

## DOCTORAL THESIS

# Mastic asphalt - A sustainable road material

submitted in satisfaction of the requirements for the degree  
Doctor of Science in Civil Engineering  
at the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

## DISSERTATION

# Gussasphalt als nachhaltiger Straßenbaustoff

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaften  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Dipl.-Ing. Mariyan Dimitrov**

Matr. Nr.: 1028109

Thomas-Moruss-Gasse 16/12; A-1130 Wien

Betreuer:

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

Technische Universität Wien, IVWS – Institut für Verkehrswissenschaften

Gutachter:

**Prof. Dipl.-Ing. Dr.**

**Christiane Raab**

ETH-Bereich, Empa – Eidgenössische Material-  
prüfungs- und Forschungsanstalt

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

**Helmut Rechberger**

Technische Universität Wien, IWR – Institut für  
Wassergüte und Ressourcenmanagement

Wien, im April 2020

## Kurzfassung

Gussasphalt hat im Gegensatz zu den anderen Asphaltarten annähernd keine Hohlräume und kann selbstverdichtend eingebaut werden. Die Gesteine „schwimmen“ in dem Mastix (Bitumen und Füller) und haben nur wenige Berührungspunkte miteinander. Aus diesem Grund hat die Gesteinskörnung einen geringeren Einfluss auf die Standfestigkeit des Gussasphaltes im Vergleich zum Walzasphalt. Um eine ausreichende Verformungsstabilität zu gewährleisten, ist es notwendig sehr hartes Bitumen zu verwenden. Das harte Bitumen und der hohe Mastixanteil sind Voraussetzung für Einbautemperaturen bis zu 250 °C, damit eine niedrigere Viskosität erreicht wird. Höhere Temperaturen führen zu einem höheren Energieverbrauch und einer höheren Exposition von Emissionen, die seit einigen Jahren in Verdacht stehen gesundheitsschädlich zu sein. Daher ist eine Reduktion der Herstellungs- und Einbautemperatur von Gussasphalt von großer Bedeutung. Im Rahmen der Doktorarbeit wird die Temperaturabsenkung von Gussasphalt näher beleuchtet und eine neue, effiziente Methode für die Temperaturabsenkung speziell für Gussasphalt entwickelt. Basis der neuen Methode ist die teilweise oder vollständige Substitution des bisher üblichen und laut Richtlinien auch vorgeschriebenen **Kantkorns durch Rundkorn**. Während dieser Ansatz für Walzasphalt aufgrund der Lastabtragung über Korn-Interaktion und der notwendigen Kantkörnung für eine entsprechende Griffigkeit bei Deckschichten nicht möglich ist, stellt die Umstellung der Kornform für Gussasphalt eine Alternative dar, nachdem die Lastabtragung von dem Mastix übernommen wird und aufgrund des Bindemittelüberschusses bei Deckschichten ohnehin ein Absplitten vor Verkehrsfreigabe notwendig ist, um ausreichende Griffigkeit herzustellen.

Um die Temperaturabsenkung bestimmen zu können, sollte zuerst die Verarbeitbarkeit der modifizierten Mischgüter gemessen werden. Zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit wurden zwei Prüfmethode eingesetzt bzw. entwickelt. Die erste Methode ist die Bestimmung des Drehmoments während des Mischvorgangs und die zweite Methode ist die Bestimmung des Ausbreitmaßes von Gussasphalt. Der Zusammenhang zwischen Drehmoment, Ausbreitmaß und Streichversuch im Feld wurde im Detail untersucht und festgestellt, dass **der Ausbreitmaßversuch geeigneter als der Drehmomentversuch** ist, um die Verarbeitbarkeit von Gussasphalt zu bestimmen.

Für die Optimierung der Temperaturabsenkung wurden vier Gussasphalte (MA 11, MA 8 und zwei MA 4) untersucht. Das Temperaturabsenkungspotenzial steigt bis auf ein **Maximum (50 °C Absenkung)**, wenn beide Methoden (Wachszugabe und vollständige Substitution des Kantkorns durch Rundkorn) eingesetzt werden. Es sind **keine signifikanten Unterschiede bei der Beständigkeit gegen Kälterisse** zwischen den Mischgütern zu beobachten und alle Mischgüter zeigen eine **hohe Beständigkeit gegen Verformung** bei + 50 °C.

Das MA 8 Mischgut wurde zuerst im Labor optimiert und untersucht und als letzter Schritt vor einer routinemäßigen Übernahme der innovativen Gussasphalte in die Praxis war der **Einbau einer Probestrecke** mit Zustandserfassung auf dem öffentlichen Straßennetz der Stadt Wien vorgesehen. Die Baustelle war im August 2016 und es wurden vier MA 8 Varianten eingebaut. Zudem wurde Mischgut während des Einbaus entnommen und im Labor auf das Gebrauchsverhalten hin untersucht, um ggf. Unterschiede zu auf Labormaßstab produziertem Mischgut feststellen zu können. Es wurde eine gute Wiederholbarkeit zwischen Labor und Baustelle nachgewiesen. Im Rahmen der Probestrecke wurden Querebenheit-, Griffigkeitsmessungen und visuelle Zustandserfassung an der Probestrecke „Oberdorfstraße“ durchgeführt. Bis zum Frühjahr 2018 wurden keine Oberflächenschäden oder Änderungen festgestellt. Es ist zu empfehlen weitere Zustandserfassungen über mehrere Jahre durchzuführen, um ein vollständiges Bild während der Lebensdauer der Fahrbahn zu bekommen.

Im Rahmen der Bauarbeiten wurden **gesundheitsrelevante Emissionen** und die Veränderung durch Temperaturabsenkung untersucht. Bei der umfassenden Emissionsanalyse von Gussasphaltarbeiten hat sich gezeigt, dass deutliche Unterschiede in der Emission zwischen den untersuchten Mischgütern/Einbautemperaturen bestehen und eine **Emissionsreduktion von ca. 80% durch eine Temperaturabsenkung von 50 °C möglich ist.**

Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen temperaturabgesenkter Gussasphalte wurden anhand von Emissions-, Energie- und Kostenanalysen untersucht und über den Lebenszyklus bilanziert. Auf der Emissionsebene konnten Einsparungen von 33 % der Gesamtemissionen berechnet werden, wenn die Produktionstemperatur um 50 °C abgesenkt wird.

Insgesamt zeigt sich also durch den kombinierten Einsatz von Rundkorn und Wachs ein sehr gutes Temperaturabsenkpotehtial für Gussasphalt. Das Gebrauchsverhalten wird dadurch nicht beeinflusst und die Partikelemissionen auf der Baustelle verringern sich deutlich durch die Temperaturabsenkung. Auch die Gesamtemissionen über den Lebenszyklus können reduziert werden.

Das Arbeitsprozess zur Optimierung der Temperaturabsenkung von Gussasphalt hat zu den Gedanken geführt, dass die Wiederverwendung von Gussasphalt unkomplizierter als von Walzasphalt funktionieren sollte. Hauptprobleme bei der Wiederverwendung von Asphaltmischgütern ist das harte (gealterte) Bindemittel und die Änderungen (Verfeinerung) in der Sieblinie in Folge der Fräsarbeiten. Diese Nachteile für Walzasphalte können als Vorteile für den Gussasphalt angesehen werden. Gussasphalte werden in der Regel mit einem härteren Bitumen hergestellt. Die Sieblinie ist grundsätzlich füllereich vorgesehen.

Im letzten Kapitel wird die Machbarkeitsstudie zum Recycling-Potential von Gussasphalt durchgeführt. Ziel und Ergebnis für diese Machbarkeitsstudie war die **Wiederverwendung von Gussasphalt bei einem RAP (reclaimed asphalt pavement) Anteil von über 98 M%** bei einer Gewährleistung der höchsten Anforderungen für die Beständigkeit bei tiefen und hohen Temperaturen.

## Abstract

Among the different asphalt mix types, mastic asphalt (MA) holds a special position due to its composition, application and load transfer. Mainly the mastic is responsible for load transfer and usually hard and in some cases, polymer modified binders are employed for MA. To keep the mix pourable, the viscosity of the mastic and mix has to be low enough at the construction site. Thus, high temperatures of up to 250°C are necessary for mixing and paving. Higher temperature leads to lower viscosity, but higher temperature means also more particulate matter emissions and energy consumption. Several reports show that workers health is increasingly affected when bitumen is handled at temperatures over 200°C. For these reasons, a temperature reduction in MA is seen as crucial for enhanced energy efficiency and a healthier work environment. In this work, a state-of-the-art modification is compared to a new, efficient alternative for temperature reduction of MA. For the state-of-the-art method, a wax-modified bitumen is used as the binder component for the asphalt mix. In the new method for temperature reduction, **crushed aggregates are substituted by round aggregates** within the MA. This substitution brings a significant temperature reduction potential. The new approach is not applicable to other asphalt mix types, because all other mix types are based on coarse aggregate interaction for load transfer.

Two testing methods for workability of mastic asphalt were developed and applied to determine the optimal temperature for the optimal viscosity: (a) measurement of mixing torque in a conventional lab mixer for asphalt mix production; (b) modified flow table test (slump test) for mastic asphalt. Different modified asphalt mixes were placed on a testing field at different temperatures to examine the optimal laying temperature. It was found, that **the flow table test results are closer to the field results**. This can be explained by the fact that the mastic asphalt is applied in practice by spreading on the surface. The torque only plays role in the mobile mastic asphalt transporter, where the mix is stirred.

Four mastic asphalt mixes (MA 11, MA 8 and two MA 4) were optimised. Due to the combination of round aggregates and amide wax, a **temperature reduction of up to 50 °C** was reached without any negative changes in the mechanical performance of the materials.

After the development of the different modified mastic asphalt mixes in the laboratory the MA 8 optimised mixes were produced in a conventional batch plant and finally applied on the road network of the city of Vienna. The workability and the mechanical performance of the mixes were tested and compared through all these three steps (laboratory, batch plant and construction site). Crucial was to test and provide the same quality through the whole production cycle (from the laboratory through the mixing plant to the construction site). The difference between the small and large production scale plays important role. In the small-scale production, there is lower short-term binder aging and the mix design, the production, transport and laying temperature can be adjusted more precisely. At the end the results proved a good repeatability between the laboratory, the mixing plant and the construction site. As a part of the construction site we did a condition surveys every six months from the end of the construction works until the first half of 2018. During this period there were not any changes or damages. However, it is recommendable to carry out further condition surveys in order to obtain a complete picture during the lifetime of the roadway.

In addition to the construction works we investigated the particulate matter emissions and made material flow analyses (MFA) for the different mastic asphalts. An **emission reduction of 80 % and energy saving of 10 %** were a result to a temperature reduction of 50 °C.

Typical for the mastic asphalt are a fine grading curve and hard binders. It transfers load mainly by the stiff mastic and can be produced with round aggregates. A current topic nowadays is the reclaimed asphalt pavement (RAP). One crucial problem for the reclaimed asphalt (RAP) is the hard (aged) binder. This disadvantage for the other asphalt types is an advantage for the mastic asphalt, where we need a stiff mastic (binder plus filler) by default. This idea led us to go beyond the current state and we developed a mastic asphalt **with more than 98 % recycled material**, ensuring the highest requirements for resistance at low and high temperatures.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Forschungsziele .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Rezepturkonzepte und Stand der Forschung.....</b>	<b>13</b>
3.1	Historischer Überblick [27] .....	13
3.2	Ermittlung des optimalen Bindemittelgehalts [27].....	17
3.3	Rezepturoptimierung von Asphaltmischgütern [27].....	18
3.3.1	Empirische Methoden.....	18
3.3.2	Analytische Methoden .....	18
3.4	Richtlinien für Gussasphalt.....	19
3.4.1	Österreich .....	19
3.4.2	Deutschland .....	20
3.5	Rezepturkonzepte von Gussasphaltmischgütern .....	22
3.5.1	Bindemittelart und Bindemitteloptimierung .....	22
3.5.2	Bindemittelgehalt.....	23
3.5.3	Füllergehalt und Sieblinie .....	24
3.5.4	Verweildauer .....	28
3.6	Rezepturkonzepte im Rahmen der gegenständlichen Doktorarbeit .....	29
3.7	Zusammenfassung Literaturrecherche .....	29
<b>4</b>	<b>Prüfmethoden zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt.....</b>	<b>30</b>
4.1	Stand der Technik .....	30
4.2	Materialien.....	31
4.3	Prüfmethoden und Prüfprogramm.....	32
4.3.1	Mischmoment-Messungen mit Gegenlaufzwangsmischer .....	32
4.3.2	Ausbreitmaß für Gussasphalt.....	33
4.3.3	Streichversuch Mischanlage .....	34
4.4	Ergebnisse und Diskussion .....	35
4.4.1	Mischmoment-Messung mit Gegenlaufzwangsmischer.....	35
4.4.2	Ausbreitmaß für Gussasphalt.....	37
4.4.3	Korrelation zwischen Mischmoment und Ausbreitmaß .....	39
4.4.4	Streichversuch Mischanlage .....	41
4.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	43
<b>5</b>	<b>Optimierung der Temperaturabsenkung von Gussasphalt .....</b>	<b>45</b>
5.1	Stand der Technik .....	45
5.1.1	Gussasphalt vs. Walzasphalt.....	45
5.1.2	Anwendungsgebiete.....	45
5.1.3	Additive und Methoden zur Temperaturabsenkung .....	46

5.2	Klassifizierung von Gussasphalt .....	49
5.3	Ziele und Herangehensweise.....	51
5.4	Materialien .....	52
5.4.1	Additive und Methoden .....	52
5.4.2	Bitumen .....	52
5.4.3	Gestein.....	53
5.4.4	Gussasphaltarten .....	53
5.4.5	MA 11 .....	54
5.4.6	MA 8 .....	56
5.4.7	MA 4 .....	59
5.5	Prüfmethoden.....	62
5.5.1	Temperaturabsenkung.....	62
5.5.2	Gebrauchsverhalten .....	62
5.6	Optimierung auf Bitumenebene .....	66
5.6.1	Prüfprogramm.....	66
5.6.2	Vorbereitung Bitumenproben .....	67
5.6.3	Ergebnisse .....	68
5.7	Optimierung auf Asphaltebene .....	72
5.7.1	MA 11 .....	72
5.7.2	MA 8 .....	81
5.7.3	MA 4 Garagenmischgut.....	87
5.7.4	MA 4 Gehsteigmischgut .....	91
5.7.5	Vergleich Gussasphaltarten .....	95
5.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	98
<b>6</b>	<b>Grosstechnische Umsetzung .....</b>	<b>100</b>
6.1	Ziele.....	100
6.2	Betrachtungsebenen .....	101
6.2.1	Labor .....	101
6.2.2	Mischanlage.....	102
6.2.3	Baustelle/Probestrecke.....	103
6.3	Prüfmethoden und Prüfprogramm.....	105
6.3.1	Prüfmethoden .....	105
6.3.2	Prüfprogramm.....	105
6.4	Ergebnisse und Diskussion .....	106
6.4.1	Asphaltanalyse.....	106
6.4.2	Bitumenebene .....	109
6.4.3	Mischgutebene.....	114
6.5	Korrelation DSR – UCCT.....	118

6.6	Zustandserfassung der Probestrecke .....	121
6.7	Emissionsanalyse [104] .....	125
6.8	Lebenszyklusanalysen [105] .....	129
6.9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	134
<b>7</b>	<b>Machbarkeitsstudie zum Recycling Potential von Gussasphalt .....</b>	<b>137</b>
7.1	Stand der Technik .....	137
7.2	Ziele .....	137
7.3	Materialien .....	138
7.4	Prüfmethoden und Prüfprogramm.....	139
7.4.1	Prüfmethoden .....	139
7.4.2	Prüfprogramm.....	139
7.5	Ergebnisse und Diskussion .....	140
7.5.1	Asphaltanalyse.....	140
7.5.2	Bitumenebene .....	142
7.5.3	Mischgutebene.....	146
7.6	Korrelation DSR - UCCT .....	149
7.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	153
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....</b>	<b>154</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>158</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>163</b>
10.1	Abbildungsverzeichnis.....	163
10.2	Tebellenverzeichbnis .....	166



# 1 EINLEITUNG

Gussasphalt (MA) nimmt aufgrund seiner Zusammensetzung, seines Einsatzgebietes und seiner Lastabtragung einen speziellen Platz innerhalb der Asphaltarten ein. Die Hauptbestandteile von Gussasphalt sind die Füllerkomponente ( $\leq 0,063$  mm) mit bis zu 30 M% und das Bindemittel mit 8 M% bis 10 M% [1]. Bis zu 40 M% des Mischguts sind daher als Mastix zu bezeichnen, der Rest wird durch gröbere Körnungen eingenommen. Dieser Aufbau steht in klarem Gegensatz zu Walzasphalt-Sorten, z.B. Asphaltbeton (AC) mit 10 M% bis 15 M% Mastix. Aufgrund der volumetrischen Zusammensetzung wird Gussasphalt ohne zusätzliche Verdichtungsgeräte eingebaut, sondern, wie der Name sagt, gegossen. Dabei ist das Ziel ein dichtes Mischgut, ohne technisch relevanten Hohlraumgehalt zu erzeugen. Ein wesentlicher Unterschied zu anderen Mischgut-Sorten besteht auch in der Abtragung der Verkehrsbelastung. Während bei Walzasphalten die Lastabtragung hauptsächlich durch Interaktion der groben Gesteinskörnung sichergestellt wird, geschieht dies bei Gussasphalt durch eine ausreichend steife Mastix. Aufgrund der geringeren Korn-Interaktion beim Gussasphalt ist sie für die Lastabtragung vernachlässigbar.

