

Für die Alterungsversuche wurde das B569A-Bitumen bei 190 °C bzw. 240 °C dem RTFOT kurzzeitgealtert. Für die Ausbreitversuche wurde das Bitumen bei einem temperaturabgesenkten RK-Mischgut mit 3% Licomont (L.) modifiziert, um ein maximales Ausbreitmaß zu erhalten.

3.2.2 VERWENDETE GUSSASPHALTMISCHGÜTER

Mischgüter Ausbreitversuche mit Bezeichnung nach Kapitel 2.3.4.1:

- (1) Konventionelles KK-Referenzmischgut
Bezeichnung: MA8-KK 90/10, M1, G1, KE36
- (2) RK-Mischgut
Bezeichnung: MA8-RK 90/10, M1, G1, KE36
- (3) RK-Mischgut mit 3% Modifizierungsadditiv (Licomont)
Bezeichnung: MA8-RK + 3% L. 90/10, M1, G1, KE36

Mischgüter Alterungsversuche mit Bezeichnung nach Kapitel 2.3.4.1:

- (1) KK-Mischgut kurzzeitgealtertes Bitumen bei 240 °C
Bezeichnung: MA8 90/10, M1, G1, KE36, KK(240 °C)
- (2) RK-Mischgut kurzzeitgealtertes Bitumen bei 190 °C
Bezeichnung: MA8 90/10, M1, G1, KE36, RK(190 °C)

3.2.3 GESTEIN

Durch die Gesteinsform, die in dieser Arbeit verwendeten Gesteinskörnungen, können die Mischgüter in ein Rundkorn-Mischgut (RK-Mischgut) und ein konventionelles Kantkorn-Mischgut (KK-Referenzmischgut) unterschieden werden. Als Füller wurde bei beiden Mischgütern Kalksteinmehl eingesetzt. Beim RK-Mischgut wurde für alle Gesteinskörnungen ausschließlich Kies aus einem Steinbruch nahe Baden verwendet. Beim KK-Mischgut wurde für die Korngruppe 0-2 mm Dolomitstein (Bezeichnung: Gaaden) und für die Korngruppen 2-4 mm sowie 4-8 mm Kersantit (Bezeichnung: Loja) eingesetzt. Auf die verschiedenen Gesteinsarten wird im Kapitel 2.2.1 eingegangen. Sowohl die Sieblinien als auch die Einwaagen der Gesteine sind im Anhang angeführt.

4 PRÜFPROGRAMM

4.1 PRÜFUNG DER VERARBEITBARKEIT

Auf Basis der beschriebenen Versuche in Kapitel 2.4 wird in diesem Abschnitt die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt beschrieben. Anschließend werden die Messergebnisse mit den Prüfergebnissen von Drehmomentmessungen mit einem Gegenlaufzwangsmischer auf Plausibilität überprüft.

Als Hauptprobleme beim Entwurf einer Prüfmethode wurden die hohe Temperatur von Gussasphalt bzw. der schnelle Temperaturabfall und das Haften von Gussasphalt an den Prüfutensilien identifiziert. Der schnelle Temperaturabfall führt zu einer Beeinflussung der Messergebnisse, da das Mischgut schnell aushärtet. Teilweise kann sogar an der Oberfläche eine Hautbildung festgestellt werden. Die Klebrigkeit beeinflusst die Entwicklung insofern, dass ein Prüfaufbau so gestaltet werden muss, dass eine einfache Reinigung durchgeführt werden kann. Im Verlauf der Arbeit wird sich zeigen, ob ein Prüfaufbau ohne Vorwärmen der Bestandteile überhaupt möglich ist. Ein weiteres Problem ist, dass die Konsistenz von Gussasphalt stark von der Verarbeitungstemperatur abhängt. Bei einer geringen Einbautemperatur kann sich Gussasphalt zäh und plastisch verhalten. Bei hohen Temperaturen und der Verwendung von Licomont kann die Konsistenz sehr stark fließfähig sein.

Von den in Kapitel 2.4 beschriebenen Prüfaufbauten sind modifizierte Varianten des Ausbreitversuch für Frischbeton sowie des Ausbreitversuchs für Frischmörtel am ehesten für die Verarbeitungskontrolle von Gussasphalt geeignet. Mit dem neu entwickelten Versuchsaufbau soll eine Verarbeitungsprüfung direkt auf der Baustelle möglich sein. Es wurde die Entscheidung getroffen den Ausbreitversuch für Frischbeton zur Verarbeitungskontrolle von Gussasphalt zu modifizieren, da die Bestandteile robuster sind und kein Laborgerät (Hägermann-Ausbreittisch) benötigt wird. Der in dieser Arbeit entwickelte Ausbreitversuch für Gussasphalt wird im Kapitel 4.1.1 beschrieben.

4.1.1 PRÜFAUFBAU AUSBREITVERSUCH GUSSASPHALT

Für den Ausbreitversuch werden eine Ausbreitplatte und ein Ausbreittrichter benötigt. Die Ausbreitplatte mit einer Grundfläche von 700 mm mal 700 mm wird ausschließlich als statische Unterlage verwendet. Ein Anheben und Fallenlassen der Platte entfällt. Wie in Abbildung 20 (links) ersichtlich, wurden auf der Platte sowohl die Mitte als auch zwei Skalen zur Bestimmung des Höchstausbreitmaßes eingezeichnet. Die Höchstausbreitmaße d_1 und d_2

werden gemäß Abbildung 20 (mittig) in zwei Richtungen parallel zu den Kanten durch Anlegen von zwei Holzlatten, mit einer Genauigkeit von 0,5 cm, bestimmt. Auf die Verarbeitbarkeit wird durch das Ausbreitmaß f nach Formel 4 geschlossen. Das Ausbreitmaß von Gussasphalt wird mit einer Genauigkeit von 0,5 cm angegeben.

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Formel 4: Ausbreitmaß für Gussasphalt in cm

Dabei ist

d_1 größte Ausbreitung des Gussasphaltes in cm parallel zu einer Kante des Ausbreittisches

d_2 größte Ausbreitung des Gussasphaltes in cm parallel zur anderen Kante des Ausbreittisches

Der Ausbreittrichter gemäß Abbildung 20 (rechts) hat die Form eines Kegelstumpfes und ist aus Metall. Die Höhe sowie der untere Durchmesser betragen 200 mm und der obere Durchmesser beträgt 130 mm. Der Gussasphalt muss zügig in den Trichter eingefüllt werden um eine übermäßige Abkühlung des Gussasphaltes zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde an der kleineren Öffnung ein provisorischer Deckel montiert. Durch diese Adaption ist es möglich, den Trichter durch die größere Öffnung zu befüllen. Anschließend wird der Trichter umgedreht, die Befestigung des Deckels gelöst, die Aluminium-Unterlagsfolie entfernt und der Trichter gleichmäßig angehoben. Der genaue Ablauf des Ausbreitversuches wird im Kapitel 4.1.3 beschrieben.

In der Konzeptionsphase des Ausbreitversuches wurde auf die Innenseite des Ausbreittrichters ein hochtemperaturgeeignetes Laborfett (geeignet bis + 320 °C) aufgetragen. Trotzdem kam es ab einer Versuchstemperatur von 220 °C zu einem Anhaften des Gussasphaltes an der Innenseite des Ausbreittrichters. Dadurch floss der Gussasphalt nicht gleichmäßig bzw. unvollständig aus der Form und die Versuchsergebnisse wurden unbrauchbar. Durch die Verwendung eines Trennmittels (Wachs, hell, weich, mit Silikon) des Unternehmens Technotrenn Trennmittel GmbH konnten die Versuche bis zur maximalen Prüftemperatur von 250 °C durchgeführt werden. Während die Ausbreitplatte unbehandelt blieb, wurde sowohl die Innenseite des Ausbreittrichters als auch die Oberseite der Unterlagsfolie gewachst.

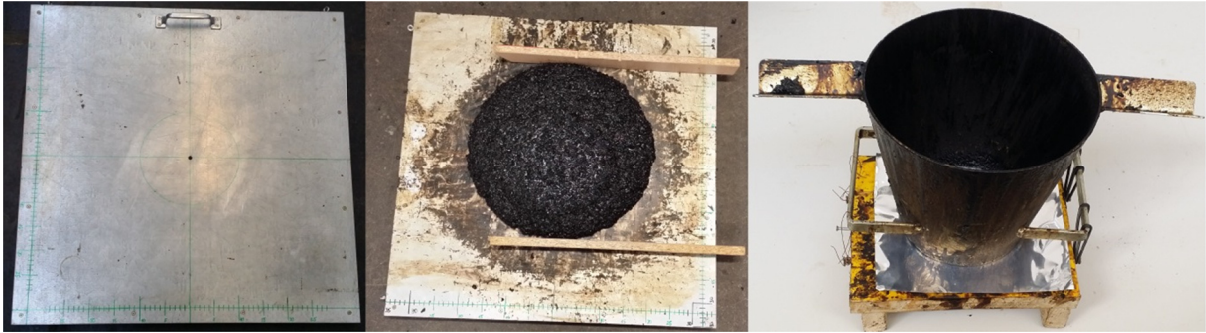


Abbildung 20: links: Ausbreitplatte, mittig: Messen des Höchstausbreitmaßes, rechts: Ausbreittrichter mit Deckel

4.1.2 PRÜFPROGRAMM AUSBREITVERSUCH

Bei den Ausbreitversuchen werden drei verschiedene Mischgüter miteinander verglichen. Ein konventionelles Kantkorn-Mischgut (MA8 90/10, M1, G1, KE36), ein Rundkorn-Mischgut (Bezeichnung: MA8 90/10, M1, G1, KE36, RK) und ein weiteres Rundkorn-Mischgut mit dem Modifizierungsadditiv Licomont (MA8 90/10, M1, G1, KE36, RK + 3% L.). Es wird erwartet, dass das Ausbreitmaß des KK-Mischgutes am geringsten ist und das Ausbreitmaß des Mischgutes mit Licomont am größten ist. Die Ist-Sieblinien, die Soll-Sieblinien, die oberen und unteren Grenzsieblinien und die Einwaagen sind im Anhang angefügt. Die Soll-Sieblinie wurde vom Mischguthersteller (Teerag-Asdag AG) zur Verfügung gestellt. Mit der Ist-Sieblinie wurde im Labor versucht, die Rezeptur so nahe wie möglich an die Soll-Sieblinie anzupassen. Die Grenzsieblinien sind definiert in der RVS 15.03.15.

Die Versuche wurden bei vier verschiedenen Versuchstemperaturen durchgeführt. Dafür wurden die Mischgüter sowie der Labormischer auf 180 °C, 200 °C, 220 °C und 240 °C temperiert. Da der Gegenlaufzwangsmischer die Temperatur im Inneren des Mischgutes mit einer Temperaturmesslanze misst, aber das Mischgut von außen erwärmt wird, ist die reale Prüftemperatur um rund 10 °C höher. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit immer von einer Versuchstemperatur von 190 °C, 210 °C, 230 °C oder 250 °C gesprochen.

4.1.3 PRÜFABLAUF AUSBREITVERSUCH GUSSASPHALT

Vor dem Mischen des Gussasphaltemischgutes werden die Gesteinskörnungen sowie der Füller für fünf Stunden und das Bitumen für drei Stunden mittels einer Wärmekammer auf die Prüftemperatur erwärmt. Nachdem der Gegenlaufzwangsmischer auf die Versuchstemperatur temperiert worden ist, werden die Gesteinskörnungen für 40 Sekunden homogenisiert. Anschließend wird das Bitumen hinzugegeben und die Gussasphaltkomponenten für weitere 300 Sekunden gemischt. Durch die abgerundeten Ecken der Mischtrommel sammeln sich beim ersten Mischvorgang Feinanteile in den Ecken an. Aus diesem Grund wird beim ersten

4 PRÜFPROGRAMM

Mischvorgang der Füller mit einer Spachtel aus den Rändern gekratzt, der Labormischer erneut auf Prüftemperatur aufgeheizt und der fünfminütige Mischvorgang wiederholt.

Der Ausbreittrichter befindet sich neben der Ausbreitplatte und wird mit zwei Schaufeln Gussasphalt ungefähr zur Hälfte befüllt. Anschließend wird der Gussasphalt mit einer Holzlatte vorsichtig verdichtet. Danach wird der Trichter bis zum Rand angefüllt und überschüssiges Mischgut mit einer Latte abgezogen. Der Trichter wird schnell umgedreht und mittig auf der Ausbreitplatte positioniert. Nach dem Lösen des Deckels wird die Unterlagsfolie entfernt und der Trichter gleichmäßig angehoben. Wenn das Mischgut gleichmäßig aus dem Trichter ausfließt, wird nach 90 Sekunden das Höchstaubreitmaß in zwei Richtungen parallel zu den Kanten der Ausbreitplatte gemessen. Sollte das Mischgut nicht gleichmäßig aus dem Trichter ausfließen, so ist der Versuch zu wiederholen.

Nach dem Ermitteln der Höchstaubreitmaße wird das Gussasphaltnischgut zurück in den Labormischer gegeben und der Gegenlaufmischer erneut auf die Prüftemperatur temperiert. Nach einem weiteren Mischvorgang mit einer Dauer von 300 Sekunden kann der zweite bzw. der dritte Ausbreitversuch durchgeführt werden. Für jedes Mischgut wird eine Dreifachbestimmung durchgeführt.

4.2 TIEFTEMPERATURVERHALTEN VON GEALTERTEM GUSS- ASPHALT

Die zweite Aufgabenstellung war festzustellen, ob sich eine geringere Herstellungstemperatur positiv auf die Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen auswirkt. Zu diesem Zweck wurde das Bitumen (Laborcode: B569A) mit dem RTFOT-Verfahren bei 190 °C bzw. 240 °C kurzzeitgealtert. Auf eine Langzeitalterung wurde verzichtet, um das Bitumen nicht so stark zu altern, dass kein Unterschied mehr im Tieftemperaturverhalten feststellbar wäre. Mit dem gealterten Bitumen wurden zwei Gussasphaltplatten hergestellt aus denen die Probekörper gewonnen wurden. Diese Probekörper wurden anschließend mit dem Abkühlversuch (TSRST) geprüft.

Zusammengefasster Prüfablauf:

- (1) Kurzzeitalterung des Bitumens mit dem RTFOT-Verfahren mit 190 °C bzw. mit 240 °C
- (2) Herstellen von Gussasphaltplatten mit einer Herstellungstemperatur von 210 °C (kurzzeitgealtertes Bitumen: 190 °C bzw. 240 °C)
- (3) Schneiden von Probekörpern aus den Gussasphaltplatten
- (4) Prüfen der Probekörper mit dem Abkühlversuch

5 ERGEBNISSE

5.1 GUSSASPHALT-AUSBREITVERSUCH

In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der einzelnen Ausbreitversuche als Punkte (rot, blau, grün) dargestellt. Die farbigen Linien sind die Regressionsgeraden und stellen somit die grafische Darstellung der linearen Regression dar. Im Bereich von 160 °C bis 190 °C wurden diese Regressionsgeraden linear erweitert. Das KK-Referenzmischgut verhielt sich bei einer Prüftemperatur von 190 °C wie erwartet sehr plastisch und breitete sich nur sehr langsam aus. Das RK Mischgut mit 3% Licomont verhielt sich hingegen bei hohen Temperaturen stark niedrigviskos.

Das KK-Referenzmischgut erreicht bei einer Prüftemperatur von 230 °C ein Ausbreitmaß von 37,6 cm auf der Regressionsgeraden. Nun kann überprüft werden bei welcher Temperatur dieses Ausbreitmaß bei einem RK-Mischgut und bei einem RK-Mischgut mit 3% Licomont auftritt. Dasselbe Ausbreitmaß (orange Dreiecke) tritt bei einem RK-Mischgut bei 174 °C und bei einem RK-Mischgut mit 3% Licomont bei 161 °C auf. Bei einer Prüftemperatur von 250 °C erreicht das KK-Referenzmischgut ein Ausbreitmaß von 41,6 cm auf der Regressionsgeraden. Dasselbe Ausbreitmaß (orange Rechtecke) wird bei einem RK-Mischgut bei 204 °C und bei einem RK-Mischgut mit 3% Licomont bei 183 °C erzielt. Unter der Annahme, dass die Verarbeitbarkeit mit der Regressionsgerade des Ausbreitmaßes korreliert und unterschiedliche Mischgüter beim selben Ausbreitmaß die gleiche Verarbeitbarkeit aufweisen, wird die mögliche Temperaturabsenkung in Tabelle 7 angegeben. Die vollständigen Versuchsergebnisse sind im Anhang ersichtlich.

Um zu kontrollieren ob ein Mischgut die richtige Verarbeitungstemperatur hat, ist es erforderlich zu wissen, um wie viel sich das Ausbreitmaß verändert falls die reale Mischguttemperatur von der gewollten Einbautemperatur abweicht. Bezogen auf die Regressionsgerade führt eine Abweichung um ± 10 °C von der Prüftemperatur zu einer Änderung des Ausbreitmaßes von $\pm 2,0$ cm bei einem KK-Mischgut, zu einer Änderung des Ausbreitmaßes um $\pm 1,3$ cm bei einem RK-Mischgut und zu einer Änderung des Ausbreitmaßes von $\pm 1,9$ cm bei einem RK-Mischgut mit 3% Licomont. Zur Berechnung der Ausbreitmaßänderungen sind die Geradengleichung aus Abbildung 21 verwendet worden.

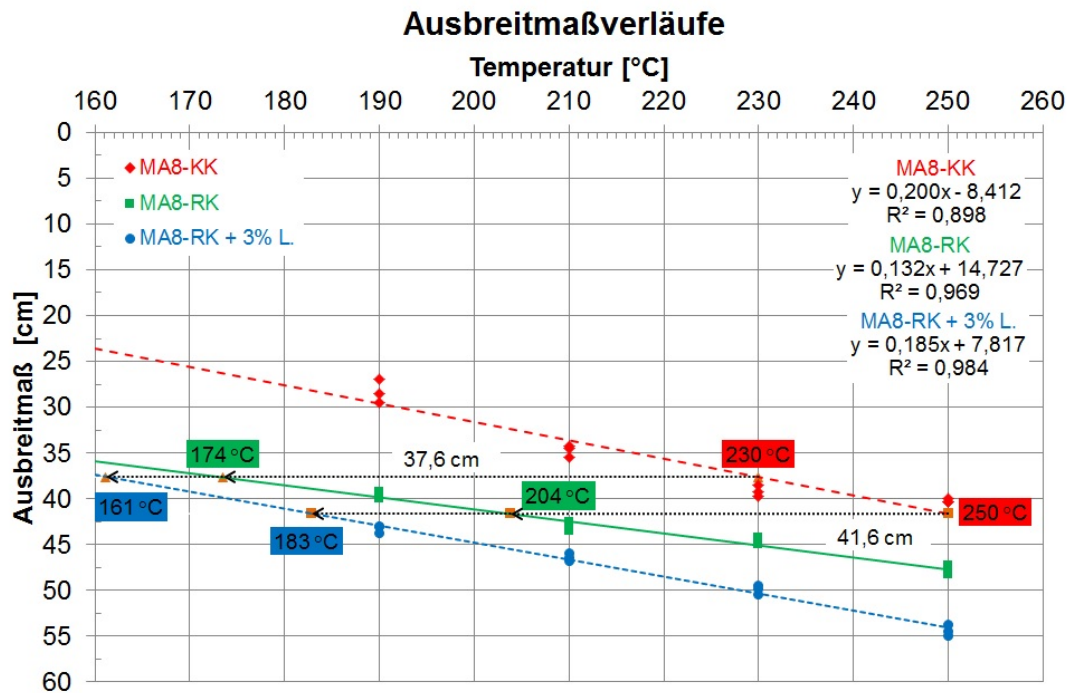


Abbildung 21: Ausbreitmaßverläufe der Gussasphaltnischgüter

Zum Vergleich wurden in Abbildung 22 die Drehmomentenverläufe von zwei KK-Referenzmischgütern, zwei RK-Mischgütern und einem RK-Mischgut mit 3% Licomont dargestellt. Die einzelnen Punkte stellen Temperaturen dar, bei denen mindestens zwanzig Mal das Drehmoment gemessen wurde. Die farbigen Linien sind erneut die Regressionsgeraden. Auffällig ist jedoch, dass sich bei der Drehmomentmessung die Regressionsgeraden des KK-Referenzmischgutes und des RK-Mischgutes bei einer Temperatur von rund 194 °C schneiden. Dies tritt beim Ausbreitversuch nicht auf, da dort die Regressionsgerade des RK-Mischgutes viel flacher verläuft.

Die mögliche Temperaturabsenkung wird wie folgt ermittelt. Im ersten Schritt wird für jede Mischgutsorte, die mehrmals geprüft wurde eine gemittelte lineare Regression (MW) berechnet. Mithilfe der mittleren linearen Regression ergibt sich, dass zum Mischen das KK-Referenzmischgut, bei einer Temperatur von 230 °C, ein Drehmoment von 21,8 Nm benötigt wird. Das RK-Mischgut benötigt das gleiche Drehmoment (21,8 Nm) bei einer Temperatur von 203,6 °C und das RK-Mischgut mit 3% Licomont weist dies bei einer Temperatur von 152,82 °C auf. Unter der Annahme dass die Verarbeitbarkeit mit der Regressionsgerade des Drehmomentes korreliert und unterschiedliche Mischgüter beim selben Drehmoment die gleiche Verarbeitbarkeit aufweisen, kann die mögliche Temperaturabsenkung in Tabelle 7 angegeben werden.