Aufgrund der oben genannten Eigenschaften wird Gussasphalt häufig als Schutz- und Deckschicht auf Brücken [2, 3], als Deckschicht im hochrangigen Straßennetz, sowie in Stadtzentren, für Geh- und Radwege, sowie Garagenbeläge verwendet.

Nachdem bei Gussasphalt der Mastix für die Lastabtragung verantwortlich ist, werden harte, im hochrangigen Straßennetz oft polymermodifizierte Bindemittel eingesetzt. Um das Mischgut dennoch ausreichend fließfähig zu halten, muss die temperaturabhängige Viskosität der Mastix bzw. des Mischguts auf der Baustelle gering genug sein. Daher sind im Normalfall hohe Produktionstemperaturen von bis zu 250°C notwendig. Nachdem mehr als 70% des Energieverbrauchs in der Asphaltproduktion auf die Mischanlage entfallen [4], kann Gussasphalt als besonders energieintensiv eingestuft werden. Zudem zeigen einige Untersuchungen, dass Bitumentemperaturen über 200°C möglicherweise negativen Einfluss auf die Gesundheit von einbauendem Personal hat [5-7]. Daher gilt eine Temperaturabsenkung von Gussasphalt als notwendige Voraussetzung für bessere Energieeffizienz und ein sicheres Arbeitsumfeld.

Seit dem Beginn der 1990er Jahren wird intensiv an der Entwicklung von Produkten (Zusätzen) und Methoden zur Temperaturabsenkung von Asphaltmischgut geforscht [8-15]. Für Walzasphalte werden diese Produkte in einigen europäischen Ländern, sowie in den USA erfolgreich in der Praxis verwendet. In Österreich ist diese Technologie in der Praxis angekommen. Es gibt aber nur begrenzte Erfahrung für die Anwendung bei Gussasphalten bzw. wurden bisher bestehende Produkte und Methoden auf Gussasphalt angewandt, ohne deren Einfluss auf das Gebrauchsverhalten detailliert zu untersuchen.

Bitumen mit Wachsmodifikation ist inzwischen eine in den Stand der Technik übergegangene Methode zur Absenkung von Produktions- und Einbautemperaturen von Asphaltmischgut [16-19]. Oberhalb des Tropfpunkts des eingesetzten Wachses kommt es zu einer Viskositätsreduktion im Bindemittel, wodurch Temperaturabsenkung ermöglicht wird. Zurzeit sind unterschiedliche Wachsorten am Markt, die jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit, aber auch das Gebrauchsverhalten haben. Durch die Kristallisation der Wachse beim Abkühlen kommt es tendenziell zu einer verbesserten Verformungsstabilität bei hohen Temperaturen. Das kann aber auch zu geringerem Widerstand gegen Kälterisse führen [20-24]. Weitere Nachteile der Wachsmodifizierung sind der hohe Preis und die energieintensive Herstellung der Wachse [25].

Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurde die Temperaturabsenkung näher beleuchtet und eine neue, effiziente Methode für die Temperaturabsenkung speziell für Gussasphalt entwickelt. Zuerst wurde die

Verarbeitbarkeit der Referenz-Mischgüter gemessen und für das Ziel wurden zwei neue Prüfmethode zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit entwickelt. Anschließend war es wichtig die Gussasphaltrezepturen zu modifizieren, um maximale Temperaturabsenkung zu erzielen. Das Gebrauchsverhalten (Riss- und Verformungsbeständigkeit) wurde auf gleichem Niveau belassen oder verbessert. Die modifizierten Rezepturen wurden sowohl im Labor als auch im Feld getestet. So wurde festgestellt, ob sie praxistauglich sind und ob die Mischgutherstellung auf Labor-, Mischanlagen- und Baustellenebene vergleichbar ist. Zusätzlich wurden Emissions- und Lebenszyklusanalysen durchgeführt, um den Effekt der modifizierten Mischgüter und der damit verbundenen Temperaturabsenkung auf die Arbeitsbedingungen und auf die emittierten Emissionen, den Energieverbrauch und die Kosten während des ganzen Lebenszyklus zu analysieren. Am Ende wurde das Recyclingpotential von Gussasphalt untersucht, weil das Thema von größer Bedeutung ist und für Gussasphalt noch wenig erforscht ist. Zusätzlich wurde im Rahmen der Arbeit zur Optimierung der Temperaturabsenkung klar, dass die Wiederverwendung von Gussasphalt ein hohes Potential hat.

## 2 FORSCHUNGSZIELE

Hauptziel dieser Doktorarbeit ist die Temperaturabsenkung von Gussasphalt bei gleichbleibendem Gebrauchsverhalten. Da die Wachsmodifizierung mit höheren Materialkosten verbunden ist, sollte eine neue, effizientere Methode für die Temperaturabsenkung speziell für Gussasphalt entwickelt werden. Basis der neuen Methode ist die teilweise oder vollständige Substitution des bisher üblichen und laut Richtlinien auch vorgeschriebenen Kantkorns durch Rundkorn. Während dieser Ansatz für Walzasphalt aufgrund der Lastabtragung über Korn-Interaktion und der notwendigen Kantkörnung für eine entsprechende Griffigkeit bei Deckschichten nicht möglich ist, stellt die Umstellung der Kornform für Gussasphalt eine Alternative dar, da die Lastabtragung beim Gussasphalt von der Mastix übernommen wird und aufgrund des Bindemittelüberschusses bei Deckschichten ohnehin ein Absplitten vor Verkehrsfreigabe notwendig ist, um ausreichende Griffigkeit herzustellen.

Im ersten Teil der Dissertation wird ein Überblick zu den Erstellungsmethoden von Mischgutrezepturen für Asphaltmischgütern und zu der bestehenden Literatur zur Optimierung von Gussasphaltrezepturen gegeben, um den Stand der Technik im Gebiet der Gussasphaltoptimierung darzustellen.

Danach widmet sich die Arbeit der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt, weil das ein wesentliches Kriterium für einen konventionellen oder temperaturabgesenkten Gussasphalt ist. Da es für Gussasphalt kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren gibt, war es wichtig neue Prüfmethoden zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit zu entwickeln.

Das nächste Kapitel beinhaltet die Optimierung der Temperaturabsenkung von Gussasphalt bei gleichbleibendem Gebrauchsverhalten. Es sollte zunächst die Optimierung der Temperaturabsenkung unter Beimengung unterschiedlicher Wachsorten geprüft bzw. parallel dazu die Methode der Kornsubstitution entwickelt werden. Dabei wurde die mögliche Temperaturabsenkung auf Bindemittel- und Mischgutebene untersucht. Anschließend wurde das Gebrauchsverhalten in Bezug auf Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und Kälterisse für temperaturabgesenkte Gussasphalt überprüft.

Im Anschluss an die Optimierung wird die großtechnische Umsetzung von ausgewählten Mischgütern an der Mischanlage und deren Einbau auf einer Probestrecke erläutert. Es war wichtig, die großtechnische Umsetzung in zwei Schritte (Mischanlage und Probestrecke) zu unterteilen, weil am Anfang die Praxistauglichkeit der Rezepturen an der Mischanlage geprüft werden sollte. Es wurde auch untersucht, ob die im Labor erreichten Temperaturabsenkungen bei der Verarbeitung von großen Mengen in der Praxis möglich sind. Um das Gebrauchsverhalten zu untersuchen und ggf. Unterschiede zu im Labormaßstab produziertem Mischgut feststellen zu können, wurde Mischgut aus der Mischanlage entnommen und im Labor geprüft. Der letzte Schritt vor einer routinemäßigen Übernahme der innovativen Gussasphalte in die Praxis war der Einbau einer Probestrecke mit Zustandserfassung auf dem öffentlichen Straßennetz der Stadt Wien. Durch den Einbau von konventionellen und innovativen Rezepturen und die nachfolgende Zustandserfassung wurden Erfahrungen zu Bedingungen bei realem Einbau gesammelt.

Ein weiteres Ziel war es, die gesundheitsrelevanten Emissionen und ihre Veränderung durch Temperaturabsenkung zu untersuchen. Es wurden sowohl zwei Laborstudien als auch eine Feldstudie durchgeführt, um praxisnahe Daten zu erhalten, die die bisher dürftige Datenlage verbessern und als erweiterte Entscheidungsgrundlage für eine Temperaturabsenkung dienen können.

Energie- und Emissionseinsparungen während der Produktion sind wesentliche Vorteile von temperaturabgesenkten Gussasphalten. Daraus folgt ein geringerer Material-, Energie- und Kostenaufwand nicht nur

während der Produktion, sondern auch über die gesamte Lebensdauer. Dies kann durch eine Lebenszyklusanalyse in Bezug auf Energie und Stoffflüsse ganzheitlich untersucht werden. Durch die Analysen über den Lebenszyklus konnten nicht nur die unmittelbaren Einsparungen während der Produktion ermittelt, sondern auch langfristige Potenziale zur Senkung von Energie und Kosten dargestellt werden.

Die Arbeit im Rahmen der Temperaturabsenkung von Gussasphalt hat zu den Erkenntnissen geführt, dass die Wiederverwendung von Gussasphalt einfacher als die Wiederverwendung von Walzasphalten ist. Hauptprobleme bei der Wiederverwendung von Asphaltmischgütern sind das harte (gealterte) Bindemittel und die Änderungen (Verfeinerung) in der Sieblinie in Folge der Fräsarbeiten [26]. Diese Nachteile für die Walzasphalte sind jedoch Vorteile für den Gussasphalt. Da das Recycling ein wesentliches Thema in unserer Gesellschaft ist, wird das Recycling-Potential von Gussasphalt im Anschluss an die Temperaturabsenkung und zum Schluss dieser Arbeit näher beleuchtet. Ziel der Machbarkeitsstudie zum Recyclingpotential von Gussasphalt ist die Wiederverwendung von Gussasphalt bei einem RAP (reclaimed asphalt pavement) Anteil von über 98 M% bei gleichzeitiger Erfüllung der höchsten Anforderungen für die Beständigkeit bei tiefen und hohen Temperaturen.

In Abbildung 1 sind das Forschungskonzept und die Forschungsziele in einem Flussdiagramm dargestellt.

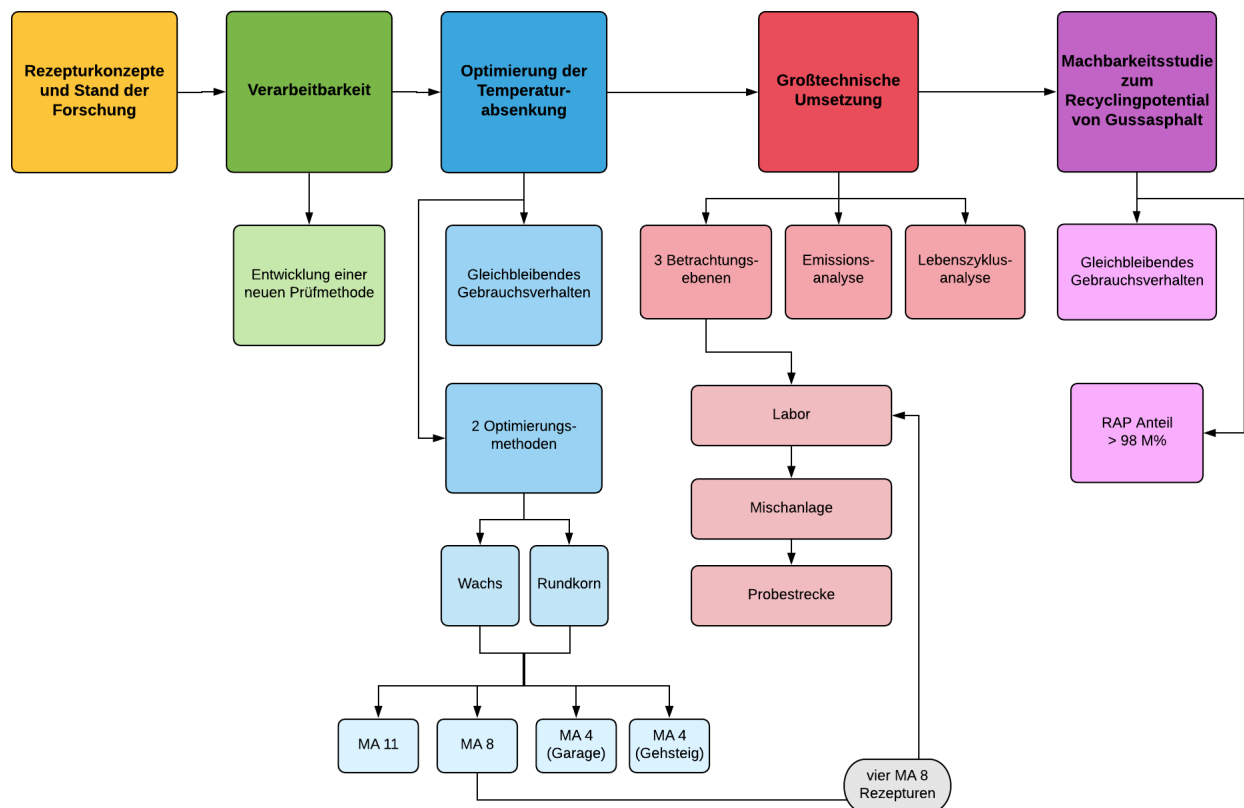


Abbildung 1: Forschungskonzept und Forschungsziele

### 3 REZEPTURKONZEPTE UND STAND DER FORSCHUNG

In diesem Kapitel wird zuerst ein Überblick zu Optimierungsmethoden von Mischgutzerepturen für Asphaltmischgüter und zweitens ein Überblick zur bestehenden Literatur zur Optimierung von Gussasphaltrezepturen präsentiert.

Zum Aufbau von Kapiteln 3.1, 3.2 und 3.3 wurde auf Inhalte der Diplomarbeit „Die analytische Methode zur Erstellung von Mischgutzerepturen für technische Asphalte“ [27] zurückgegriffen.