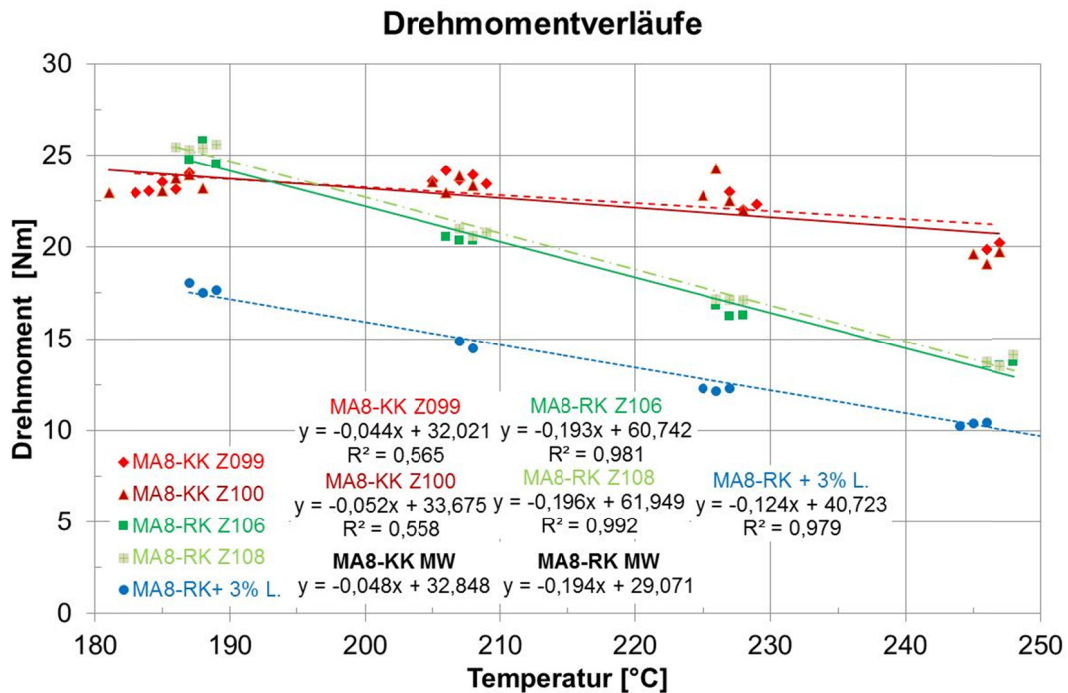


Abbildung 22: Drehmomentverläufe der Gussasphaltmischgüter

Tabelle 7: Mögliche Temperaturabsenkung ermittelt durch Ausbreitversuchen bzw. Drehmomentmessungen

Mögliche Temperaturabsenkung bezogen auf das KK-Mischgut bei 230 °C				
	Ausbreitversuch		Drehmomentenmessung	
Mischgut	Rundkorn	Rundkorn + 3% L.	Rundkorn	Rundkorn + 3% L.
Absenkung um °C	56,5	68,9	26,4	77,2
Einbautemperatur in °C	173,5	161,1	203,6	152,8
Mögliche Temperaturabsenkung bezogen auf das KK-Mischgut bei 250°C				
Mischgut	Rundkorn	Rundkorn + 3% L.		
Absenkung um °C	46,2	67,2		
Einbautemperatur in °C	203,8	182,8		

Siehe Kapitel 5.1 für eine Interpretation der, in der Tabelle 7, angegebenen Temperaturabsenkungen.

In Abbildung 23 ist die Korrelation zwischen den Drehmomenten und den Ausbreitmaßen bei Herstellungstemperaturen von rund 190 °C, 210 °C, 230 °C und 250°C dargestellt. Wie im Kapitel 3.1.2.2 erläutert, werden bei der Auswertung der Drehmomentmessung nur die Temperaturen berücksichtigt, für die mindestens zwanzig Drehmomentmesswerte aufgezeichnet worden sind. Im Anhang sind sowohl die Ergebnisse der Drehmomentmessungen als auch die in Abbildung 23 verwendeten Daten ersichtlich.

5 ERGEBNISSE

Für die Korrelationsdarstellung wurden auf der x-Achse die Mittelwerte aller Drehmomentmessungen, die maximal um 5 °C von der Herstellungstemperatur abweichen, verwendet. So wurde beim Kantkorn-Mischgut und einer Herstellungstemperatur von 190°C vom Versuch Z099 die Drehmomentmesswerte bei einer Temperatur von 185 °C, 186 °C sowie 187 °C und vom Versuch Z100 die Drehmomentmesswerte bei einer Temperatur von 185 °C, 186 °C, 187 °C sowie 188 °C gemittelt. Bei den Ausbreitmaßen (y-Achse) wurden die Mittelwerte der drei Einzelversuche (siehe Anhang) verwendet.

Wie in Abbildung 23 ersichtlich zeigen Drehmoment und Ausbreitmaß bei einem Rundkornmischgut mit und ohne Licomont annähernd lineare Regression. Diese ist beim Kantkornmischgut nicht zu beobachten. Beim Kantkornmischgut steigen die Ausbreitmaße bei einer Temperatur zwischen 190 °C bis 230 °C sehr stark an, während die Drehmomente kaum absinken. Ab 230 °C steigt dann beim Kantkornmischgut das Ausbreitmaß kaum mehr an, während das Drehmoment stark absinkt.

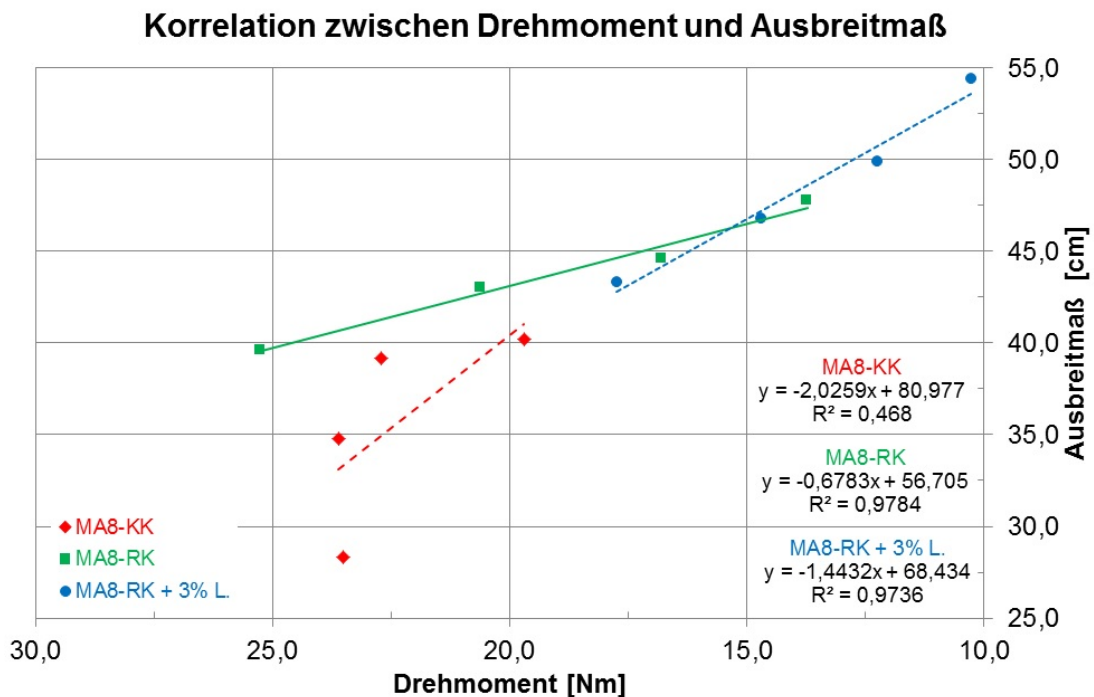


Abbildung 23: Korrelation zwischen Drehmomentmessung und Ausbreitversuch

5.2 ERGEBNISSE ABKÜHLVERSUCHE NACH EN 12697-46

Die gemittelten kryogenen Spannungsverläufe mit Schwankungsbreiten für die gealterten Mischgüter sind in Abbildung 24 dargestellt. In Abbildung 25 können die gemittelten kryogenen Spannungsverläufe der gealterten Mischgüter mit den nichtgealterten Mischgütern verglichen werden. Die Bruchspannungen sowie die Bruchtemperaturen sind für alle Mischgüter in Abbildung 26 angegeben. Im Anhang sind alle Spannungsverläufe der einzelnen Mischgü-

5 ERGEBNISSE

ter und die Prüfergebnisse ersichtlich. Für jedes Mischgut wurde eine Dreifachbestimmung durchgeführt.

Das gealterte Kantkorn-Mischgut versagte im Durchschnitt bei einer Ausfalltemperatur von $-13,5\text{ °C}$ mit einer kryogenen Spannung von $3,5\text{ N/mm}^2$, während das gealterte Rundkorn-Mischgut bei einer Ausfalltemperatur von $-16,2\text{ °C}$ mit einer kryogenen Spannung von $3,1\text{ N/mm}^2$ versagte. Nach EN 13108-6 [24] erzielt das RK-Mischgut die Bruchtemperaturkategorie von -15 °C und das KK-Mischgut kann nur die Kategorie „keine Anforderung“ erfüllen.

Bei einem Vergleich zwischen den Spannungsverläufen erkennt man, dass das RK-Mischgut einen progressiveren Verlauf als das KK-Mischgut aufweist. Das nichtgealterte KK-Mischgut versagte im Durchschnitt bei einer Ausfalltemperatur von $-27,6\text{ °C}$ mit einer kryogenen Spannung von $5,1\text{ N/mm}^2$, während das nichtgealterte RK-Mischgut bei einer Ausfalltemperatur von $-28,0\text{ °C}$ mit einer kryogenen Spannung von $4,9\text{ N/mm}^2$ versagt. Beide nichtgealterten Mischgüter erzielen gemäß [24] die zweitbeste Bruchtemperaturkategorie von $-27,5\text{ °C}$.

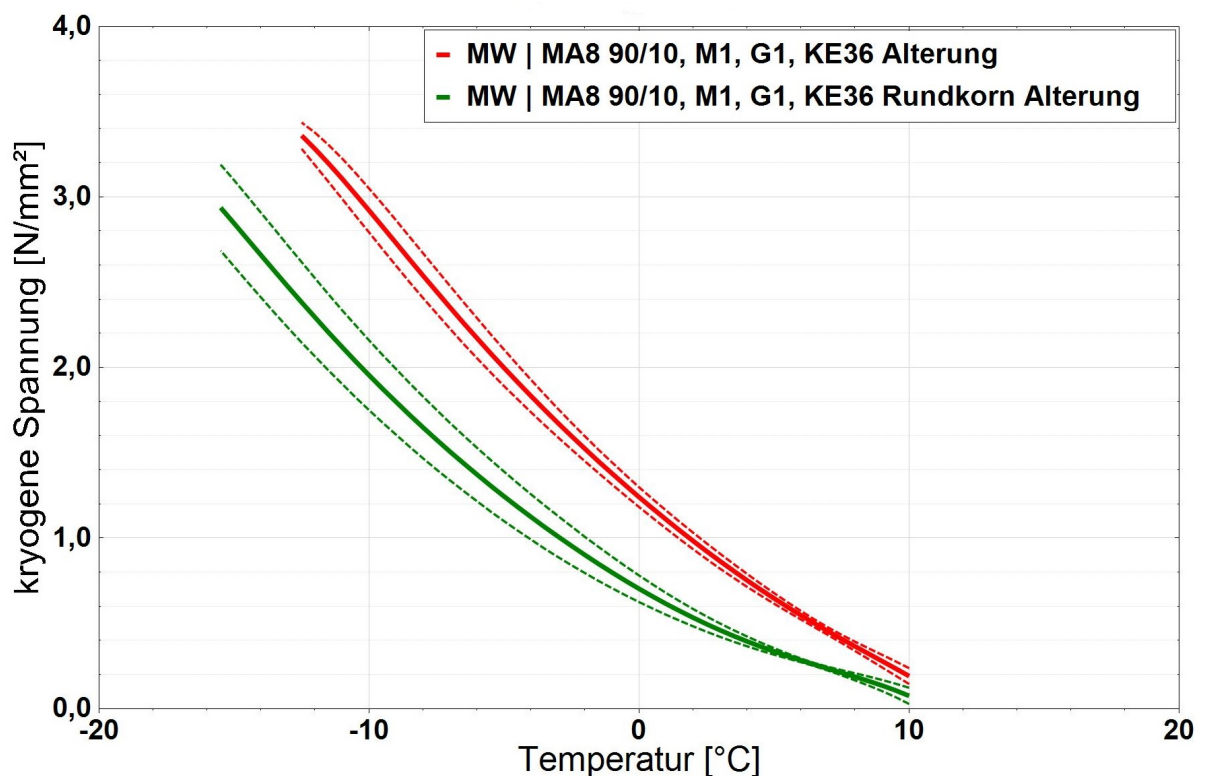


Abbildung 24: Gemittelte Spannungsverläufe inkl. Schwankungsbreiten der gealterten Mischgüter

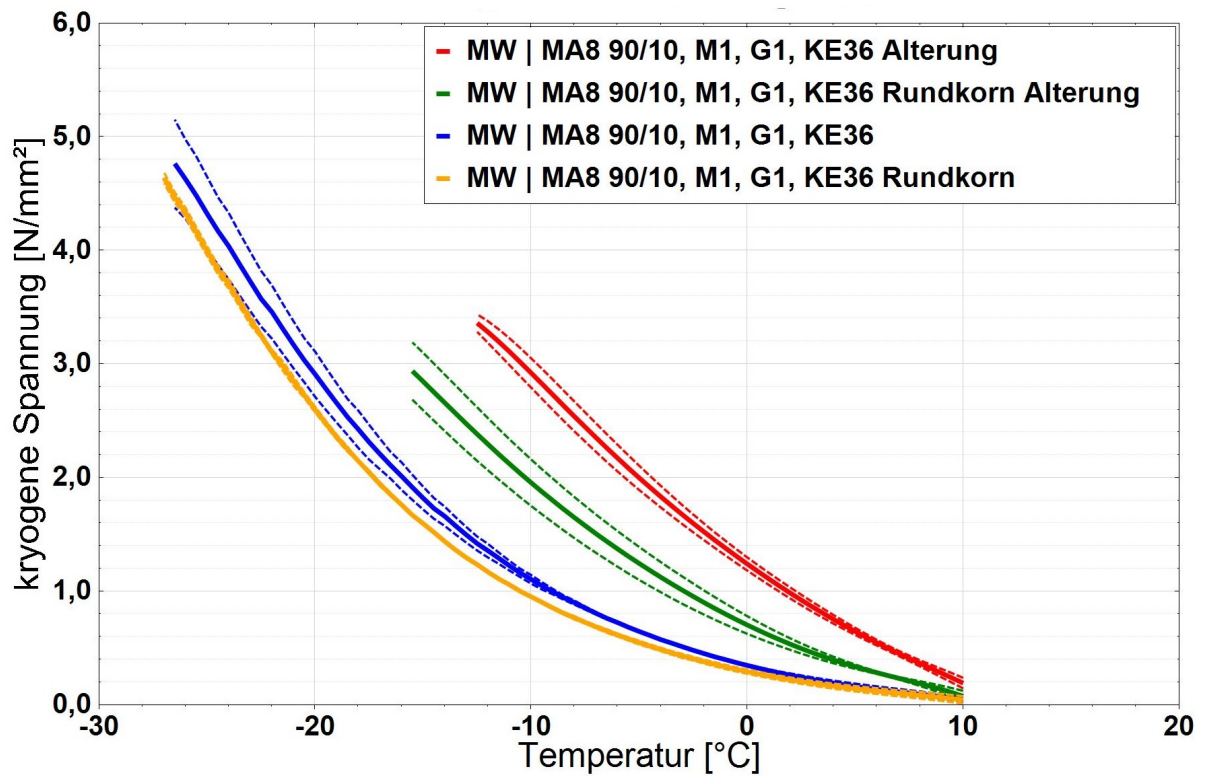


Abbildung 25: Gemittelte Spannungsverläufe inkl. Schwankungsbreiten aller Mischgüter

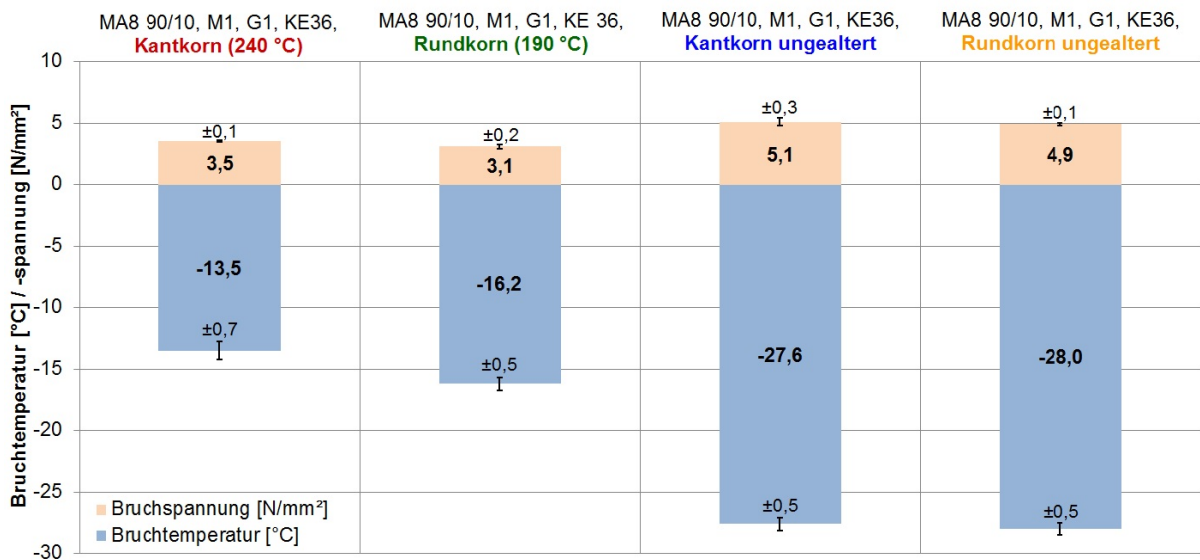


Abbildung 26: Bruchtemperaturen und Bruchspannungen aller Mischgüter

6 INTERPRETATION

6.1 INTERPRETATION DES AUSBREITMAßES

Als allererstes sollte klargelegt werden, dass im Laborbetrieb die notwendige Einbautemperatur eines temperaturabgesenkten Mischgutes nicht allein durch das erforderliche Drehmoment bestimmt wird. Wie im Kapitel 2.1.5 erwähnt, kommt es bei höheren Temperaturen zu einer stärkeren Alterung des Bitumens. Durch eine stärkere Alterung wird das Bitumen steifer und spröder und der Gussasphalt wird einen höheren Widerstand gegen Spurrinnenbildung zeigen. Ein Mischgut mit einer zu geringen Herstellungstemperatur wird in der TCCT-Prüfung (Kapitel 2.3.2.2) oder der einaxialen Druckschwellenprüfung (UCCT) eine zu große Verformung erleiden. Im Laborbetrieb wird für ein neu konzipiertes Mischgut zuerst mit der Drehmomentmessung eine „scheinbar“ optimale Herstellungstemperatur gesucht. Anschließend werden mit dieser Temperatur Gussasphaltplatten hergestellt, Probekörper gewonnen und UCCT-Prüfungen durchgeführt. Nur wenn die Verformungen bei hohen Temperaturen in einem akzeptablen Bereich sind, werden weitere GVO-Prüfungen durchgeführt. Außerdem sollte erwähnt werden, dass die Drehmomentmessung nur eine grobe Simulation der Vorgänge des Einbaus darstellt. Alle entwickelten temperaturabgesenkten Mischgüter werden durch eine Einbaupartie in einem Probefeld eingebaut, um festzustellen ab welcher Temperatur man diese gut verstreichen kann. Erfahrungsgemäß kommt es bei Mischgütern mit Modifizierungsadditiven zu einer Überschätzung der möglichen Temperaturabsenkung. Wie in Tabelle 7 ersichtlich sollte das Rundkorn Mischgut mit 3% Licomont mit einer Temperatur von 152,8 °C eingebaut werden können. In der Realität wird dieses Mischgut von einer Einbaupartie erst bei einer Temperatur von rund 190 °C als gut verstreichbar eingestuft. Konventionelles Kantkornmischgut wird in Österreich immer noch bei einer Temperatur von rund 250 °C eingebaut. Mit dem Ausbreitversuch würde, bei einem Vergleich mit einem KK-Mischgut mit 250 °C, das RK-Mischgut mit 3% Licomont erst bei einer Temperatur von mindestens 182,8 °C eingebaut werden dürfen. Dafür überschätzt der Ausbreitversuch mit 46,2 °C die mögliche Temperaturabsenkung, bei der ein RK-Mischgutes noch gut eingebaut werden kann.

Während des ganzen Prüfprogramms mussten weder die Arbeitsplatte noch der Ausbreittrichter gereinigt werden. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Ausbreitplatte, bedingt durch die hohen Temperaturen, nach dem ersten Versuch leicht nach oben biegt. Dennoch wiesen die Einzelversuche meistens nur Streuungen von rund 1 cm auf. Die Messgenauigkeit der Ausbreitmaße könnte durch die Verwendungen von Winkel (anstatt Holzplatten) noch weiter erhöht werden, da dadurch immer ein rechter Winkel zum Plattenrand gewährleistet

werden kann. Bei 250 °C wurde für das Kantkorn-Referenzmischgut der Prüfablauf mit einem neu gemischten Mischgut wiederholt, um die Wiederholbarkeit des Versuches feststellen zu können. Die Abweichung der beiden gemittelten Ausbreitmaße (jeweils 3 Einzelversuch) betrug nur 0,3 cm.

Wie in Abbildung 21 ersichtlich ist, steigen die Ausbreitmaße bei einem Anstieg der Temperatur annähernd linear. Ein Abfallen des Anstieges bei sehr hohen Temperaturen konnte nicht festgestellt werden. Die Linie der linearen Regression verläuft beim Kantkornmischgut und beim Rundkornmischgut mit Licomont annähernd parallel, während die Regressionsgerade des Rundkornmischgutes etwas flacher verläuft. Dass sich die Steigungen der linearen Regressionsgeraden ähneln, ist in einem Temperaturbereich von 190 °C bis 250 °C nachvollziehbar, da bei allen drei Mischgutsorten sowohl die gleiche Bitumensorte als auch der gleiche massenprozentuale Anteil an Bitumen (Einwaage) verwendet worden sind.

Wie in Abbildung 23 ersichtlich, ergibt sich eine gute lineare Regression zwischen Ausbreitmaß und Drehmoment für das Rundkornmischgut, nicht jedoch für das Kantkornmischgut. Der annähernd lineare Anstieg liegt höchstwahrscheinlich an der geringeren Verzahnung der Rundkörner beim Mischen im Gegenlaufzwangswischer.