#### 3.1 Historischer Überblick [27]

Eine der ersten bekannten Asphaltierungen war die 1873 durch C.E. Evans erbaute Connecticut Avenue in Washington D.C.. Als diese 1906 erneuert wurde, analysierte der amerikanische Asphalttechniker Clifford Richardson zahlreiche Proben aus der Originalstraße. Richardson erkannte die Wichtigkeit der Materialauswahl und erweiterte die Klassifizierung der Zuschlagstoffe maßgeblich. Dabei wurde ihm die Rolle der Feinanteile im Zuschlagstoff klar. Er begann alle wichtigen Grundlagen guter Asphaltmischungen, wie z.B. den Hohlraumgehalt der Asphaltmischungen und der Zuschlagstoffe (Voids in Mineral Aggregate - VMA), zu dokumentieren.

Abwandlungen von Richardsons Asphaltmischungen wurden schließlich 1935 in die Britische Normung übernommen und in Großbritannien unter 'Hot Rolled Asphalt' bekannt. [28]

##### Pat Test

Richardson beschreibt 1908 [29] den vermutlich ersten Test zur Ermittlung des optimalen Bindemittelgehalts, welcher Pat Test (Pat = 'Flade') genannt wurde. Es war eine einfache visuelle Bewertung des auf Manila Papier (ein aus Manila Hanf oder ähnlichen Holzfasern hergestelltes, dem Packpapier ähnliches Papier) entstehenden Fleckes, nachdem dieses auf den Asphalt gedrückt wurde. Ein leichter Fleck deutete auf zu geringen Bindemittelgehalt hin, ein starker hingegen auf zu viel Bindemittel und ein mittlerer Fleck entsprach dem optimalen Bindemittelgehalt. Richardson stellte dem Anwender entsprechende Vergleichsillustrationen zur Verfügung. Der Pat Test wurde bis in die 1920er Jahre verwendet.

Richardson empfahl Asphaltmischungen mit enggestufter Kornverteilung und einem Größtkorn von ca. 1 Inch (25,4 mm), verließ sich bei der Optimierung des Bindemittelgehalts aber immer auf eine visuelle Einschätzung. Er erwähnte auch andere Tests, darunter einen Test zur Abriebfestigkeit des Zuschlagstoffes und den Asphalt-Zement-Penetrationstest nach A. W. Dow. [28]

##### Bitulithic Patent und Topeka Dekret

Frederick Warren hat Anfang des 20. Jahrhunderts viele Patente angemeldet und eines davon war das so genannte Bitulithic Patent (US Patent 727505 vom 5. Mai 1903), welches eine wichtige Rolle in der Entwicklung des Mix Design spielte [30]. Die erste Straße nach dem Bitulithic Patent wurde 1901 in Rhode Island asphaltiert und enthielt ein Größtkorn von einem  $\frac{3}{4}$  Inch (19 mm). Das Patent erlaubte Gesteinsgrößen bis zu 3 Inch (76 mm). Üblich war ein Größtkorn von 1 bis  $1\frac{1}{4}$  Inch [28]. Eine typische bitulithische Mischung bestand aus Zuschlagstoffen mit abgestufter Sieblinie und enthielt circa 6% bituminöses Bindemittel [31].

Damit das Bitulithic Patent nicht verletzt wurde hat die US-Stadt Topeka das Größtkorn der Mischung unter einem halben Inch (13 mm) gehalten. Das führte Anfang des 20. Jahrhunderts dazu, dass in vielen amerikanischen Staaten feinkörnige Mischungen bevorzugt wurden. Eine typische Topeka Mischung enthielt ca. 30 % Kies oder Splitt, 58 bis 62 % Sand (0,075 mm < Sand < 2 mm), 8 bis 12 % Füller (< 0,075 mm) und

benötigte 7,5 bis 9,5 M% Bitumen [31]. Diese Mischungen waren gut zu verarbeiten und erzeugten glattere Oberflächen, was damals mit der steigenden Verbreitung von Fahrzeugen mit luftgefüllten Reifen als Vorteil angesehen wurde. Wie die Gussasphaltemischungen haben sie feine Sieblinie und hohen Bindemittelgehalt.

### **Hubbard – Field Methode**

Mitte der 1920er Jahre wurde von Hubbard und Field eine Testmethode zur Bestimmung des optimalen Bindemittelgehalts für Deckschichten und gebundene Tragschichten entwickelt. Dieser Test nach Hubbard und Field bestand darin, einen Probekörper mit Durchmesser 2 Inch (50,8 mm) und einer Höhe von einem Inch (25,4 mm) durch eine Öffnung von 1,75 Inch (44,4 mm) zu zwängen. Die dazu notwendige Maximalkraft wurde als Stabilitätswert bezeichnet. Dieser Stabilitätswert wurde für unterschiedliche Bindemittelgehalte bestimmt, um jenen Bindemittelgehalt zu bestimmen für den der Stabilitätswert ein Maximum wurde. Das war vermutlich der erste Versuch, um empirische Kennwerte für unterschiedliche Bindemittelgehalte abzuleiten. Die Methode fand breite Akzeptanz und wurde in vielen US-Staaten verwendet. 11 Staaten verwendeten noch 1957 den Test und in Florida und einigen anderen Staaten fand er bis Mitte der 70er Jahre Anwendung.

### **Oil Mixes und die McKesson – Frickstad Formel**

Ölmischungen ('Oil Mixes') sind ein Gemisch aus Kiesen mit stetiger Korngrößenverteilung und langsam abbindendem Bitumen. Sie wurden für Straßen mit geringer Verkehrsbelastung eingesetzt. Die erste Straße dieser Art wurde 1926 in Kalifornien gebaut [32].

Die meisten Straßen aus Ölmischungen wurden ausschließlich nach Erfahrungswerten erstellt. Farbe und Konsistenz der Mischung waren wesentliche Hilfsmittel. 1927 präsentierten McKesson und Frickstad [33] eine empirische Formel zur Bemessung des Bindemittelbedarfs bei Ölmischungen. Diese leiteten sie durch Analyse von Probekörpern ab, die aus 1923 bis 1926 hergestellten Straßen mit Ölmischungen gewonnen wurden [34].

### **Entwicklung der Oberflächentheorie durch Hveem**

Hveem erkannte den Zusammenhang zwischen der Sieblinie des Zuschlagstoffes und der benötigten Menge 'Öl', und dass es notwendig war, den Ölgehalt bei unterschiedlichen Zuschlagsstoffen zu variieren, um die gleiche Farbe und Aussehen der Asphaltmischungen zu erhalten. Er postulierte, dass die optimale Menge an Asphaltöl jene Menge ist, welche die Oberfläche der einzelnen Partikel gleichmäßig, mit bestimmter Dicke beschichtete. Auf Grundlage der von Edwards zur Berechnung der Oberflächen von Betonzuschlagstoffen entwickelten Formel, machte Hveem Angaben zu den Gesteinsoberflächen pro Gewichtseinheit einer Korngröße (in ft<sup>2</sup>/pound) zu den jeweiligen Siebgrößen. Dies war der Beginn der Oberflächentheorie ('Surface Area Method'). Hveem nahm an, dass der richtige Bindemittelgehalt erstens von der Größe der Gesteinsoberfläche abhängt und zweitens auf der Tatsache beruht, dass mit vermindertem Gesteinsdurchmesser einer Gesteinsart sich auch die Dicke des benötigten Bindemittelfilms um die Körner herum verringert. Die 'Bitumen Index Kurven', stellen 'Oberflächenfaktoren' dar, welche zwischen Oberflächentexturen der Einzelkörner mit verschiedenem Grad an Oberflächenrauigkeit und Absorption unterscheiden.

### Entwicklung des Stabilometers

Hveem, der die Hubbard – Field Methode als ungeeignet betrachtete, entwickelte das Stabilometer, ein Gerät zur Messung der Verformungsstabilität von Asphaltmischungen deren Zusammensetzung nach der Oberflächentheorie bestimmt wurde. Er ging davon aus, dass das Asphaltmischgut einen plastischen Festkörper darstelle, und dass die Höhe des Widerstandes gegen plastische Verformung ein Maß für die Stabilität der Mischung wäre.

Im Stabilometer wird ein zylindrischer Probekörper etwa in der Größe der Reifenaufstandsfläche (Durchmesser 100 mm) und mit der Dicke üblicher Asphaltsschichten (63,5 mm) bei einer Prüftemperatur von 60°C vertikal belastet, und die in horizontaler Richtung übertragene Kraft gemessen. Die erste Version eines solchen Apparates wurde 'Plastometer' genannt [34].

Als man die im Labor verdichteten Probekörper mit den aus Straßen entnommenen Bohrkernen gleichen Materials verglich, stellte man fest, dass die im Labor hergestellten Proben grundsätzlich höhere Stabilitätswerte aufwiesen. Man kam zu dem Schluss, dass der bei der Verdichtung eingesetzte Schlaghammer die einzelnen Körner durch die schlagende Bewegung höher verdichtete als das beim Einbau auf der Baustelle erfolgte. Eine knetende Bewegung bei der Verdichtung, wie es unter einer Walze oder auch einem Gummirad erfolgt, sollte daher realistischere Ergebnisse im Labor bringen. Um 1936 wurde ein neuartiges Gerät zur Verdichtung der Probekörper entwickelt. Bei diesem Gerät ('California Kneading Compactor') wurde die Last durch einen elektrischen Motor aufgebracht, welcher ein Drehgelenk aktivierte, das zwischen dem Stampfknüppel und einem darüber liegendem Balken angebracht war. Zusätzlich wurde der Probekörper durch eine hydraulische Vorrichtung in die Höhe gedrückt, wodurch es zu einer knetenden Verdichtung kam und der Verdichtungsdruck kontrolliert wurde. Nach der Verdichtung des Probekörpers, wurde zur Glättung der Oberseite des Probekörpers eine statische Last von 1000 psi (6,8 N/mm<sup>2</sup>) auf diese aufgebracht.

In Verbindung mit dem Stabilometer wurde ein weiteres mechanisches Gerät entwickelt. Das Kohäsionsmeter genannte Gerät diente dazu, die Kohäsion einer Mischung festzustellen. Dies geschah an Probekörpern, welche zuvor im Stabilometer getestet wurden. Weiters wurde der 'Moisture Vapor Susceptibility Test' (MVS) entwickelt (Test der Feuchtigkeits-Dampf-Anfälligkeit). Mit diesem Test wurde es möglich, den negativen Effekt welcher von unten in die Asphaltsschicht eindringendes Wasser hervorruft zu beurteilen. Im Wesentlichen entspricht der MVS dem Stabilometer Test, durchgeführt an einem Probekörper der zuvor Wasserdampf ausgesetzt wurde [34].

### **Entwicklung des Marshall – Verfahrens**

Eine ursprüngliche Version dieses Verfahrens wurde um 1939 von Bruce G. Marshall am Mississippi Highway Department entwickelt. Während des 2. Weltkriegs wurde diese vom US Army Corps of Engineers (USACE) übernommen und weiterentwickelt. 1943 begann man mit der Entwicklung eines einfachen, mobilen Geräts, das ein rasches Asphalt Mix Design vor allem für Flugbetriebsflächen ermöglichen sollte. Grund dafür waren die steigenden Reifenlasten der Flugzeuge während des 2. Weltkrieges und die daraus resultierenden höheren Reifen- und Kontaktdrücke.

Auf der Suche nach einer einfachen Methode mit leicht zu transportierendem Equipment, wurde die Marshall Methode favorisiert. Die Entscheidung wurde wie folgt begründet [35]:

- Der Marshall Test belastet den gesamten Probekörper. Im Gegensatz dazu wird beim Versuch nach der Hubbard – Field Methode nur der Außenrand des Probekörpers belastet. Dadurch könnte es zu unterschiedlichen Versuchsergebnissen bei Probekörpern aus identischem Material kommen, weil zentral im Probekörper liegende Gesteinskörner keine Belastung erfahren.
- Die zum Hubbard – Field Test benötigten Geräte sind schwer, voluminös und daher nur für den Laborgebrauch geeignet. Die Geräte der Marshall Methode sind leichter, kompakter, daher einfacher zu transportieren. Außerdem kann die bei der Versuchsdurchführung erforderliche Last mit einer einfachen Kurbel aufgebracht werden.
- Tests können schneller und mit weniger Aufwand durchgeführt werden.

- Die entstehende Dichte, der mit der Marshall Methode hergestellten Probekörper, entspricht genauer jener der im eingebauten Zustand erhaltenen Dichte, als bei der Hubbard – Field Methode. Dadurch wird der benötigte Bindemittelgehalt genauer bestimmt.

### **Entwicklung der gebrauchungsverhaltensorientierten Bitumen- und Asphaltprüfung**

Das Ziel gebrauchungsverhaltensorientierter (GVO) Laborversuche ist, die vorherrschenden in situ Bedingungen in Hinblick auf die Belastungs-, Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse so gut wie möglich zu simulieren. Grundsätzlich ist dabei zwischen jenen Prüfungen, die sich ausschließlich auf die Eigenschaften des Bindemittels beschränken, und jenen, die an Asphalten durchgeführt werden zu unterscheiden [36]. 1987 rief der US Kongress das 'Strategic Highway Research Program' kurz SHRP, ein Straßenforschungsprogramm ins Leben, das das Ziel hatte GVO – Prüfmethode zu entwickeln.

Die normgemäße Beurteilung der Bindemittelleigenschaften erfolgt in Österreich und Europa mittels konventioneller Prüfmethode wie Penetration [37], Erweichungspunkt Ring und Kugel [38] und Brechpunkt nach Fraaß [39]. Diese lassen zwar indirekt Rückschlüsse auf das Gebrauchsverhalten des Bindemittels zu, begründen diese aber nicht mit aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten ableitbaren Kennwerten. Die im Rahmen von SHRP entwickelten Prüfmethode bieten Möglichkeiten zur Bestimmung gebrauchungsverhaltensorientierter Materialparameter, basierend auf physikalischen Kenngrößen des Materials. [40]:

#### SUPERPAVE Mix Design

Aus dem Forschungsprogramm SHRP ging 1994 die SUPERPAVE Mix Design Methode hervor. ('Superior Performing Asphalt Pavements', d.h. 'Asphaltdecken mit besserem Gebrauchsverhalten' [41]). Die SUPERPAVE-Asphaltbemessung sieht abhängig von der Verkehrsbelastung verschiedene Bemessungsstufen vor:

- SUPERPAVE Stufe 1: Volumetrische Bemessung  
Bemessung charakteristischer Eigenschaften des Asphalts, die am Gebrauchsverhalten orientiert sind. Die volumetrische Bemessung ist stets, d. h. bei jeder Asphalteignungsprüfung durchzuführen.
- SUPERPAVE Stufe 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Bemessung  
Bemessung wie bei Stufe 1, zusätzlich erfolgen einige Prüfungen, mit denen die Dauerhaftigkeit gegenüber bleibenden Verformungen, Ermüdung und Tieftemperaturrissen nachgewiesen wird.

#### Die Situation in Österreich

Ähnlich wie beim SUPERPAVE gibt es in Österreich zwei Ansätze – den empirischen und den GVO Ansatz:

- Empirischer Ansatz:  
In der Normungsreihe ÖNORM B 358x-1 werden die empirischen Anforderungen der Normungsreihe ÖNORM EN 13108-x umgesetzt.
- GVO Ansatz:  
In Normungsreihe ÖNORM B 358x-2 werden die GVO Anforderungen der Normungsreihe ÖNORM EN 13108-x umgesetzt und diese ist (Normungsreihe ÖNORM B 358x-2) ist seit 2006 in Kraft.