6.2 INTERPRETATION DER TSRST-ERGEBNISSE

Das laborgealterte Kantkorn-Mischgut erzielte mit einer Bruchtemperatur von -13,5 C, nur rund 50% der ursprünglich ertragbaren Temperatur von -27,6 °C und das laborgealterte Rundkorn-Mischgut erzielte mit einer Bruchtemperatur von -16,2 C, nur rund 60% der ursprünglich ertragbaren Temperatur von -28,0 °C. Dieser Abfall ist weitaus stärker als erwartet. Es scheint, dass bei der RTFOT-Alterung die hohe Temperatur, in Kombination mit der langen Prüfdauer, zu stark war und beide Bitumen extrem gealtert wurden. Dies ist auch eine Erklärung für die geringe Bruchtemperaturdifferenz der gealterten Mischgüter von nur 2,7 °C. Das bei 240 °C gealterte Bitumen konnte trotz einer mehrtägigen Lagerung in Toluol nur mehr äußerst schwer aus den RTFOT-Glasflaschen entfernt werden. Aus herstellungstechnischen Gründen wurde das bei 190 °C kurzzeitgealterte Bitumen bei 210 °C zu Gussasphalt verarbeitet. Der Einfluss dieser geringfügig höheren Herstellungstemperatur von 20 °C war aufgrund der übermäßigen Kurzzeitalterung wahrscheinlich vernachlässigbar. Trotzdem ist erkennbar, dass eine höhere Verarbeitungstemperatur einen negativen Einfluss auf die Tieftemperaturbeständigkeit hat. Es ist bei KK-Mischgut nicht nur die Bruchtemperatur höher, sondern auch der Spannungsverlauf ungünstiger. Im Anhang ist ersichtlich, dass beide nichtgealterten Mischgüter einen progressiv ansteigenden Spannungsverlauf aufweisen. Dies ist bedingt durch eine höhere Zugfestigkeitsreserve (siehe Kapitel 2.3.2.2) vorteilhaft.

6 INTERPRETATION

Während das kurzzeitgealterte RK-Mischgut zumindest noch einen leicht progressiven Anstieg besitzt, ist dieser beim KK-Mischgut annähernd linear.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit ist im Rahmen des Forschungsprojekt „iMAS (Innovative Mastic Asphalt): Innovativer Gussasphalt zur Energie- und Emissionseinsparung“ entstanden. Ein Ziel war die Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Dieses Ziel wurde durch die Entwicklung eines modifizierten Ausbreitversuches erreicht. Die Streuungen der Einzelversuche sind im akzeptablen Rahmen, die Wiederholbarkeit der Ergebnisse ist gegeben. Selbstverständlich sollte die Wiederholbarkeit noch mit einer größeren Anzahl von Mischgütern kontrolliert werden. Sowohl der Aufbau als auch die Durchführung kann schnell und einfach direkt am Einbauort erfolgen. Eine Reinigung mit Toluol muss nur sehr selten erfolgen. Während der Durchführung von 39 Einzelversuchen musste weder der Ausbreittrichter noch die Ausbreitplatte gereinigt werden. Mit diesem Prüfverfahren kann die gleichbleibende Verarbeitungsqualität des angelieferten Gussasphaltes direkt am Einbauort geprüft werden und alle Beteiligten werden unabhängiger von den subjektiven Empfindungen der Einbaupartie. Der Versuchsaufbau könnte noch weiter verbessert werden durch eine bessere Konstruktion der Deckelkonstruktion des Ausbreittrichters, Messwinkel, die beim Abmessen der Ausbreitmaße einen rechten Winkel zu den Plattenrändern gewährleisten oder durch die Verwendung einer Ausbreitplatte, die sich bei hohen Temperaturen nicht aufbiegt. Unter Umständen könnte das Aufbiegen der Ausbreitplatte während dem Ausbreitversuch durch die Verwendung eines hochtemperaturgeeigneten Materials mit geringerem Wärmeausdehnungskoeffizient reduziert werden.

Nachdem jetzt im Labor als Erstprüfung mehrere Ausbreitmaße von verschiedenen Mischgütern ermittelt worden sind, sollte im nächsten Schritt Ausbreitversuche an den großtechnischen Mischgütern direkt an der Mischanlage durchgeführt werden. Dadurch wird überprüft, ob sich die Ausbreitmaße der großtechnischen Mischgüter von den Ausbreitmaßen der Labormischgüter unterscheiden und ob die berechneten Veränderungen des Ausbreitmaßes bei einer Temperaturabweichung (siehe Kapitel 5.1) gültig sind. Das zukünftige Ziel muss es sein, nicht nur das „ideale“ Ausbreitmaß je Herstellungstemperatur angeben zu können, sondern auch eine zulässige Temperaturabweichung zu definieren, bei welcher ein Mischgut vorbehaltlos eingebaut werden darf.

Das zweite Ziel war die Prüfung, ob eine höhere Gussasphalt-Produktionstemperatur einen Einfluss auf die Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen hat. Mit dem Abkühlversuch (TSRST) konnte gezeigt werden, dass sich eine höhere Herstellungstemperatur sowohl negativ auf die ertragbare Temperatur als auch auf die Form des Spannungsverlaufs auswirkt. Die mit dem RTFOT-Verfahren simulierte Kurzzeitalterung kann als sehr aggressiv eingestuft

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

werden. Das Kantkorn-Mischgut wurde mit einem bei 240 °C gealterten Bitumen und das Rundkorn-Mischgut mit einem bei 190 °C gealterten Bitumen hergestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Bruchtemperaturen betrug nur 2,7 °C. Für zukünftige Versuche wäre es vorteilhaft ein weniger aggressives Alterungsverfahren zu verwenden.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **ÖNORM EN 12597**: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie. Austrian Standards, Wien, 09.2014.
- [2] **GESTRATA - Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt (Hrsg.)**: Asphalt Handbuch. bcom Advertising GmbH, Wien, 2010.
- [3] **Neroth, G.; Vollenschaar, D.**: Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [4] **"Wikipedia"**: [Online]. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bitumen> (Abruf: 06.08.2016).
- [5] **Günter Piringer**: Gussasphalt – ein hochwertiger Baustoff.
<http://www.gestrata.at/publikationen/archiv-journal-beitrag/gestrata-journal-140/gussasphalt-ein-hochwertiger-baustoff> (Abruf: 06.08.2016).
- [6] **Manfred N. Partl**: Vorlesung: Asphalt und Bitumen.
http://www.ifb.ethz.ch/education/bachelor_werkstoffe1/2011FS/Werkstoffe1_Bitumen2011.pdf (Abruf: 06.08.2016).
- [7] **Bernhard Hofko**: Vorlesung: Baustoffe im Verkehrswegebau. TU Wien, 2016.
- [8] **Markus Hospodka**: Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor. Masterarbeit, BOKU, Institut für Verkehrswesen, Wien, 2013.
- [9] **Hans-Joachim Neumann**: Was ist Bitumen? Bitumen (1994), Heft 4.
- [10] **Bernhard Hofko; Markus Hospodka; Lukas Eberhardsteiner et al.**: Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt. Straße und Autobahn 2014, Heft 8.
- [11] **"Wikipedia"**: Kalkstein. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kalkstein> (Abruf: 08.08.2016).
- [12] **"Wikipedia"**: Dolomit (Gestein). [https://de.wikipedia.org/wiki/Dolomit_\(Gestein\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Dolomit_(Gestein)) (Abruf: 08.08.2016).
- [13] **"Wikipedia"**: Lamprophyr. <https://de.wikipedia.org/wiki/Lamprophyr> (Abruf: 08.08.2016).
- [14] **ÖNORM EN 13043**: Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen (konsolidierte Fassung). Austrian Standards, Wien, 15.02.2014.
- [15] **Ronald Blab; Lukas Eberhardsteiner**: Vorlesung: Konstruktiver Strassenbau. TU Wien, 2016.
- [16] **Krajcsir, A.**: Asphalt 2010 - Regelungen für Mischgut - Schicht.
<http://www.gestrata.at/publikationen/archiv-beitrag/gestrata-journal-128/asphalt-2010-regelungen-fur-mischgut-schicht> (Abruf: 16.04.2016).
- [17] **Scholz, W.; Hiese, W.; Möhring, R. et al. (Hrsg.)**: Baustoffkenntnis. Werner, Köln, 2011.
- [18] **Ammann Group**: Produkteübersicht Asphalt-Mischanlagen. Stationär, mobil und radmobil.
http://www.ammann-group.ro/fileadmin/ammann/syncfiles/CH/images/ammann_asphalt_mixing-plant_brochure_de.pdf (Abruf: 29.08.2016).
- [19] **ÖNORM B 3580-2**: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Asphaltbeton - Teil 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1. Austrian Standards, Wien, 15.08.2016.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [20] **ÖNORM B 3584-2:** Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Splittmastixasphalt - Teil 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen. Austrian Standards, Wien, 15.08.2016.
- [21] **ÖNORM EN 12697-46:** Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen. Austrian Standards, Wien, 01.08.2012.
- [22] **ÖNORM EN 12697-24:** Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. Austrian Standards, Wien, 15.07.2012.
- [23] **ÖNORM EN 12697-26:** Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit. Austrian Standards, Wien, 01.11.2012.
- [24] **ÖNORM EN 13108-6:** Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 6: Gussasphalt (konsolidierte Fassung). Austrian Standards, Wien, 01.05.2008.
- [25] **ÖNORM B 3585:** Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen -Gussasphalt - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-6. Austrian Standards, Wien, 15.08.2012.
- [26] **ÖNORM B 3638:** Technische Asphalte für den Straßenbau und verwandte Gebiete; Kugeleindruckprüfung von Gußasphalten. Austrian Standards, Wien, 01.01.1987.
- [27] **Gesprächskreis Bitumen:** Temperaturabgesenkte Asphalte.
<http://www.bgbau.de/gisbau/publikationen/brosch/downloads/BitumenBroschuere.pdf> (Abruf: 10.08.2016).
- [28] **Bernhard Hofko; Mariyan Dimitrov; Oliver Schwab et al.:** Endbericht zum Projekt "High Efficient Low Emission Mastic Asphalt". Bericht für Wirtschaftskammer Wien; Berichts-Nr. 14403_02 (2015).
- [29] **Bonzel, J.; Krell, J.:** Konsistenzprüfung von Frischbeton. Beton 34 (1984), Heft 3.
- [30] **ÖNORM EN 12350-5:** Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß. Austrian Standards, Wien, 15.07.2009.
- [31] **ÖNORM EN 12350-4:** Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß. Austrian Standards, Wien, 15.07.2009.
- [32] **ÖNORM EN 12350-2:** Prüfung von Frischbeton - Teil 2: Setzmaß. Austrian Standards, Wien, 15.07.2009.
- [33] **ÖNORM EN 12350-3:** Prüfung von Frischbeton - Teil 3: Vebe-Prüfung. Austrian Standards, Wien, 15.07.2009.
- [34] **ÖNORM EN 206:** Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Austrian Standards, Wien, 01.07.2014.
- [35] **Hückelheim, A.:** Ausbreitversuch. <https://de.wikipedia.org/wiki/Ausbreitversuch> (Abruf: 24.02.2016).
- [36] **Biscopig, M.; Richter, T.:** Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen. Zement-Merkblatt Beton-technik B4. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2013.
- [37] **Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.:** Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften. Ernst, Berlin, 2001.
- [38] **Werse, H. P.:** Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch eine Auslaufzeit. Beton 22 (1972), Heft 10.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [39] **Rychner, G. A.:** Die Betonsonde, ein neues Gerät zu Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Beton. Schweizerische Bauzeitung 67 (1949), Heft 33.
- [40] **ÖNORM EN 1015-3:** Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch) (konsolidierte Fassung). Austrian Standards, Wien, 01.03.2007.
- [41] **Sikinger, T.:** Untersuchungen zum maximalen Verformungswiderstand ohne Rissbildung von hochstandfestem Gussasphalt bei Einsatz verschiedener Bitumenarten und Bitumenadditiven. Diplomarbeit an der FHS Köln, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2000.
- [42] **Sikinger, T.; Simmleit, N.; Mertens, N. et al.:** Einfaches Verfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Bitumen 63 (2001), Heft 4.
- [43] **Wagner, M.:** Temperaturabgesenkte Asphalte gebrauchsverhaltensorientierte Untersuchungen an Bitumen und Asphalten. Dissertation an der TU Wien, Wien, 2010.
- [44] **Litzka, J.; Strobl, F.; Pass, F. et al.:** Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. ISTU - Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Wien, 1998.
- [45] **ÖNORM EN 12607-1:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren. Austrian Standards, Wien, 15.12.2014.
- [46] **ÖNORM EN 14769:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV). Austrian Standards, Wien, 15.07.2012.
- [47] **ÖNORM EN 933-1:** Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren. Austrian Standards, Wien, 01.03.2012.