## 3.2 Ermittlung des optimalen Bindemittelgehalts [27]

### Hohlraumtheorie

Die Hohlraumtheorie besagt, dass der Bindemittelgehalt des Asphaltmischguts in einem ganz bestimmten Verhältnis zum Hohlraumgehalt der Mineralstoffe im eingebauten Zustand stehen muss. Die Menge des Bindemittels ist dann optimal, wenn alle Körner des Korngerüsts vollständig mit Bindemittel umhüllt sind und der durch die Verdichtung minimierte Hohlraum des Korngerüsts durch das Volumen des eingebrachten Bitumens auf einen Hohlraum von ca. 2 – 5 Vol.% reduziert wurde [36].

Es gilt folgendes: Je größer das maximale Korn in dem Gemisch ist, desto kleiner ist der Hohlraumgehalt des Gesteinsgerüsts  $H_{M,bit}$ . Das Volumen, das dem von dem Größtkorn abgeleiteten  $H_{M,bit}$ -Wert entspricht, ist bis auf den Resthohlraumgehalt mit Bitumen zu verfüllen. Wenn also von dem  $H_{M,bit}$ -Wert der verlangte Resthohlraumgehalt abgezogen wird, erhält man den erforderlichen Bindemittelgehalt in Vol.-%. In Österreich erfolgt wie in vielen anderen europäischen Ländern die Bindemittelbemessung von Asphalten nach der Hohlraumtheorie.

### Oberflächentheorie

Die Oberflächentheorie setzt voraus, dass alle Mineralkörner mit einer bestimmten Dicke an Bindemittel umhüllt sein müssen. Somit lässt sich aus der Kornoberfläche und der Schichtdicke der benötigte Bindemittelanteil des Mischguts ableiten. Die praktische Anwendung dieser Theorie ist allerdings aus mehreren Gründen problematisch: Die Dicke des Bindemittelfilms, welcher das Gesteinskorn umhüllt, ist abhängig von der Korngröße und dem Chemismus des Gesteinsmaterials. Die ermittelte Bindemittelmenge kann daher nur als ungefähre Anhaltspunkt gelten und bedarf grundsätzlich eines Korrekturfaktors, der die Mikrogestalt der Kornoberflächen und die Mineralstoffart berücksichtigt. In einer verdichteten hohlraumarmen Asphaltmischung kommt es außerdem zu zahlreichen Berührungspunkten zwischen benachbarten Mineralkörnern. An diesen Berührungspunkten ist allenfalls nur ein sehr dünner Bindemittelfilm vorhanden [36].

### Mörteltheorie

Die Mörteltheorie geht vom so genannten Bindemittelmörtel aus. Dieser besteht aus dem Bindemittel, dem Füller und dem Feinsand des Mischgutes. Der Mörtel soll die Hohlräume, die zwischen den größeren Mineralstoffkörnern verbleiben, weitgehend auffüllen und auch bei höheren Temperaturen immer eine ausreichende Zähigkeit aufweisen. Die Bindemittelbemessung nach dieser Methode hat aber keine weite Verbreitung gefunden, weil die Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten bei der experimentellen Ermittlung der dichtesten Kornpackung des füller- und feinsandreichen Mineralstoffgemisches zu groß sind [36].

### Methode des Stabilitätsmaximums

Bei der Methode des Stabilitätsmaximums wird derjenige Bindemittelgehalt als Optimum angesehen, bei dem das Mischgut im verdichteten Zustand einen besonders hohen Verformungswiderstand aufweist. Der Widerstand gegen Verformung kann dabei auf verschiedene Arten ermittelt werden [36].

### 3.3 Rezepturoptimierung von Asphaltmischgütern [27]

Bei der Rezepturoptimierung von Asphaltmischgütern wird grundsätzlich zwischen zwei Arten von Methoden unterschieden – empirische und analytische Methoden. Dabei kommen unterschiedliche Theorien (Kapitel 3.2) zur Ermittlung des optimalen Bindemittelgehalts zur Anwendung.

#### 3.3.1 Empirische Methoden

Als empirisch bezeichnet man eine Vorgehensweise, die nicht auf theoretischen Begründungen, sondern auf nachvollziehbaren Erfahrungen, bzw. messbaren Beobachtungen sowie statistischen Auswertungen beruht. Dieser Ansatz kann wie in Abbildung 2 dargestellt werden.

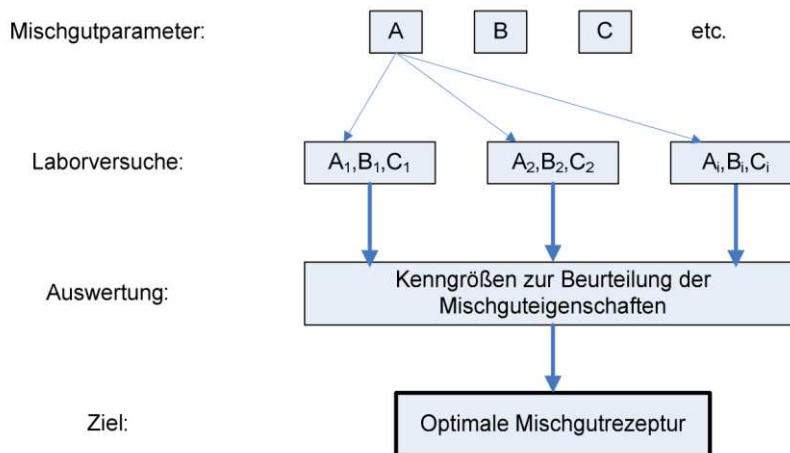


Abbildung 2: Empirische Methode des Asphalt Mix Design [27, 42]

Wichtige empirische Verfahren sind das Hveem- und Marshall-Verfahren, beide in den USA entwickelt.

#### 3.3.2 Analytische Methoden

Die analytische Mix Design Methode erlaubt die volumenbezogene Berechnung der Mischgutzusammensetzung (Sieblinie, Bindemittelgehalt, Hohlraumgehalt). Den Ablauf der analytischen Methode kann man wie in Abbildung 3 darstellen:

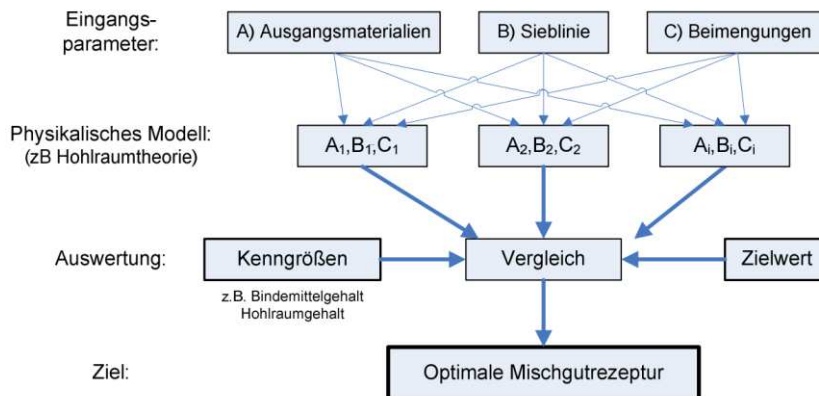


Abbildung 3: Analytische Methode des Asphalt Mix Design [27]

Bei der analytischen Methode des Asphalt Mix Design wird üblicherweise eine Bemessungssoftware angewandt.

### 3.4 Richtlinien für Gussasphalt

#### 3.4.1 Österreich

In RVS 08.97.05 [43] sind die Anforderungen für die verschiedenen Asphaltmischgüter gemäß EN 13108-6 „Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt“ und ÖNORM B 3585-1 „Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Gussasphalt – Teil 1: Empirische Anforderungen“ für Österreich zu finden. Das betrifft die Bindemittelgehalt und Bindemittelart, die Anwendung von Zusätzen, Gesteinskörnung, Korngrößenverteilung und Hohlraumgehalt. In diesem Kapitel werden nur die Anforderungen für die Gussasphaltmischgüter erläutert. Das sind die Gussasphaltmischgüter mit Größtkorn 4 mm (MA 4), 8 mm (MA 8) und 11 mm (MA 11).

##### **Bindemittel**

Zulässige Bitumenarten für den Gussasphalt sind:

- Straßenbaubitumen (20/30, 50/70 und 70/100)
- Oxidationsbitumen (90/10)
- Polymermodifiziertes Bitumen (PmB 25/55-65, PmB 45/80-65, PmB 45/80-75)

##### **Bindemittelgehalt**

Als Anforderungen für den Bindemittelgehalt für den Gussasphalt ist der Mindestbindemittelgehalt ( $B_{\min}$ ) angegeben.  $B_{\min}$  ist 6,0 M%

##### **Zusätze**

Die Verwendung von Zusätzen mit oder ohne modifizierende Wirkung auf das Bitumen ist zulässig.

##### **Gesteinskörnung**

Die zulässigen Gesteinsklassen sind GS, G1, G2 und G3. Das sind die Gesteinsklassen mit den höchsten Anforderungen. Das heißt, dass für Gussasphalt nur Kantkorn von höchster Qualität vorgesehen ist.

In Abbildung 4 sind die Grenzsieblinien für die drei Gussasphaltmischgüter zu sehen.

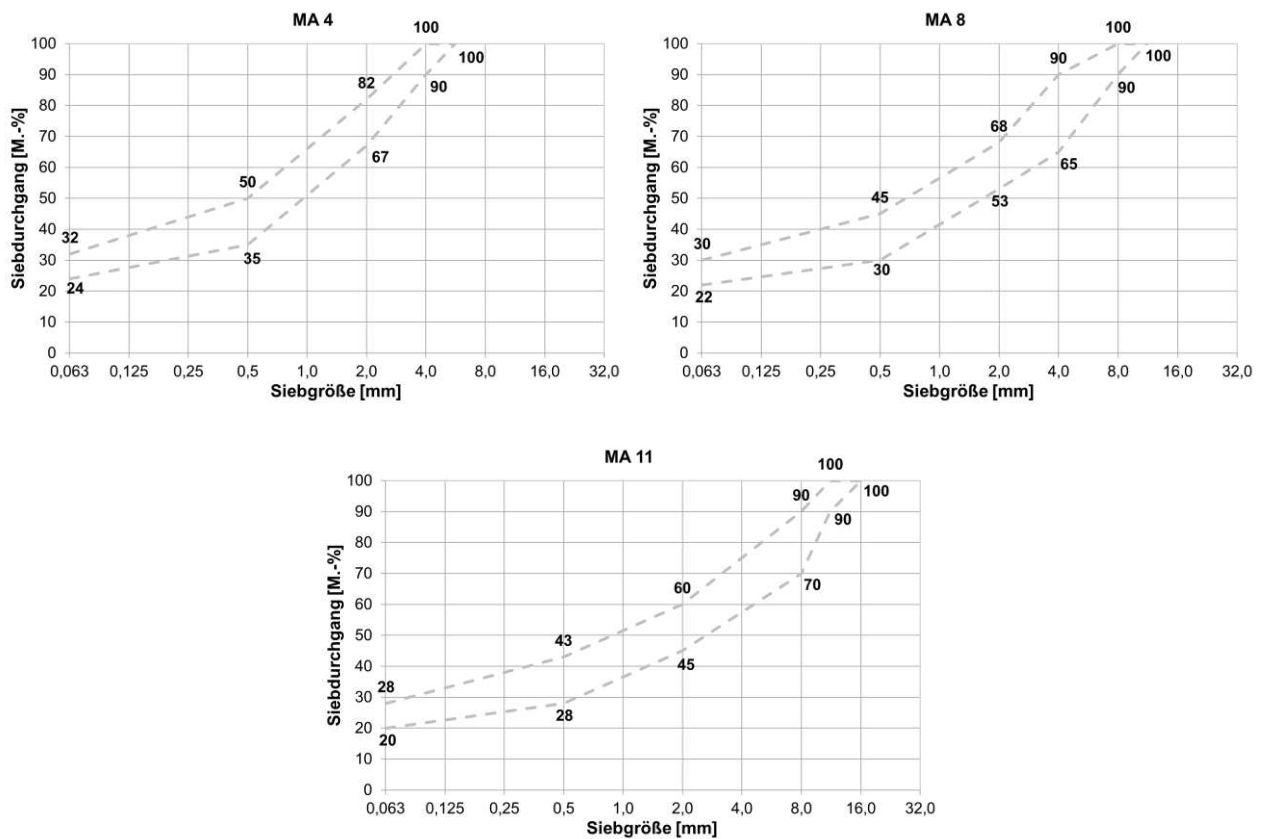


Abbildung 4: Grenzsieblinien für die Gussasphaltmischgüter MA 4, MA 8 und MA 11 nach RVS 08.97.05 [43]

### 3.4.2 Deutschland

In der FGSV 797 [44] sind die Anforderungen für die verschiedenen Asphaltmischgüter gemäß EN 13108-6 für Deutschland zu finden. Das betrifft die Bindemittelgehalt und Bindemittelart, die Anwendung von Zusätzen, Gesteinskörnung, Korngrößenverteilung und Hohlraumgehalt. In diesem Kapitel werden wie im vorherigen Kapitel nur die Anforderungen für die Gussasphaltmischgüter erläutert. Das sind die Gussasphaltmischgüter mit Größtkorn 5,6 mm (MA 5), 8 mm (MA 8) und 11 mm (MA 11).

#### Bindemittel

Zulässige Bitumenarten für den Gussasphalt sind:

- Straßenbaubitumen (20/30 und 30/45)
- Oxidationsbitumen: In FGSV 797 ist kein Oxidationsbitumen für die Anwendung beim Gussasphalt vorgesehen.
- Polymermodifiziertes Bitumen (PmB 10/40-65 und PmB 25/55-55)

#### Bindemittelgehalt

Als Anforderungen für den Bindemittelgehalt für den Gussasphalt ist der Mindestbindemittelgehalt ( $B_{\min}$ ) angegeben.  $B_{\min}$  für MA 11 ist 6,8 M%, für MA 8 und MA 5 - 7,0 M%.

## Zusätze

Es dürfen geeignete viskositätsveränderte Bindemittel und viskositätsverändernde Zusätze verwendet werden, die eine Reduzierung der Temperatur beim Herstellen und Verarbeiten ermöglichen. [44]

## Gesteinskörnung

Die Anforderungen für die Gesteinskörnung an Gussasphalt (Anteil gebrochener Kornoberflächen, Widerstand gegen Zertrümmerung und Widerstand gegen Polieren) sind dieselben wie an Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten. Das heißt, dass für Gussasphalt Kantkorn von hoher Qualität vorgesehen ist.

In Abbildung 5 sind die Grenzsieblinien für die drei Gussasphaltemischgüter zu sehen.

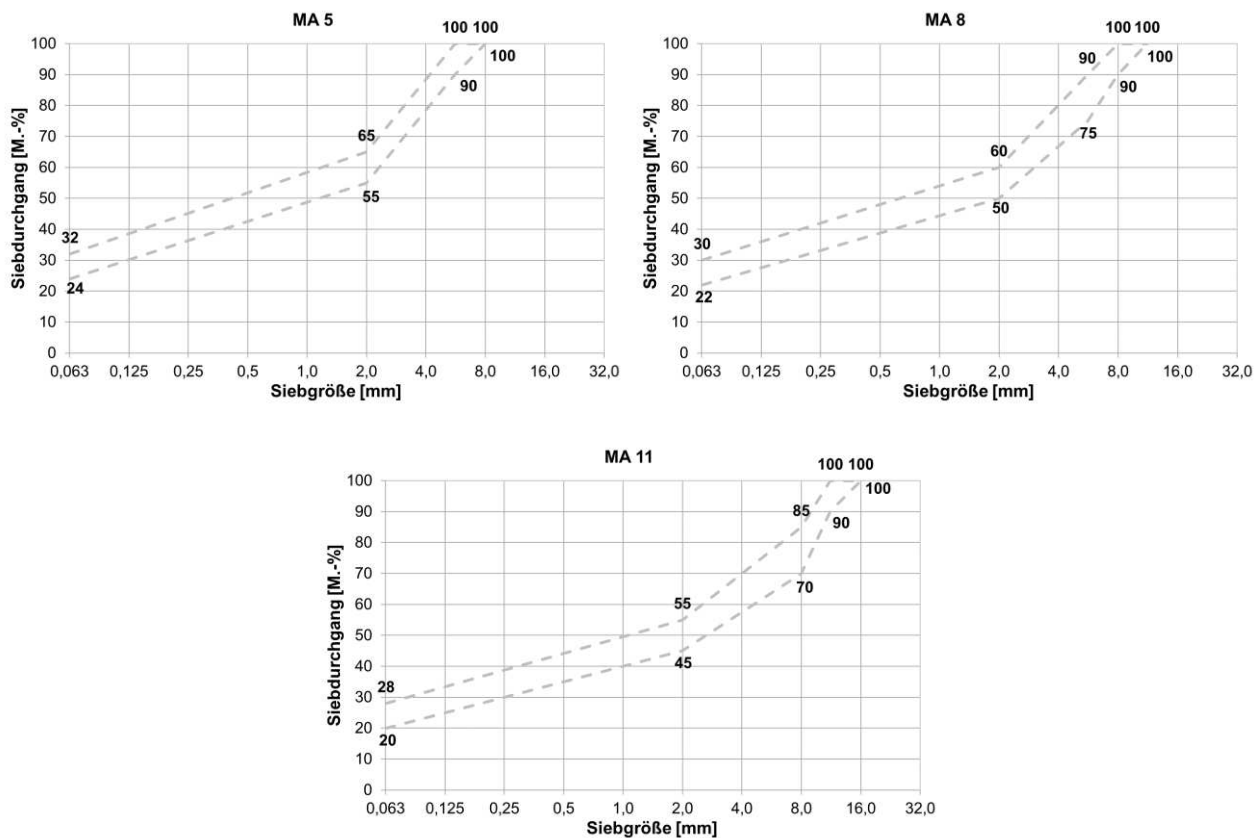


Abbildung 5: Grenzsieblinien für die Gussasphaltemischgüter MA 5, MA 8 und MA 11 nach FGSV 797 [44]

In Abbildung 6 sind die Grenzsieblinien von beiden Richtlinien [43, 44] zusammengestellt. Im Diagramm oben links sind die Grenzsieblinien von MA 4 und MA 5, oben rechts von MA 8 und unten MA 11 zu sehen. Zwischen den jeweiligen Mischgütern sind die Füllergehalte gleich. Im Allgemeinen sind die FSV Grenzsieblinien breiter als die FGSV Grenzsieblinien angegeben. Für MA 8 und MA 11 ist die obere Grenzsieblinie von FSV feiner und die untere grober als diese gemäß FGSV.

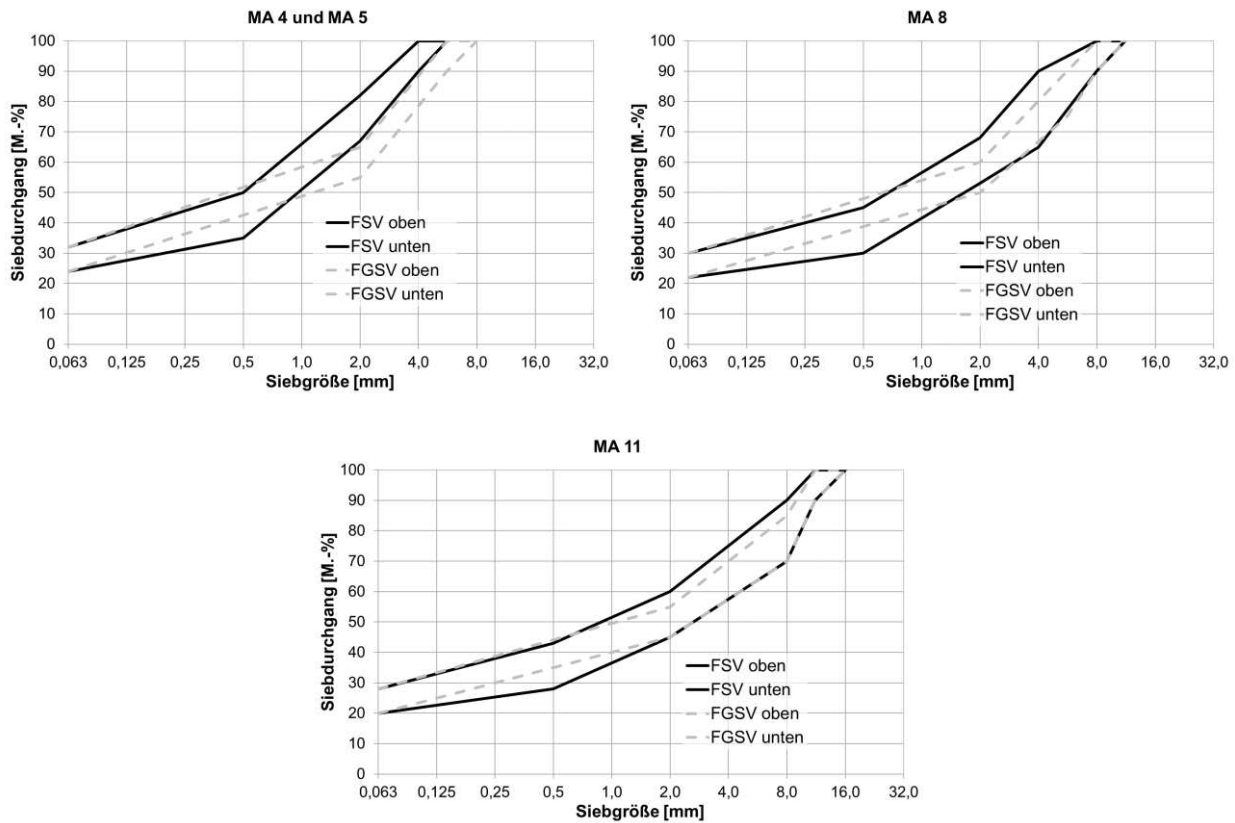


Abbildung 6: Grenzsieblinien: FSV und FGSV Vergleich [43, 44]

### 3.5 Rezepturkonzepte von Gussasphaltemischgütern

#### 3.5.1 Bindemittelart und Bindemittelloptimierung

In [45] wurde für die Verformungseigenschaften der untersuchten Gussasphalte festgestellt, dass durch den Austausch der Bindemittelkomponente – bei gleichbleibender Korngrößenverteilung und konstantem Bindemittelgehalt – die härteren Straßenbaubitumen (20/30 und 30/45 + „trinidad lake asphalt“ (TLA)) wie erwartet sehr gute Verformungseigenschaften zeigen. Dasselbe Erkenntnis wird auch in [46] betrachtet. Die Zugabe von TLA hat einen versteifenden Effekt und je mehr TLA zugegeben wird, desto mehr nimmt die Verformungsbeständigkeit zu [45, 47, 48].

Das Kälteverhalten der in [45] untersuchten Gussasphalte wurde durch die Verwendung von polymermodifizierten Bindemitteln günstig beeinflusst. Die Modifizierung mit TLA hatte dagegen zu einer niedrigeren Rissbeständigkeit geführt.

In [49] wurde zur Herstellung von Gussasphalt MA 9,5 ein mit SBS modifiziertes Bitumen mit TLA gemischt. Die Vorteile von Polymermodifikation wurden nicht gefunden, was zu der Frage führt, ob ein PmB zur Herstellung von Gussasphalt verwendet werden soll. Es wird darauf hingewiesen, dass Gussasphalt MA 9,5 mit Bitumen 20/40 mit 30 M% TLA beste Eigenschaften im Rahmen des Prüfprogramms hinsichtlich der Penetration [37], Erweichungspunktes RuK [38], Duktilität des Bitumens [50] und komplexer Schubmodul des Mastix [51] liefert.

Mit dem Ziel zur Optimierung der Beständigkeit bei hohen Temperaturen von Gussasphalt, wurden in [52] ein mit SBS modifiziertes Bitumen (PmB 40-60/60), TLA und „NES-1 rock asphalt“ (NES-1) unterschiedlich variiert und kombiniert. NES-1 ist ein Bitumenzusatz, der zum größten Teil aus „Qingchuan natural

rock asphalt“ besteht [53]. Das Prüfprogramm beinhaltet die Prüfmethode Bestimmung der Penetration [37], des Erweichungspunktes RuK [38], der Duktilität [50] und der Viskosität [54]. Auf Basis des Prüfprogramms und der Ergebnisse wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- NES-1 hat mehr Einfluss auf die Verbesserung der Beständigkeit bei hohen Temperaturen als TLA.
- Damit die notwendige Verarbeitbarkeit und Beständigkeit bei niedrigen Temperaturen erreicht wird, sollen die Konzentrationen an NES-1 und TLA jeweils die Werte 5 M% und 30 M% (bezogen auf die Masse des Mischguts) nicht überschreiten.
- Die Bitumenart hat signifikanter Einfluss auf das Verhalten von Gussasphalt MA 10 bei hohen Temperaturen. Die aktuelle Studie empfiehlt ein Bindemittel mit 75 M% PmB, 20 M% TLA und 5 M% NES-1

Unter dem Einsatz von GVO Prüfmethode für Gussasphalt zeigen die Ergebnisse in [2] einen versteifenden Effekt bei der Zugabe von TLA, der mit dem Einsatz von PmB im Gegensatz zu [49] verbessert wird. Das Prüfprogramm besteht aus insgesamt 18 modifizierten und unmodifizierten Bitumen:

- Die Zugabe von TLA zu dem unmodifizierten Bitumen führt zu Reduktion der Penetration und Zunahme bei dem Erweichungspunkt RuK und bei der Viskosität.
- Die Zugabe von TLA zu dem PmB führt zu Reduktion sowohl bei der Penetration als auch bei dem Erweichungspunkt RuK. Der Effekt auf die Viskosität ist nicht eindeutig.
- Die rheologische Analyse liefert Erklärung zu diesem Verhalten:
  - Mit dem unmodifizierten Bitumen führt die Zugabe von TLA zu Zunahme des komplexen Schubmoduls ( $G^*$ ) und Reduktion des Phasenverschiebungswinkels ( $\delta$ ), was eine bessere elastische Reaktion bedeutet.
  - Mit dem PmB führt die Zugabe von TLA zu Zunahme des Phasenverschiebungswinkels ( $\delta$ ) und Zunahme des  $G^*$  unter 60 °C, aber Reduktion über 60 °C.
- Spurbildungstests bei 70 °C und Biegeversuche bei -10 °C zeigen klar die Vorteile vom PmB (mit oder ohne TLA).

### 3.5.2 Bindemittelgehalt

In [55] wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Bindemittelüberschüsse auf die Verarbeitbarkeit, die Verformungsbeständigkeit und das Kälteverhalten von Gussasphalten untersucht und analysiert. Die Korngrößenverteilung (Abbildung 7) wurde konstant gehalten und der Bindemittelüberschuss von 0 Vol.-%, 1 und 2 Vol.-% variiert. Zwei Arten Destillationsbitumen 70/100 und 20/30 kamen zum Einsatz.

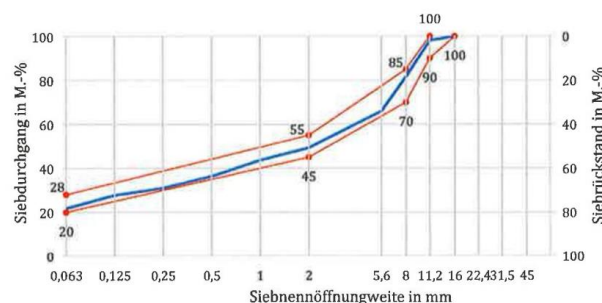


Abbildung 7: Korngrößenverteilung MA 11 S [55]

Die Verarbeitbarkeit der hergestellten Gussasphalte wurde durch ein Laborverfahren mit Hilfe des Hägermannsches [56] geprüft. Der Widerstand gegen bleibende Verformungen wurde mithilfe der statischen Stempeleindringtiefe [57] geprüft. Die Resistenz gegen Rissbildungen als Folge thermisch induzierter Zugspannungen wurde über den Abkühlversuch TSRST [58] an zylindrischen Probekörpern geprüft.

Damit der Bindemittelüberschuss ermittelt werden konnte, wurde zuerst die Rütteldichte des Gesteinskörnungsgemisches nach Rubach [59] durchgeführt. Die Autoren weisen darauf hin, dass in Hinsicht auf die Verarbeitbarkeit die Gussasphalte mit steigendem Bindemittelüberschuss bei gleichbleibender Temperatur erwartungsgemäß besser zu verarbeiten sind und die Verformungsbeständigkeit abnimmt.

Bezüglich der Beständigkeit bei tiefen Temperaturen erreichen die Gussasphaltemischgüter mit dem niedrigviskosen Bitumen 70/100 niedrigere Bruchtemperaturen. Die unterschiedlichen Bindemittelüberschüsse hatten keine Auswirkung auf die Prüfergebnisse. Bei den Gussasphaltemischgütern mit dem hochviskosen Bitumen 20/30 wird aber eine deutliche Reduzierung der Kältebeständigkeit beobachtet.

Im Rahmen von [55] lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass für höherviskose Bitumen ein Bindemittelüberschuss von etwa 1,0 Vol.-% bei 25 °C empfehlenswert ist.

Zur Bestimmung des optimalen Bindemittelgehaltes wurde in [49, 60] die Verarbeitbarkeit und die Beständigkeit bei hohen und niedrigen Temperaturen von MA 11 Gussasphalt untersucht. Das Ergebnis ist ein optimaler Bindemittelgehalt von jeweils 8,75 M% [49] und 8,2 M% [60].

In [46] wurde für MA 16 ein optimaler Bindemittelgehalt von 7,0 M% ermittelt. Dieser optimale Bindemittelgehalt wurde dann als etwas zu niedrig für den Einbau auf der Baustelle angesehen. Bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse hat sich jedoch gezeigt, dass sich bei Zugrundelegung der Mischungen mit einem jeweils um 0,6 M% höheren Bindemittelgehalt keine andere Bewertung der untersuchten Einflußkriterien ergibt. Somit haben die in [46] getroffenen Feststellungen auch bei bindemittelreicheren Mischungen mit einer für die Praxis annehmbaren Verarbeitbarkeit volle Gültigkeit.

In [47-49] wurde darauf hingewiesen, dass der Bindemittelgehalt wie erwartet einen starken Einfluss auf das Gebrauchsverhalten vom Gussasphalt hat. Mit der Zunahme des Bindemittelgehaltes steigt die Fließfähigkeit, die Eindrucktiefe und die maximale Zugfestigkeit, während die Biegesteifigkeit und die Verformungsbeständigkeit abnehmen. Das alles ist unabhängig von der Sieblinie.

### 3.5.3 Füllergehalt und Sieblinie

In [45] wurden zwei Füller zur Herstellung von MA 8 verwendet, die sich in ihren Feinanteilen unterscheiden. Der feinere Füller hat versteifende Eigenschaften bei den untersuchten Gussasphaltemischgütern.

In [61] wurden die Füllersorte, die Kornverteilung im Sandbereich und das Natursand-Brechsand Verhältnis variiert. Die Auswertung ergab, dass der Art der verwendeten Sande (Natursand, Brechsand und Korngrößenverteilung im Sandbereich) im Gegensatz zu der Füllersorte keine große Bedeutung zukommt, bezogen auf das Merkmal dynamische Eindringtiefe  $ET_{dyn}$ .

In [60] wird Gussasphalt MA 11 auf der Grundlage von Ausgangsrezepturen des Industriepartners optimiert. Kennzeichnend für den Gussasphalt MA11 ist eine Bindemittelmischung aus einem PmB 25/55-55 und einem Oxidationsbitumen 90/10. Die Sieblinien der Mischungen befinden sich im mittleren Bereich der vorgegebenen Grenzen der RVS 08.97.05 [43], mit der Tendenz zu größerer Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches (Abbildung 8).