9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: links: Bitumen, rechts: Naturasphalt [4]	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bitumenherstellung [6]	4
Abbildung 3: links: Kreislauf des OH ⁻ Radikals [7], rechts: Eindringtiefen der Oxidationsmittel [10]	10
Abbildung 4: Schematischer Alterungsverlauf von Bitumen [7]	11
Abbildung 5: Black Move II mobile Asphaltmischanlage (Fa. Ammann) [18]	15
Abbildung 6: links: liegender Asphaltkocher, rechts: stehender Asphaltkocher	21
Abbildung 7: Händischer Einbau von Gussasphalt.....	21
Abbildung 8: Ausbreitversuch [35]	25
Abbildung 9: Beton im Behälter, vor und nach dem Verdichten [31]	26
Abbildung 10: Setzmaß [32]	27
Abbildung 11: links: Vebe-Zeit-Messgerät, rechts: zusammengefallenes Setzmaß [33].....	27
Abbildung 12: Prüfeinrichtung zur Ermittlung der Auslaufzeit nach Werse [37]	28
Abbildung 13: Betonsonde Durchmesser 20 mm [39]	28
Abbildung 14: Eignung- und Anwendungsbereiche der Konsistenzprüfverfahren [29].....	29
Abbildung 15: links: Rolling Thin Film Oven Test, rechts oben: Luftlanze und vertikale Flaschentrommel, rechts unten: RTFOT – Glasflaschen [8].....	33
Abbildung 16: links: Pressure Aging Vessel, mitte: Druckbehälter, rechts: Schalenhalter mit befüllten Schalen [8]	35
Abbildung 17: Siebturm	36
Abbildung 18: Gegenlaufzwangsmischer (links) und Wärmekammer (rechts)	38
Abbildung 19: Prüfgerät für TSRST und UTST.....	40
Abbildung 20: links: Ausbreitplatte, mittig: Messen des Höchstausbreitmaßes, rechts: Ausbreittrichter mit Deckel.....	44
Abbildung 21: Ausbreitmaßverläufe der Gussasphaltmischgüter	47
Abbildung 22: Drehmomentverläufe der Gussasphaltmischgüter	48
Abbildung 23: Korrelation zwischen Drehmomentmessung und Ausbreitversuch	49
Abbildung 24: Gemittelte Spannungsverläufe inkl. Schwankungsbreiten der gealterten Mischgüter	50
Abbildung 25: Gemittelte Spannungsverläufe inkl. Schwankungsbreiten aller Mischgüter .	51
Abbildung 26: Bruchtemperaturen und Bruchspannungen aller Mischgüter	51

10 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Wichtige Begriffsdefinitionen aus der EN 12597 zusammengestellt aus [1]	3
Tabelle 2: Alterungsverfahren für Kurz- und Langzeitalterung [8]	11
Tabelle 3: Anforderungen an den Füller für Asphalt nach EN 13043 zusammengestellt aus [14], [15].....	13
Tabelle 4: Anforderungen an grobe und feine Gesteinskörnungen für Asphalt nach EN 13043 zusammengestellt aus [14], [15].....	14
Tabelle 5: Idealisierte Modelle der strukturellen Lastabtragung nach [6].....	17
Tabelle 6: Erläuterung der Bestandteile einer in Österreich häufig benutzten Gussasphaltkennzeichnung [24], [25]	22
Tabelle 7: Mögliche Temperaturabsenkung ermittelt durch Ausbreitversuchen bzw. Drehmomentmessungen	48

11 FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Ausbreitmaß f in mm [30]	25
Formel 2: Verdichtungsmaß c [31].....	26
Formel 3: Summenverteilung in Prozent [47]	36
Formel 4: Ausbreitmaß für Gussasphalt in cm	43

12 ANHANG

Einwaage zur Asphalterzeugung

MA8 90/10, M1, G1, KE36 für Ausbreitversuch

MA8 90/10, M1, G1, KE36 mit kurzzeitgealtertem Bitumen bei 240 °C

Angaben zum Asphalt					
Laborcode	AS829	Asphaltsorte	MA8 90/10, M1, G1, KE36		
Ist-Rohdichte [g/cm ³]	2,407	Ziel-Hohlraumgehalt [V%]	0,0		
		Ziel-Raumdichte [g/cm ³]	2,407		
Angaben für die Probekörperherstellung					
Plattenummer	Verdichter	Dicke [cm]/ Anzahl [Stk]	Masse pro Platte [g]	Gesamtmasse [g]	
Z163	Freundl	5,0	15.646	15.646	
erforderliche Masse [g]				15.646	
aufgerundete Masse [g]				18.000	
Einwaage					
			Anteil [M%]	Masse [g]	
Bindemittel	Ziel-Bindemittelgehalt		8,90	1602,0	
	Einzuwägende Masse (Klebenbleiben am Mischer)			1637,2	
Zusatz	-		-	-	
Gestein	F037, G724, G725, G745		91,00	16380,0	
	Laborcode	Material	Masse-%	Soll [g]	Ist [g]
Bitumen	B529A	82% 90/10 B525A + 18% 70/100 B136A	8,90	1602,0	
Füller	F037	Kalksteinmehl	20,00	3600,00	
[0 - 2]	G745	Gaaden 0/2	39,00	7020,00	
[2 - 4]	G724	Loja 2/4	23,00	4140,00	
[4 - 8]	G725	Loja 4/8	9,00	1620,00	
Summe			99,90	17.982,0	

Einwaage zur Asphalterzeugung

MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn für Ausbreitversuch

MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn mit kurzzeitgealtertem Bitumen bei 190 °C

Angaben zum Asphalt					
Laborcode	AS828	Asphaltsorte	MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn		
Ist-Rohdichte [g/cm ³]	2,407	Ziel-Hohlraumgehalt [V%]	0,0		
		Ziel-Raumdichte [g/cm ³]	2,407		
Angaben für die Probekörperherstellung					
Plattenummer	Verdichter	Dicke [cm]/ Anzahl [Stk]	Masse pro Platte [g]	Gesamtmasse [g]	
T665	Freundl	5,0	15.646	15.646	
erforderliche Masse [g]				15.646	
aufgerundete Masse [g]				18.000	
Einwaage					
			Anteil [M%]	Masse [g]	
Bindemittel	Ziel-Bindemittelgehalt		8,90	1602,0	
	Einzuwägende Masse (Klebenbleiben am Mischer)			1637,2	
Zusatz	-		-	-	
Gestein	F037, G748, G750, G751		91,00	16380,0	
	Laborcode	Material	Masse-%	Soll [g]	Ist [g]
Bitumen	B529A	82% 90/10 B525A + 18% 70/100 B136A	8,90	1602,0	
Füller	F037	Kalksteinmehl	25,00	4500,00	
[0 - 2]	G750	Rundkorn Badenerstraße 0/2	28,00	5040,00	
[2 - 4]	G751	Rundkorn Badenerstraße 2/4	20,00	3600,00	
[4 - 8]	G748	Rundkorn Badenerstraße 4/8	18,00	3240,00	
Summe			99,90	17.982,0	

Einwaage zur Asphalterzeugung

MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn + 3% Licomont für Ausbreitversuch

Angaben zum Asphalt					
Laborcode	AS827	Asphaltsorte	MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn + 3% Licomont		
Ist-Rohdichte [g/cm ³]	2,400	Ziel-Hohlraumgehalt [V%]	0,0		
		Ziel-Raumdichte [g/cm ³]	2,400		
Angaben für die Probekörperherstellung					
Plattennummer	Verdichter	Dicke [cm]/ Anzahl [Stk]	Masse pro Platte [g]	Gesamtmasse [g]	
Z162	Freundl	5,0	15.600	15.600	
				erforderliche Masse [g]	15.600
				aufgerundete Masse [g]	18.000
Einwaage					
				Anteil [M%]	Masse [g]
Bindemittel	Ziel-Bindemittelgehalt			8,90	1602,0
	Einzuwägende Masse (Klebenbleiben am Mischer)				1637,2
Zusatz	-			-	-
Gestein	F037, G748, G750, G751			91,00	16380,0
	Laborcode	Material	Masse-%	Soll [g]	Ist [g]
Bitumen	B529A_03.0_S211	B529A + 3% S211 Licomont	8,90	1602,0	
Füller	F037	Kalksteinmehl	25,00	4500,00	
[0 - 2]	G750	Rundkorn Badenerstraße 0/2	28,00	5040,00	
[2 - 4]	G751	Rundkorn Badenerstraße 2/4	20,00	3600,00	
[4 - 8]	G748	Rundkorn Badenerstraße 4/8	18,00	3240,00	
Summe			99,90	17.982,0	

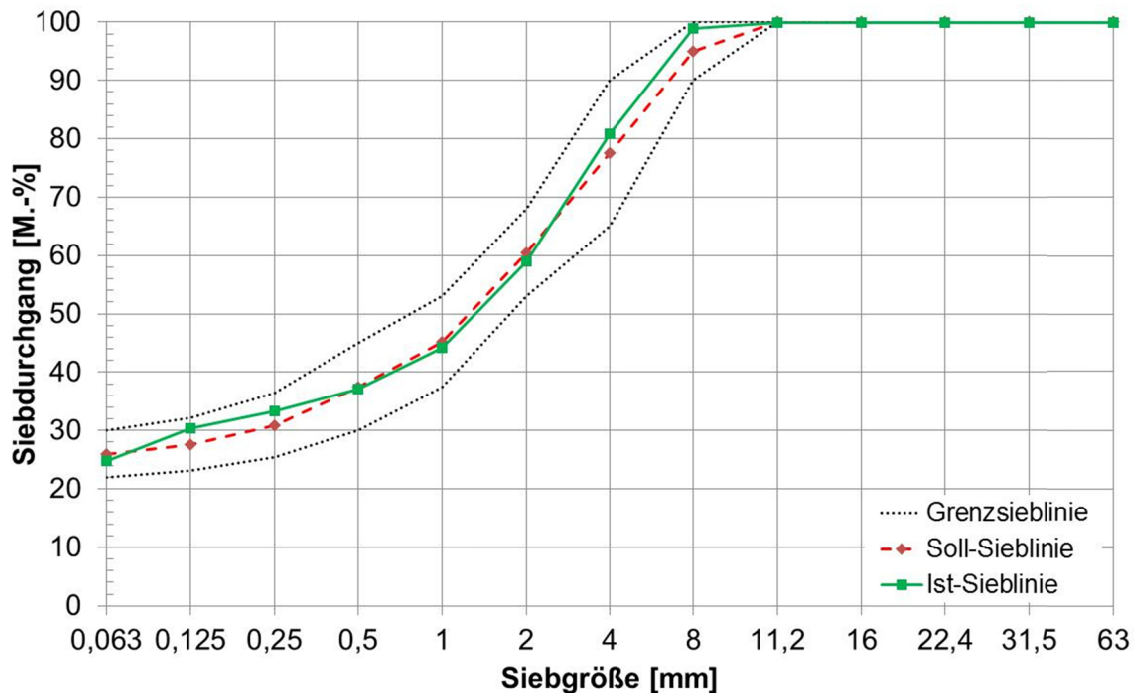
Zusammensetzung des Bitumens B529A

Bezeichnung	PEN mm/10	ERK °C	Anteil in M.-%
90/10	5 - 15	85 - 95	7,30
70/100	70 - 100	43 - 51	1,60
Summe des Bindemittelgehaltes für die Asphalteinwaage			8,90