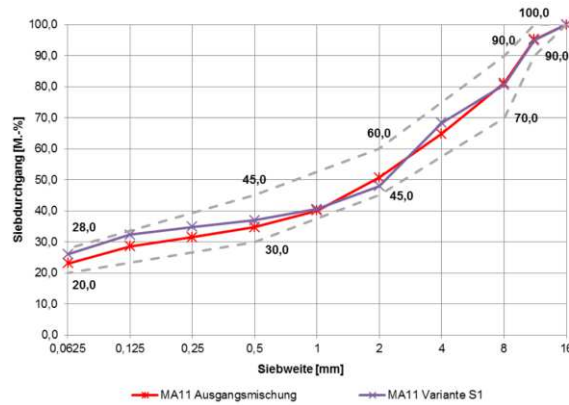


Abbildung 8: MA 11 Ausgangssieblinie (rot) und optimierte Sieblinie (lila) [60]

Die optimierte Sieblinie des Gussasphaltes MA11 ist so angepasst, dass ein höherer Füllergehalt unter Verwendung von Kalksteinmaterial erzielt wird. Im Splittbereich wird die Sieblinie der Ausgangsmischung beibehalten. Die Änderungen in der Sieblinie haben einen positiven Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und auf das Gebrauchsverhalten bei hohen und niedrigen Temperaturen.

In [46] wurden folgende Komponente beim Gussasphalt MA 11 variiert:

- Verhältniss Brechsand/Natursand (1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1)
- Füllergehalt (ca. 20, 23 und 26 M%)
- Splittgehalt (ca. 40, 48 und 55 M%)

Mit steigendem Brechsandanteil wird sowohl die Gesamteindringtiefe nach 3h als auch die Eindringtiefezunahme mittels der statischen Stempeleindringtiefe [57] in den beiden letzten Stunden geringer. Die Ergebnisse vom Spurbildungstest [62] zeigen, dass die Standfestigkeit mit steigendem Füllergehalt erhöht wird. Es wurde auch festgestellt, dass mit steigendem Splittgehalt die Spurtiefe deutlich abnimmt und die Verarbeitbarkeit verbessert wird. Hinsichtlich der Ergebnisse vom Spurbildungstest [62] und statischer Stempeleindringtiefe [57] in [46] wurde die Rezeptur in Tabelle 1 empfohlen.

Tabelle 1: Empfohlene Rezeptur [46]

	M%
Bindemittel B 25	7,0
Kalksteinmehl	27
Natursand 0/2	17
Edelsplitt 2/5	18
Edelsplitt 5/8	13
Edelsplitt 8/11	10
Edelsplitt 11/16	15

In Abbildung 9 ist die Soll – Sieblinie [46] mit den Grenzsieblinien für MA 11 von FSV (links) und FGSV (rechts) dargestellt.

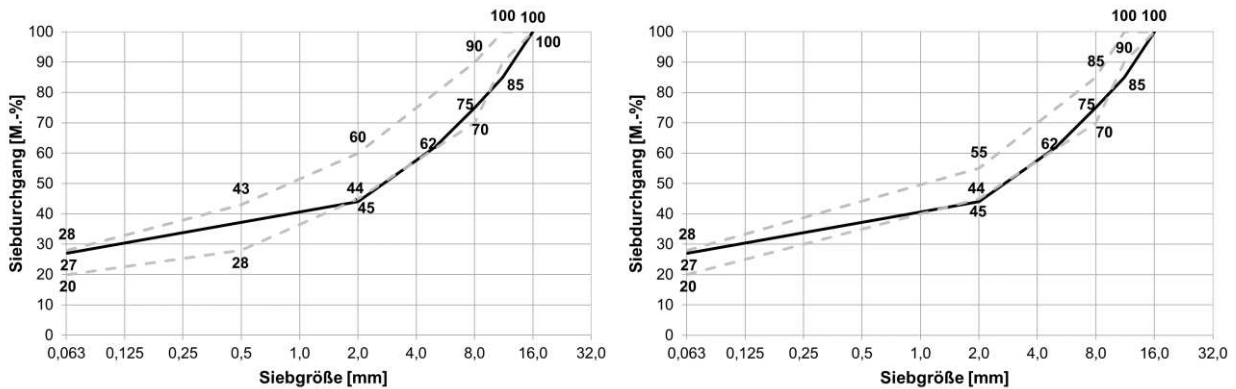


Abbildung 9: Soll – Sieblinie MA 16; Grenzsieblinien MA 11 FSV (links) und FGSV (rechts)

In [63] wurde festgestellt, dass die Zunahme des Füllergehaltes eine Zunahme der Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung bedeutet. Die Autoren berichten darüber hinaus, dass ein physiochemischer Zusammenhang zwischen Füller und Bitumen existiert und die Füllerarten, die die Steifigkeit des Mischguts beeinflussen, beeinflussen auch die Verarbeitbarkeit und die Beständigkeit bei niedrigen Temperaturen.

Laut [47] hat nicht nur der Füllergehalt sondern auch die gesamte Sieblinie einen großen Einfluss auf das Gebrauchsverhalten vom Gussasphalt MA 9,5. Es wurden drei unterschiedliche Sieblinien in Hinsicht auf ihr Fließverhalten (Lueer fluidity test), Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung und Beständigkeit gegen tiefe Temperaturen untersucht. In Abbildung 10 sind die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen zu sehen. Das Mischgut mit der mittleren Sieblinie hat die niedrigste Sensibilität gegen Änderungen im Bindemittelgehalt und die grobe Sieblinie die höchste Sensibilität. Darüber hinaus sind die Mischgüter mit der mittleren Sieblinie passender in Hinsicht auf die Qualitätskontrolle während der Produktion. Im Allgemeinen ist die dynamische Stabilität von der groben und mittleren Sieblinie größer als von der feinen Sieblinie. Die maximale Zugfestigkeit der Mischgüter mit der mittleren Sieblinie ist höher als mit der groben Sieblinie.

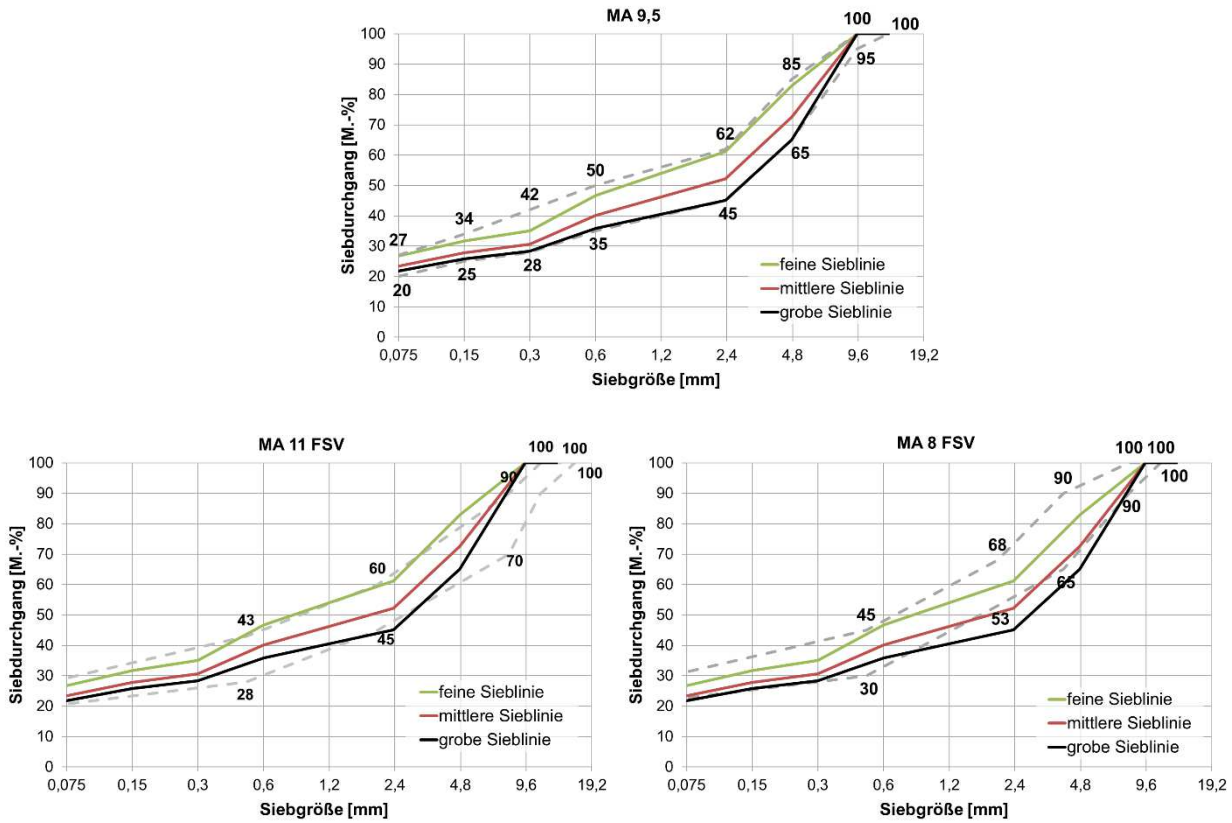


Abbildung 10: Soll – Sieblinie MA 9,5 und Grenzsieblinien nach [47] (oben mittig); Soll – Sieblinie MA 9,5 und Grenzsieblinien für MA 11 laut FSV (unten links); Soll – Sieblinie MA 9,5 und Grenzsieblinien für MA 8 laut FSV (unten rechts)

In [64] wurde festgestellt, dass die feinere Sieblinie zu besserem Gebrauchsverhalten bei tiefen Temperaturen führt. Das kann weiter verbessert werden, wenn der Siebdurchgang durch Siebe 1.18 mm und 2.36 mm ähnlich ist [64]. In Abbildung 11 sind die untersuchten Sieblinien zu sehen.

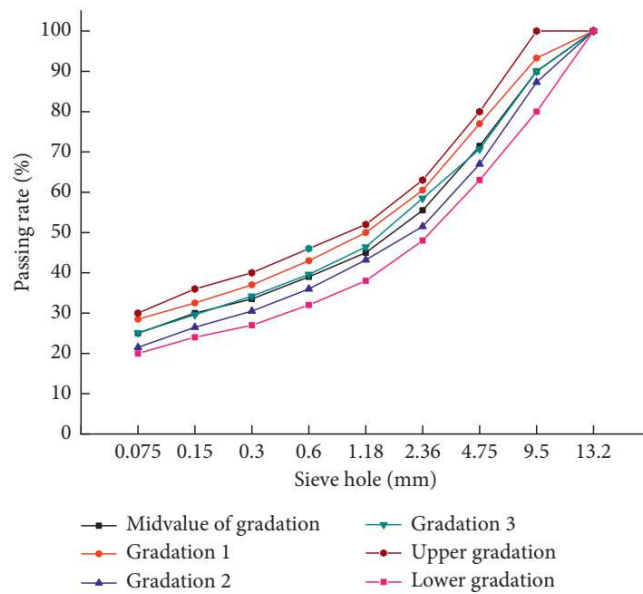


Abbildung 11: Sieblinien [64]

In [45] wurde die Korngrößenverteilung in Tabelle 2 als Ergebnisse vom Prüfprogramm zu Standfestigkeit, Kälteverhalten und Verarbeitbarkeit empfohlen.

Tabelle 2: Empfohlene Korngrößenverteilung gemäß [45]

	Korngruppe	M%
Füller		24
Natursand	0,09-0,25	4,2
	0,25-0,71	11,3
	0,71-2,0	4,5
Brechsand	0,09-0,25	2,7
	0,25-0,71	1,9
	0,71-2,0	4,4
Splitt	2,0-5,0	25,3
	5,0-8,0	21,7

In Abbildung 12 ist die empfohlene Sieblinie mit den Grenzsieblinien für MA 8 laut FSV (links) und FGSV (rechts) dargestellt.

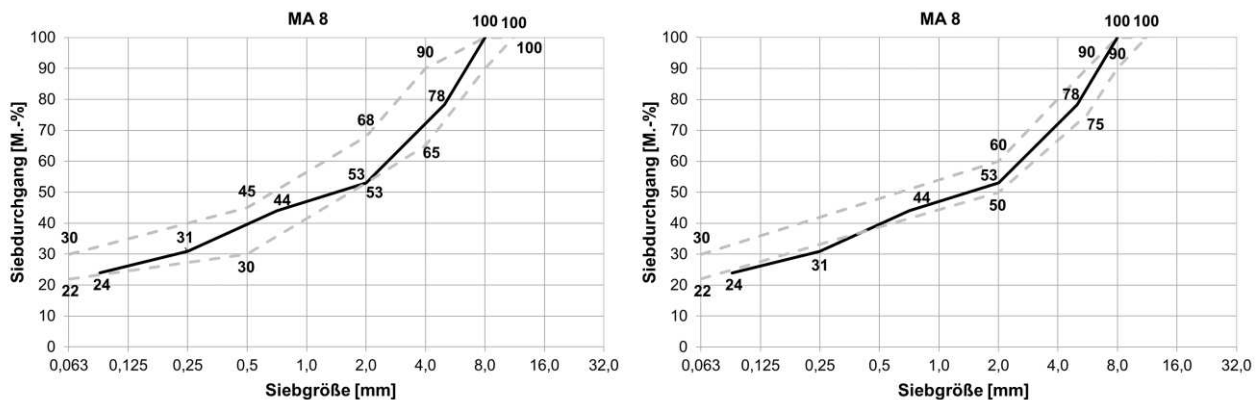


Abbildung 12: Soll – Sieblinie [45] und Grenzsieblinien nach FSV (links) und FGSV (rechts)

### 3.5.4 Verweildauer

In [47] und [48] wird darüber berichtet, dass eine Verbesserung der Beständigkeit bei hohen Temperaturen, ohne die Verarbeitbarkeit und die Rissbeständigkeit zu beeinflussen, mit einer Mischzeit im Kocher von 3 Stunden erreicht wird.

In [45] wurde die Mischzeit im Labormischer variiert und dann ihr Einfluss auf das Mischgut untersucht. Eine Verlängerung der Verweilzeit von 15 auf 90 min hatte für die Ergebnisse des statischen Stempelindringversuches [57] nahezu keinen, für die Ergebnisse des Spurbildungsversuches [62] jedoch einen deutlich positiven Einfluss. Lange Verweilzeiten besitzen einen nachteiligen Einfluss auf das Kälteverhalten der Gussasphalte.

In [46] wurde der Effekt von der Verweildauer zwischen Labor und Feld auf das Mischgut analysiert. Der Erweichungspunkt RuK [38] ist beim Laborversuch ( $\Delta \text{RuK} = 14 \text{ °C}$  nach 2 Stunden Mischzeit im Labormischer) stärker angestiegen als bei Praxisversuch ( $\Delta \text{RuK} = 11 \text{ °C}$  nach 9 Stunden Mischzeit im mobilen Kocher), was mit dem Zeitraffereffekt erklärt wird.

### 3.6 Rezepturkonzepte im Rahmen der gegenständlichen Doktorarbeit

Im Prüfprogramm von Kapitel 5 wurden MA 11, MA 8 und zwei MA 4 Gussasphalte optimiert. Die Rezepturen von MA 11, MA 8 und beide MA 4 sind auf der Grundlage von langjähriger Praxiserfahrung des Industriepartners optimiert.

Im Rahmen des Prüfprogramms wurden folgende Parameter variiert:

- Bindemittelart
- Bindemittelgehalt
- Additive
- Füllergehalt
- Kornform
- Größtkorn

Der Effekt von der Parametervariation wurde auf Bitumen und Asphaltenebene untersucht. Es wurde die Verarbeitbarkeit, die Beständigkeit bei hohen und tiefen Temperaturen geprüft und Korrelationen zwischen beiden Ebenen (Bitumen und Asphalt) berechnet (siehe Kapitel 5 und 6).

### 3.7 Zusammenfassung Literaturrecherche

In Bezug auf die Literaturrecherche kann zusammengefasst werden, dass durch den Austausch der Bindemittelkomponente – bei gleichbleibender Korngrößenverteilung und konstantem Bindemittelgehalt – die härteren Bitumensorten wie erwartet sehr gute Verformungsbeständigkeit bei hohen Temperaturen und niedrige Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen zeigen.

In Hinsicht auf den optimalen Bindemittelgehalt ist es vorteilhaft mit dem Bindemittelüberschuss zu arbeiten. Für höherviskose Bitumen ist ein Bindemittelüberschuss von etwa 1,0 Vol.-% bei 25 °C empfehlenswert.

Wenn die Sieblinie berücksichtigt wird, dann können die Verarbeitbarkeit und das Gebrauchsverhalten bei hohen und niedrigen Temperaturen stark durch die Füllersorte, den Füller- und Splittgehalt beeinflusst werden.

Die Mischguteigenschaften können zusätzlich von der Verweildauer beeinflusst werden. Lange Verweilzeiten im Gussasphaltkocher besitzen einen nachteiligen Einfluss auf das Kälteverhalten der Gussasphalte und sie sollen bis auf 3 Stunden reduziert werden. Es ist noch wichtig zu erwähnen, dass der Effekt der Verweildauer stärker im Labor als im Feld zu beobachten ist. Das wird mit dem Zeitraffereffekt erklärt.

## 4 PRÜFMETHODEN ZUR UNTERSUCHUNG DER VERARBEITBARKEIT VON GUSSASPHALT

Um eine ausreichende Viskosität für den Einbau von konventionellem Gussasphalt zu erzielen wird eine Temperatur von bis zu 250 °C benötigt. Der Transport zur Baustelle erfolgt unter ständiger Wärmezufuhr in einem liegenden oder stehenden Asphaltkocher mit Rührwerk. 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 händisch eingebaut. [65]

Ein wesentliches Kriterium für einen konventionellen oder temperaturabgesenkten Gussasphalt und Thema dieses Kapitels ist die zu gewährleistende Verarbeitbarkeit. Da es für Gussasphalt kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren gibt, wurden im Zuge dieser Dissertation zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit zwei Prüfmethoden entwickelt. Die erste Methode ist die Bestimmung des Drehmoments (auch als Mischmoment zu bezeichnen) durch die Verwendung eines großräumigen Gegenlaufzwangsmischers mit Messsystem. Das Drehmoment ist definiert als der Widerstand (Nm) des Mischguts bei der Drehbewegung des Mischwerkzeugs. Die Nachteile sind der hohe Versuchsaufwand und die Anschaffung eines kostspieligen Laborgerätes. Die zweite Methode ist die Bestimmung des Ausbreitmaßes. Dabei wurde eine modifizierte Variante des Ausbreitversuchs für Frischbeton verwendet [66]. Mit dem neu entwickelten Versuchsaufbau soll eine Verarbeitungsprüfung direkt auf der Baustelle möglich sein. Die Bestandteile sind robuster und es wird kein Laborgerät (Hägermann- Ausbreittisch) benötigt [67, 68].

Mit den verwendeten Mischgütern und Optimierungsmethoden setze ich mich im Kapitel 5 auseinander. Im gegenständlichen Kapitel 4 wird die Entwicklung der Prüfmethoden zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit präsentiert. Wichtig zu erwähnen ist die chronologische Entwicklung beider Versuchsarten. Der Versuch Ausbreitmaß für Gussasphalt wurde später als die Mischmoment-Messungen entwickelt. Es ist erst am Ende des Prüfprogramms des Kapitels 5 zu den Überlegungen gekommen, wie mit einem einfacheren Versuch die Verarbeitbarkeit bestimmt werden kann.

### 4.1 Stand der Technik

Folgende Prüfmethoden zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt sind bisher bekannt:

- Prüfung der Verarbeitbarkeit durch Messung der Eindringtiefe eines Prüfstempels in heißem Mischgut über die Zeit [69, 70]. Laut [69] hat diese Methode einen geringen Versuchsaufwand. Die hohen Temperaturverluste und das schnelle Absinken des Großkorns verfälschen aber die Ergebnisse.
- Methode zur Ermittlung des Verarbeitungsverhaltens von Gussasphalt laut Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt der FGSV (M TA 2011), [71]. Das ist eine Prüfung der Verarbeitbarkeit durch Messung des Drehmomentes eines sich in heißem Mischgut drehenden Rührers [72, 73]. Der Maßstab des Probenbehälters und des Mischwerkzeugs dieser Methode ist zu klein gewählt, um ein Durchmischen der Probe tatsächlich zu erreichen. Speziell bei niedrigeren Temperaturen kommt es bei der Methode nach M TA zu einem Schieben des Mischguts an den Wänden des Behälters und damit zur Messung der Wandreibung und nicht der Verarbeitbarkeit beim Durchmischen.
- Laborverfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt mithilfe des Hägermanns [55]. Der Aufbau der Prüfeinrichtung ist dem Aufbau zur Prüfung der Verarbeitbarkeit von Frischmörtel ähnlich [68]. Zur Anwendung ist ein Ausbreittisch (Hägermanns), eine Kupferplatte und ein Formzylinder in der Form eines Marshall Probekörpers mit einem Volumen von 729,3 cm<sup>3</sup> gekommen. Vor dem Versuch ist das Aufwärmen der Kupferplatte und des Formzylinders auf 300 °C

erforderlich. Die Mischungsmenge je Versuch beträgt 550 cm<sup>3</sup>. Die erhitzte Kupferplatte wird auf dem Ausbreittisch befestigt und sowohl der Ausbreittisch, als auch die Metallform werden mit einer Silikonwasseremulsion benetzt. Der mittig auf der Kupferplatte positionierte Formzylinder wird mit Gussasphalt gefüllt und anschließend wird der Zylinder vertikal angehoben. Nach der Durchführung von 15 Hüben in 15 Sekunden mit dem Hägermantisch kann der Durchmesser in zwei senkrecht zueinander liegenden Richtungen gemessen werden und zu einem Ausbreitmaß gemittelt werden. Der Versuch wird für verschiedene Gussasphaltmodifikationen mit einer Temperatur von 180 °C bis 250 °C durchgeführt. Über die Genauigkeit des Verfahrens kann keine eindeutige Aussage getroffen werden [70].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei neue Methoden entwickelt, die die Verarbeitbarkeit von Gussasphalt besser beschreiben sollen:

- Mischmoment – Messungen mit großräumigem Gegenlaufzwangsmischer. Die Prüfmethode ist im Detail im Kapitel 4.3.1 beschrieben.
- Ausbreitmaß für Gussasphalt. Die Prüfmethode ist im Detail im Kapitel 4.3.2 beschrieben.

## 4.2 Materialien

Basis für die Untersuchungen sind ein Gussasphalt MA 4 und ein Gussasphalt MA 8 nach ÖNORM B3585-1. Als Fremdfüller wird Kalksteinmehl eingesetzt, die Kantkörnung ist Dolomitgestein, die Rundkörnung karbonatischer Kies. Als Bindemittel kommen zwei Mischungen von 70/100 und 90/10 zum Einsatz:

- 82 M% 90/10 + 18 M% 70/100 (B529)
- 90 M% 90/10 + 10 M% 70/100 (B530)

Die Sieblinie der Mischgüter sind in Abbildung 13 dargestellt, wesentliche Bindemittelkennwerte in Tabelle 3. Bei der Substitution des Kantkorns (KK) durch Rundkorn (RK) wurde lediglich die feine und grobe Gesteinskörnung ausgetauscht. Füllerart, Füllergehalt, Bitumen und Bitumengehalt, sowie Sieblinien blieben dabei unverändert. Für die Optimierung der Temperaturabsenkung durch Wachsmodifikation kam ein kommerzielles Amidwachs (AW) zum Einsatz.

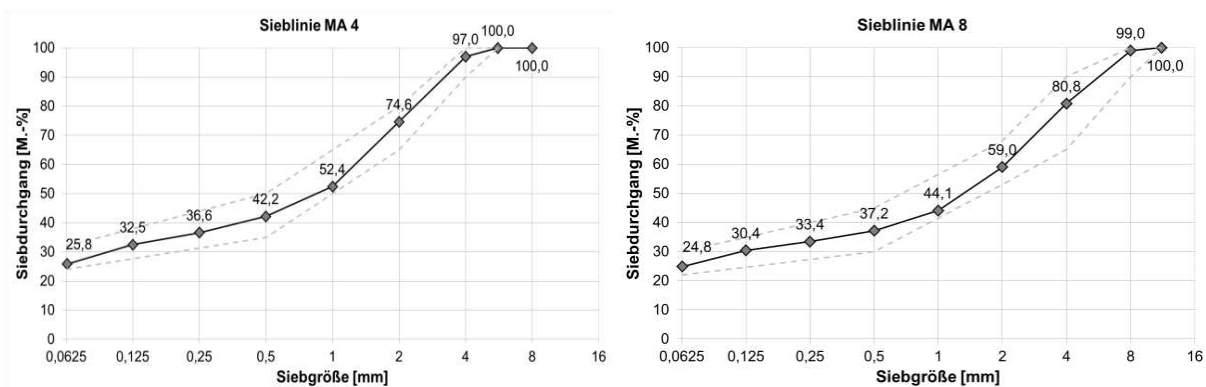


Abbildung 13: Sieblinie der MA 4 und MA 8

Tabelle 3: Merkmale des Bindemittels

	B529	B530
Parameter	Wert	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	19 [1/10 mm]	15 [1/10 mm]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	81.5 °C	86.0 °C

Für die Untersuchung der Verarbeitbarkeit werden folgende vier Varianten jeweils für MA 4 und MA 8 näher untersucht:

- Variante 0: MA (Referenz)
- Variante 1: MA KKRK (die 2/8 KK Korngruppe wurde durch 2/8 RK Korngruppe ersetzt)
- Variante 2: MA 3%AW
- Variante 3: MA RK
- Variante 4: MA RK 3%AW

Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die Rezepturen der fünf betrachteten Varianten im Überblick.

Tabelle 4: MA 4 Rezeptur der vier betrachteten Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
		MA 4 Referenz	MA 4 KKRK	MA 4 3%AW	MA 4 RK	MA 4 RK 3%AW
<b>Bindemittel</b>	90% 90/10 + 10% 70/100	9,20 M%	9,2 M%	8,92 M%	9,2 M%	8,92 M%
<b>Additiv</b>	AW			0,28 M%		0,28 M%
<b>Füller</b>	Kalksteinmehl	24,8 M%	24,8 M%	26,3 M%	26,0 M%	26,0 M%
<b>Gesteins- körnung</b>	KK	66,0 M%	50,0 M%	65,5 M%		
	RK		16,0 M%		62,8 M%	62,8 M%

Tabelle 5: MA 8 Rezeptur der vier betrachteten Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
		MA 8 Referenz	MA 8 KKRK	MA 8 3%AW	MA 8 RK	MA 8 RK 3%AW
<b>Bindemittel</b>	82% 90/10 + 18% 70/100	8,9 M%	8,9 M%	8,63 M%	8,9 M%	8,63 M%
<b>Additiv</b>	AW			0,27 M%		0,27 M%
<b>Füller</b>	Kalksteinmehl	25,0 M%	25,0 M%	25,0 M%	25,0 M%	25,0 M%
<b>Gesteins- körnung</b>	KK	66,1 M%	39,2 M%	66,1 M%		
	RK		26,9 M%		66,1 M%	66,1 M%

### 4.3 Prüfmethode und Prüfprogramm

#### 4.3.1 Mischmoment-Messungen mit Gegenlaufzwangsmischer

Um die Verarbeitbarkeit des Gussasphalts zu untersuchen, wurden Mischmoment-Messungen mit Variation der Mischtemperatur durchgeführt. Dafür wurde ein der EN 12697-35 entsprechender Labormischer (Gegenlaufzwangsmischer) mit einer Kapazität von 30 l Mischgut verwendet. Die Mischgeschwindigkeit ist dabei zwischen 25 U/min und 60 U/min variierbar. Die Trommel kann bis 250 °C aufgeheizt werden. Als Zusatzeinrichtung ist ein Drehmomentaufnehmer vorhanden, der das notwendige Moment des Mischwerkzeugs während des Mischens kontinuierlich aufzeichnet. Dieses Mischmoment wurde bei konstanter Geschwindigkeit (40 U/min) als Kennwert für die Verarbeitbarkeit des Mischguts herangezogen. Der Mischer ist in Abbildung 14 dargestellt. Mischmomentmessungen wurden an allen 10 Varianten durchgeführt. Dabei



wurden die Ausgangsstoffe zunächst bei 170 °C vorgeheizt und anschließend bei dieser Temperatur im Mischer bei einer Mischgeschwindigkeit von 40 U/min verarbeitet. Dafür wurden jeweils 22 kg Mischgut verwendet. Nach dem Mischprozess wurde das Mischmoment bei 170 °C für 300 sec aufgezeichnet. Anschließend wurde die Temperatur des Mischguts im Mischer um 20 °C erhöht und danach wiederum jeweils für 300 sec mit Aufzeichnung des Moments gemischt. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis eine Temperatur von 250 °C erreicht wurde. Im Allgemeinen weist ein niedrigeres Drehmoment auf eine bessere Verarbeitbarkeit hin.



Abbildung 14: Labormischer mit Drehmomentaufnehmer

Im Gegensatz zu der Methode nach [71] wird hier mit einem großräumigen Labormischer gearbeitet, der ein gleichmäßiges Aufheizen und Durchmischen des Mischguts gewährleistet.

#### 4.3.2 Ausbreitmaß für Gussasphalt

Das Ausbreitmaß für Gussasphalt ist eine Prüfmethode, die auf Basis des Ausbreitmaßes für Frischbeton aufgebaut wurde. Ziel war es, eine einfache Prüfmethode zu entwickeln, die schnell realitätsnahe Ergebnisse bringt und auf jeder Baustelle vor Ort einsetzbar ist. Im Allgemeinen weist ein größeres Ausbreitmaß auf eine bessere Verarbeitbarkeit hin.

##### Prüfaufbau

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. Der Ausbreittrichter gemäß Abbildung 15 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 zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde an der kleineren Öffnung des Ausbreittrichters ein Deckel montiert. Durch diese Adaption ist es möglich, den Trichter durch die größere Öffnung zu befüllen.

Vor jedem Versuch muss Trennmittel auf die Innenseite des Ausbreittrichters aufgetragen werden. Dadurch fließt der Gussasphalt gleichmäßig und vollständig aus der Form.



Abbildung 15: Prüfeinrichtung Ausbreitversuch (Quelle: ratioTEC)

### Prüfablauf

Der Ausbreittrichter muss bis zum Rand mit dem vortemperierten Mischgut angefüllt werden. Dann wird er rasch umgedreht und mittig auf der Ausbreitplatte positioniert. Nach dem Lösen des Deckels wird 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.

Die Höchstaubreitmaße  $d_1$  und  $d_2$  werden in zwei Richtungen parallel zu den Kanten mit einer Genauigkeit von 0,5 cm, bestimmt. Dabei ist  $d_1$  größte Ausbreitung des Gussasphaltes in cm parallel zu einer Kante des Ausbreittisches und  $d_2$  größte Ausbreitung des Gussasphaltes in cm parallel zur anderen Kante des Ausbreittisches. Auf die Verarbeitbarkeit wird durch das Ausbreitmaß  $f$  nach Formel (1) geschlossen.