Sieblinien

MA8 90/10, M1, G1, KE36 für Ausbreitversuch

MA8 90/10, M1, G1, KE36 mit kurzzeitgealtertem Bitumen bei 240 °C

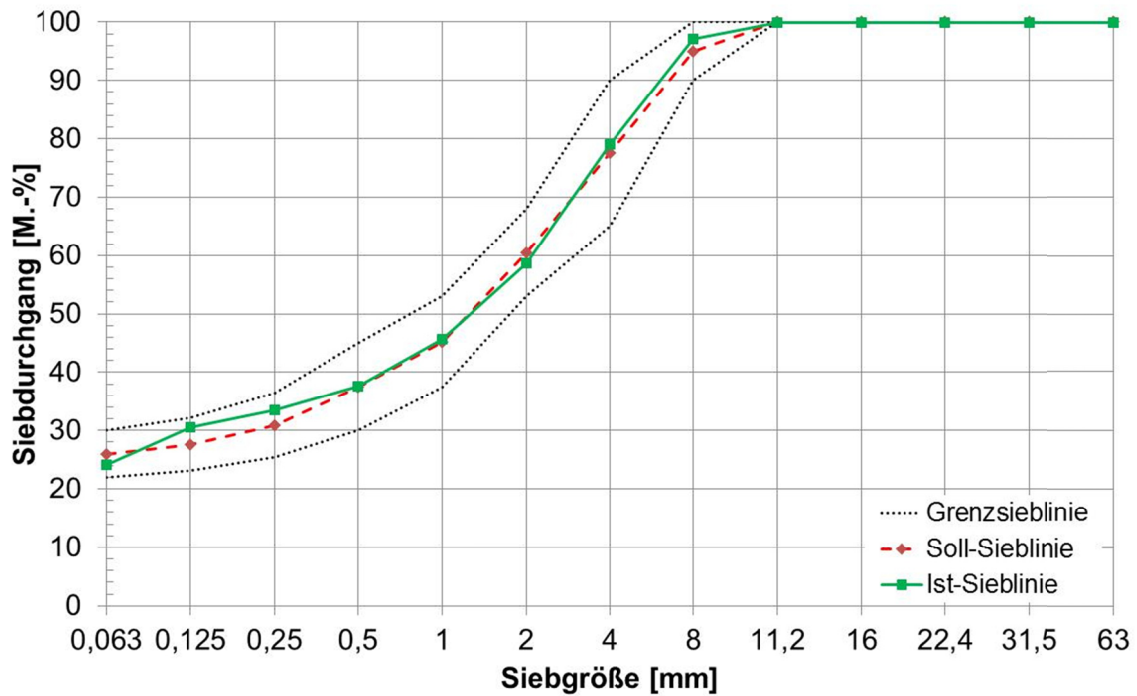


Korngröße mm	Soll- Sieblinie M.-%	Ist- Sieblinie M.-%	Differenz M.-%	untere Grenze M.-%	obere Grenze M.-%
0,063	26	24,83	1,17	22	30
0,125	27,63	30,38	-2,75		
0,25	30,92	33,41	-2,49		
0,5	37,5	37,16	0,34	30	45
1	45,17	44,11	1,05		
2	60,5	59	1,5	53	68
4	77,5	80,79	-3,29	65	90
8	95	98,99	-3,99	90	100
11,2	100	99,89	0,11	100	100
16	100	99,89	0,11	100	100
22,4	100	99,89	0,11	100	100
31,5	100	99,89	0,11	100	100
63	100	99,89	0,11	100	100

Sieblinien

MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn für Ausbreitversuch

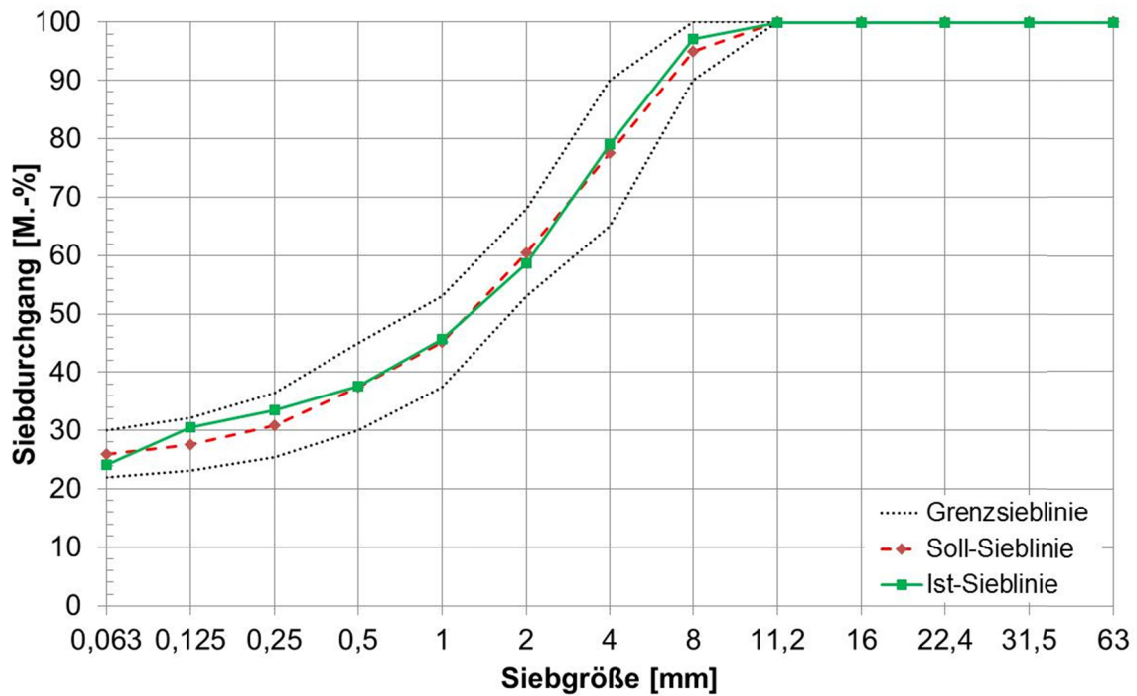
MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn mit kurzzeitgealtertem Bitumen bei 190 °C



Korngröße mm	Soll- Sieblinie M.-%	Ist- Sieblinie M.-%	Differenz M.-%	untere Grenze M.-%	obere Grenze M.-%
0,063	26	24,14	1,86	22	30
0,125	27,63	30,47	-2,84		
0,25	30,92	33,48	-2,56		
0,5	37,5	37,64	-0,14	30	45
1	45,17	45,71	-0,54		
2	60,5	58,67	1,83	53	68
4	77,5	78,98	-1,48	65	90
8	95	97,06	-2,06	90	100
11,2	100	99,89	0,11	100	100
16	100	99,89	0,11	100	100
22,4	100	99,89	0,11	100	100
31,5	100	99,89	0,11	100	100
63	100	99,89	0,11	100	100

Sieblinien

MA8 90/10, M1, G1, KE36 Rundkorn + 3% Licomont für Ausbreitversuch



Korngröße mm	Soll- Sieblinie M.-%	Ist- Sieblinie M.-%	Differenz M.-%	untere Grenze M.-%	obere Grenze M.-%
0,063	26	24,14	1,86	22	30
0,125	27,63	30,47	-2,84		
0,25	30,92	33,48	-2,56		
0,5	37,5	37,64	-0,14	30	45
1	45,17	45,71	-0,54		
2	60,5	58,67	1,83	53	68
4	77,5	78,98	-1,48	65	90
8	95	97,06	-2,06	90	100
11,2	100	99,89	0,11	100	100
16	100	99,89	0,11	100	100
22,4	100	99,89	0,11	100	100
31,5	100	99,89	0,11	100	100
63	100	99,89	0,11	100	100

Ausbreitmaße bei 190 °C

MA8 90/10, M1, G1, KE36	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	27,0	27,0	27,0
Versuch 2	29,0	30,0	29,5
Versuch 3	28,0	29,0	28,5
Mittelwert Ausbreitmaß			28,3

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	39,5	39,0	39,3
Versuch 2	40,0	40,0	40,0
Versuch 3	39,0	40,0	39,5
Mittelwert Ausbreitmaß			39,6

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn + 3% L.	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	43,5	44,0	43,8
Versuch 2	43,0	43,0	43,0
Versuch 3	43,0	43,0	43,0
Mittelwert Ausbreitmaß			43,3

Ausbreitmaße bei 210 °C

MA8 90/10, M1, G1, KE36	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	34,0	34,5	34,3
Versuch 2	35,0	36,0	35,5
Versuch 3	35,0	34,0	34,5
Mittelwert Ausbreitmaß			34,8

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	44,0	43,0	43,5
Versuch 2	42,0	44,0	43,0
Versuch 3	42,0	43,0	42,5
Mittelwert Ausbreitmaß			43,0

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn + 3% L.	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	45,0	47,0	46,0
Versuch 2	46,0	47,0	46,5
Versuch 3	46,5	47,0	46,8
Mittelwert Ausbreitmaß			46,4

Ausbreitmaße bei 230 °C

MA8 90/10, M1, G1, KE36	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	38,0	39,0	38,5
Versuch 2	39,0	39,5	39,3
Versuch 3	39,5	40,0	39,8
Mittelwert Ausbreitmaß			39,2

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	43,5	45,0	44,3
Versuch 2	44,5	45,5	45,0
Versuch 3	44,5	44,5	44,5
Mittelwert Ausbreitmaß			44,6

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn + 3% L.	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	48,0	51,0	49,5
Versuch 2	49,0	50,5	49,8
Versuch 3	49,5	51,5	50,5
Mittelwert Ausbreitmaß			49,9

Ausbreitmaße bei 250 °C

MA8 90/10, M1, G1, KE36	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	40,5	40,0	40,3
Versuch 2	40,0	40,0	40,0
Versuch 3	40,0	40,5	40,3
Mittelwert Ausbreitmaß			40,2
Prüfung Wiederholbarkeit 1	39,5	41,0	40,3
Prüfung Wiederholbarkeit 2	41,0	39,0	40,0
Prüfung Wiederholbarkeit 3	39,0	40,0	39,5
Mittelwert Ausbreitmaß			39,9

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	48,0	48,0	48,0
Versuch 2	47,5	49,0	48,3
Versuch 3	47,5	47,0	47,3
Mittelwert Ausbreitmaß			47,8

MA8 90/10, M1, G1, KE36, Rundkorn + 3% L.	L1 cm	L2 cm	Ausbreitmaß cm = (L1+L2) / 2
Versuch 1	54,0	55,0	54,5
Versuch 2	53,5	56,5	55,0
Versuch 3	52,5	55,0	53,8
Mittelwert Ausbreitmaß			54,4

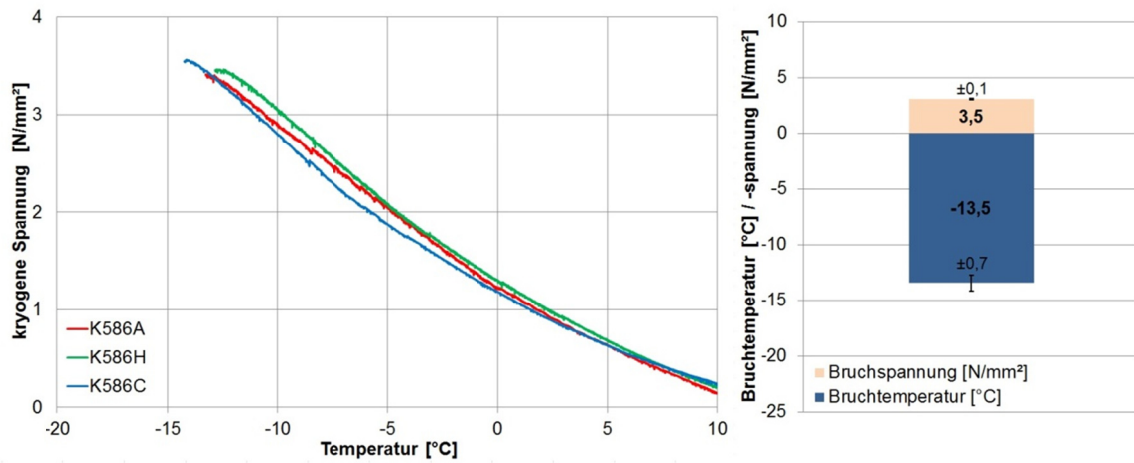
Ergebnisse der Drehmomentmessungen

MA8-KK				MA8-RK				MA8-RK + 3% L.	
Z099		Z100		Z106		Z108		Z159	
Temp. °C	Drehm. Nm	Temp. °C	Drehm. Nm	Temp. °C	Drehm. Nm	Temp. °C	Drehm. Nm	Temp. °C	Drehm. Nm
183	22,944	181	22,95	187	24,75	186	25,435	187	18,083
184	23,051	185	23,048	188	25,791	187	25,281	188	17,5
185	23,517	186	23,75	189	24,5	188	25,4	189	17,654
186	23,14	187	23,917	206	20,577	189	25,615	207	14,889
187	24,023	188	23,18	207	20,347	207	21	208	14,503
205	23,6	205	23,519	208	20,354	208	20,622	225	12,286
206	24,194	206	22,952	226	16,821	209	20,792	226	12,167
207	23,645	207	23,893	227	16,244	226	17,182	227	12,315
208	23,949	208	23,321	228	16,289	227	17,121	244	10,238
209	23,439	225	22,81	246	13,667	228	17,13	245	10,381
227	23	226	24,267	247	13,577	246	13,762	246	10,446
228	22,026	227	22,518	248	13,75	247	13,514	255	10
229	22,31	228	22,036			248	14,137		
246	19,885	245	19,615						
247	20,235	246	19,071						
		247	19,739						

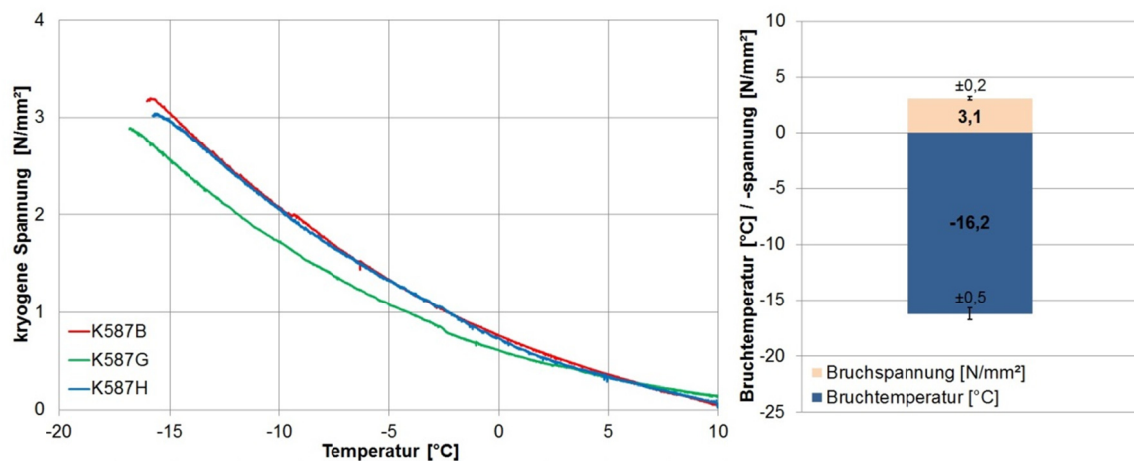
Parameter für die Darstellung der Korrelation (Abbildung 23)

Temperatur °C	MA8-KK		MA8-RK		MA8-RK + 3% L.	
	Mittelwert Drehm.	Mittelwert Ausbreitm.	Mittelwert Drehm.	Mittelwert Ausbreitm.	Mittelwert Drehm.	Mittelwert Ausbreitm.
	Nm	cm	Nm	cm	Nm	cm
190°C	23,5	28,3	25,3	39,6	17,7	43,3
210°C	23,6	34,8	20,6	43,0	14,7	46,8
230°C	22,7	39,2	16,8	44,6	12,3	49,9
250°C	19,7	40,2	13,7	47,8	10,3	54,4

Kryogene Spannungsverläufe der gealterten Mischgüter



Kryogener Spannungsverlauf (TSRST) MA8 90/10, M1, G1, KE36, KK(240 °C)

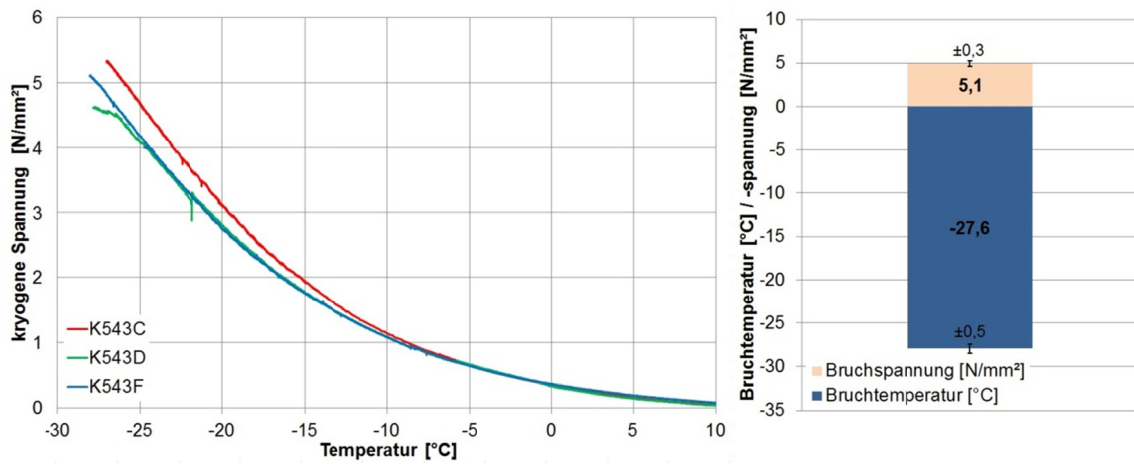


Kryogener Spannungsverlauf (TSRST) MA8 90/10, M1, G1, KE36, RK(190 °C)

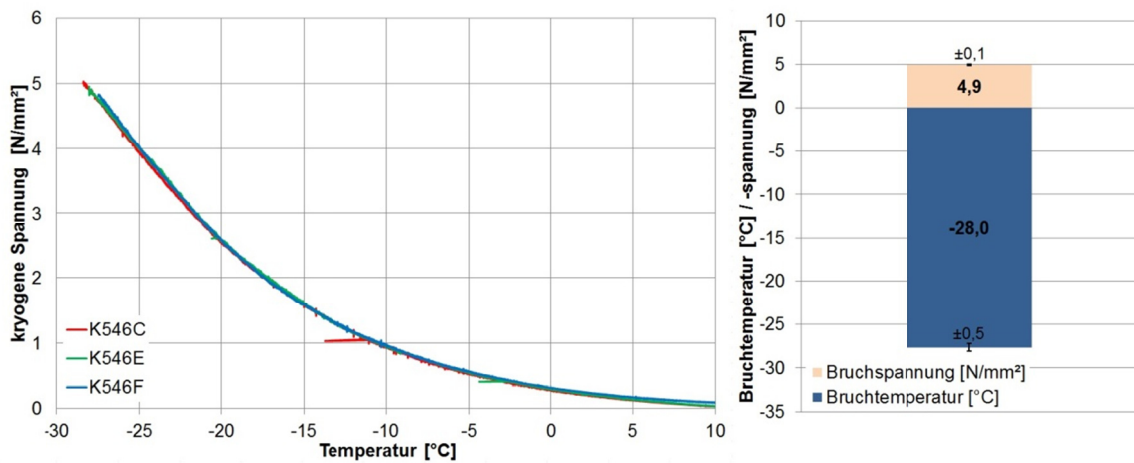
TSRST-Prüfergebnisse der gealterten Mischgüter

	MA 8 90/10, M1, G1, KE36, KK(240 °C)			MA 8 90/10, M1, G1, KE36, RK(190 °C)		
Bezeichnung	K586A	K586C	K586H	K587B	K587G	K587H
Bruchtemperatur °C	-13,3	-14,3	-12,8	-16,0	-16,8	-15,8
Bruchfläche mm²	2584	2604	2661	2586	2593	2656
max. Spannung N/mm²	3,5	3,6	3,5	3,3	2,9	3,1

Kryogene Spannungsverläufe der nichtgealterten Mischgüter



Kryogener Spannungsverlauf (TSRST) MA8 90/10, M1, G1, KE36, KK



Kryogener Spannungsverlauf (TSRST) MA8 90/10, M1, G1, KE36, RK

TSRST-Prüfergebnisse der nichtgealterten Mischgüter

	MA 8 90/10, M1, G1, KE36, KK			MA 8 90/10, M1, G1, KE36, RK			
Bezeichnung	K543C	K543D	K543F	K546C	K546E	K546F	
Bruchtemperatur	°C	-27,0	-27,8	-28,1	-28,4	-28,0	-27,5
Bruchfläche	mm²	2660	2632	2699	2548	2534	2562
max. Spannung	N/mm²	5,4	4,7	5,2	5,0	4,9	4,8