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

Nach dem Ermitteln der Höchstaubreitmaße wird das Gussasphaltemischgut 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.

Im Gegenteil zum Laborverfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt mithilfe des Hägermantisches [55] wird bei dem Ausbreitmaß für Gussasphalt ein Trichter statt eines Marshall – Formzylinders verwendet, der ein gleichmäßiges Ausbreiten des Mischguts ermöglicht. Mit dem neu entwickelten Versuchsaufbau soll eine Verarbeitungsprüfung direkt auf der Baustelle möglich sein. Die Bestandteile sind robuster und es wird kein Laborgerät (Hägermann- Ausbreittisch) benötigt.

#### 4.3.3 Streichversuch Mischanlage

Die entwickelten, temperaturabgesenkten Gussasphalte wurden schließlich in der Mischanlage großtechnisch umgesetzt, um die Praxistauglichkeit zu prüfen. Dabei wurde in der Mischanlage untersucht, ob die im Labor erreichten Temperaturabsenkungen auch bei der Verarbeitung von großen Mengen in der Praxis möglich sind. Auf dem Gelände der Asphaltmischanlage Simmering wurde ein Probefeld mit Abmessungen 8x2m<sup>2</sup> hergerichtet (Abbildung 16) um die Bedingungen bei händischem Einbau zu analysieren. Es wurden nur die MA 8 Mischgüter nach dem Streichversuch geprüft.



Abbildung 16: Probefeld zur Bestimmung der tatsächlichen Einbautemperatur der modifizierten Mischgüter

Alle vier Mischgüter wurden in vier verschiedenen Asphaltkochern eingefüllt und bei 180°C temperiert. Die Temperatur wurde in drei Schritten gesteigert und bei jedem Schritt wurden ca. 1,3m<sup>2</sup> Mischgut von erfahrenen Streichern händisch eingebaut. Die Temperatur, bei der das jeweilige Mischgut streichbar war, wurde als Einbautemperatur dokumentiert.

## 4.4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.4.1 Mischmoment-Messung mit Gegenlaufzwangsmischer

Um die Verarbeitbarkeit der verschiedenen Gussasphaltmischgüter zu bestimmen wurde die Mischmoment - Messung mit dem Gegenlaufzwangsmischer verwendet. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Drehmomentmessungen dargestellt. Jeder Punkt in den Diagrammen stellt einen Mittelwert aus zumindest 20 einzelnen Messwerten des Drehmoments bei der jeweiligen Temperatur dar. Um den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Drehmomentmessung darzustellen wurde eine lineare Regression (2) verwendet:

$$M_{mix}(T) = g * T + h \quad (2)$$

$M_{mix}$	Drehmoment [Nm]
$T$	Temperatur [°C]
$g, h$	Koeffizienten der Regression

Der Koeffizient  $g$  zeigt die Temperaturempfindlichkeit des Mischgutes in Zusammenhang mit dem Drehmoment. Ein höherer Absolutwert von  $g$  bedeutet einen größeren Abfall des Drehmoments mit Zunahme der Temperatur. Der Koeffizient  $h$  gibt das theoretische Drehmoment bei 0 °C an.

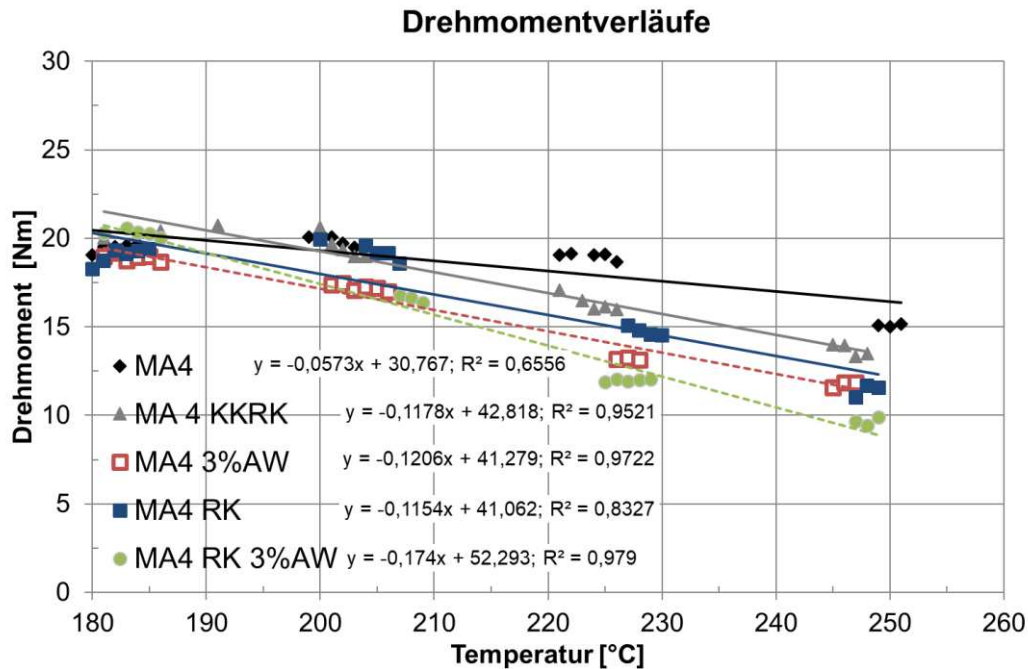


Abbildung 17: Drehmomentverläufe MA 4

Im Diagramm in Abbildung 18 sind die Ergebnisse der MA 4 Mischgüter dargestellt. Alle Drehmomentverläufe fangen bei etwa 20 Nm an und verteilen sich dann radial mit dem Anstieg der Temperatur. Der Koeffizient  $g$  zeigt die Steigung der linearen Regressionen. Die Mischgüter mit Wachs haben die höchsten Absolutwerte (0,12 Nm/K für MA 4 3%W und 0,17 Nm/K für MA 4 RK 3%W) und somit die niedrigsten Drehmomente. Das MA 4 KKRK Mischgut hat eine steilere Gerade als das MA 4 RK Mischgut. Da aber der Schnittpunkt mit der y-Achse bei 0 °C für das MA 4 KKRK (42,8 Nm) höher als für das MA 4 RK (41,1 Nm) ist, hat das MA 4 RK Mischgut niedrigere Drehmomente.

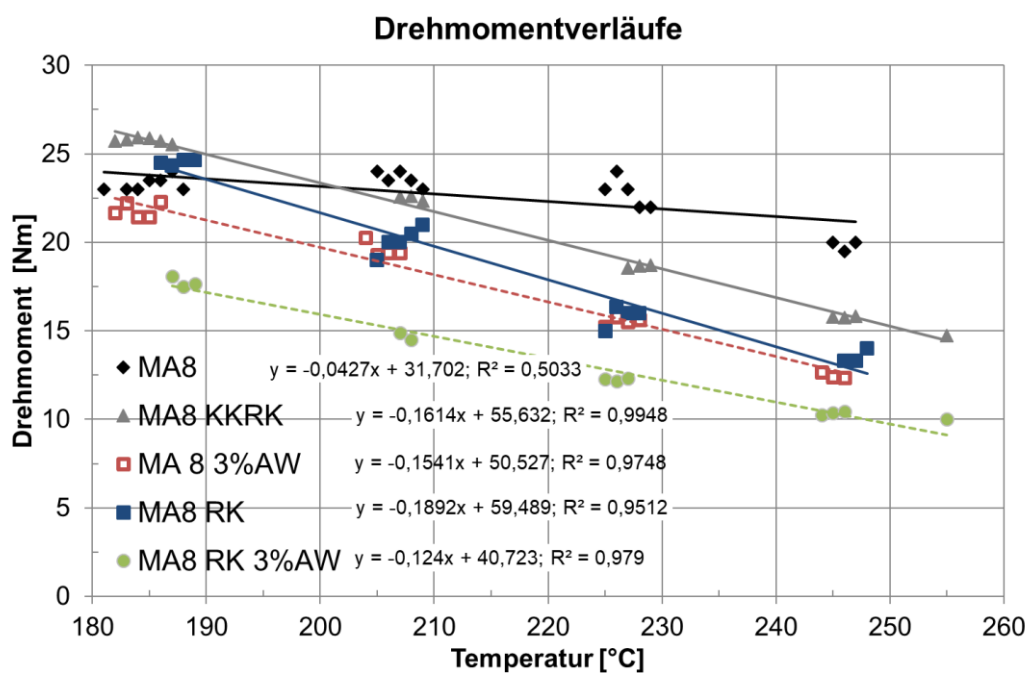


Abbildung 18: Drehmomentverläufe MA 8

Im Diagramm in Abbildung 18 sind die Ergebnisse der MA 8 Mischgüter dargestellt. Im Unterschied zu den MA 4 Ergebnissen verteilen sich die linearen Regressionen von MA 8 Mischgütern nicht radial, sondern parallel. Die Mischgüter mit Wachs haben wie bei MA 4 die niedrigsten Drehmomente. Die Temperaturempfindlichkeit von MA 8 RK 3%AW ist die niedrigste (der Absolutwert von  $g$  ist 0,12 Nm/K) unter den modifizierten Mischgütern. Da der Koeffizient  $h$  aber auch der niedrigste ist, liegt die Regression weit unter den anderen und führt zu den niedrigsten Drehmomenten unter allen Ergebnissen. MA 8 KKRK und MA 8 RK haben die steilsten Geraden aber auch die höchsten  $h$  Werte, was zu höheren Drehmomenten als bei den Mischgütern mit Wachs führt.

Um die Wiederholbarkeit von Drehmomentmessungen zu prüfen wurden 3 Proben von MA 11 Referenz, 2 Proben von MA 8 Referenz und 3 Proben von MA 8 RK geprüft. Um die Wiederholbarkeit zu untersuchen wurden die linearen Regressionen verglichen. Mittels der Regressionen wurden die Standardabweichungen der Drehmomente bei Temperaturen von 190 °C, 210 °C, 230 °C und 250 °C berechnet. Die maximale Standardabweichung für MA 11 ist 0,8 Nm, für MA 8 0,4 Nm und für die Variante MA 8 RK 0,6 Nm. Aufgrund der kleinen Streuung der Ergebnisse ist die Standardabweichung in diesem Maßstab schwierig zu sehen. Das alles spricht für eine sehr gute Wiederholbarkeit des Versuchs (Abbildung 19).

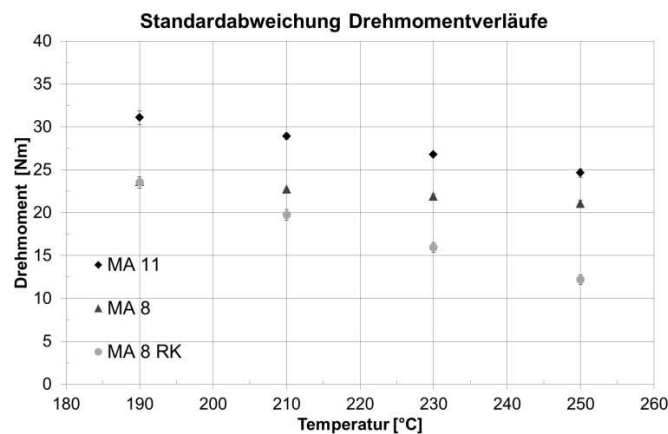


Abbildung 19: Wiederholbarkeit Drehmomentmessungen

#### 4.4.2 Ausbreitmaß für Gussasphalt

Um die Verarbeitbarkeit von den verschiedenen Gussasphaltemischgütern zu bestimmen, wurde ebenso das Ausbreitmaß verwendet. In Abbildung 21 sind die Ergebnisse von den Ausbreitmaßmessungen dargestellt. Um den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Ausbreitmaßmessung darzustellen, wurde eine lineare Regression (3) verwendet:

$$M_{\text{mix}}(T) = c * T + d \quad (3)$$

$M_{\text{mix}}$	Ausbreitmaß [cm]
$T$	Temperatur [°C]
$c, d$	Koeffizienten der Regression

Der Koeffizient  $c$  zeigt die Temperaturempfindlichkeit des Mischgutes in Zusammenhang mit dem Ausbreitmaß. Ein höherer Absolutwert von  $c$  bedeutet einen größeren Anstieg des Ausbreitmaßes mit Zunahme der Temperatur. Der Koeffizient  $d$  gibt das theoretische Ausbreitmaß bei 0 °C an.

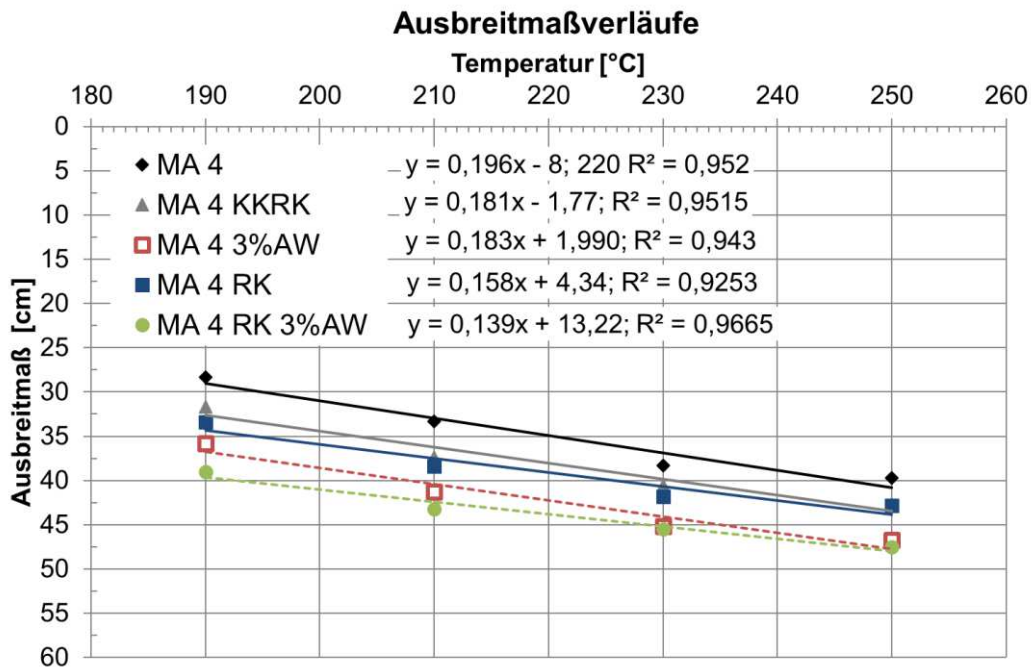


Abbildung 20: Ausbreitmaßverläufe MA 4

Die Geraden der linearen Regressionen sowohl von MA 4 als auch von MA 8 haben eine ähnliche parallele Verteilung im Gegensatz zu den Drehmomentverläufen. Im Diagramm in Abbildung 20 sind die Ausbreitmaßverläufe von den MA 4 Mischgütern dargestellt. Das MA 4 Referenzmischgut hat die steilste Gerade, aber den niedrigsten  $d$  Koeffizient und liegt somit über den anderen Regressionslinien. Es kann noch festgestellt werden, dass die modifizierten Varianten mit Wachs höhere Ausbreitmaße als diejenigen ohne Wachs haben. Das MA 4 KKRK Mischgut ist temperaturempfindlicher ( $c = 0,18 \text{ cm/K}$ ) als das MA 4 RK Mischgut ( $c = 0,14 \text{ cm/K}$ ). Der Koeffizient  $d$  für MA 4 KKRK ( $d = -1,8 \text{ cm}$ ) ist aber kleiner als der Koeffizient  $d$  für MA 4 RK ( $d = 13,2 \text{ cm}$ ) und damit auch das Ausbreitmaß. Derselbe Trend ist bei MA 4 3%AW und MA 4 RK 3%AW zu beobachten. Das Mischgut mit dem höchsten Ausbreitmaß ist MA 4 RK 3%AW.

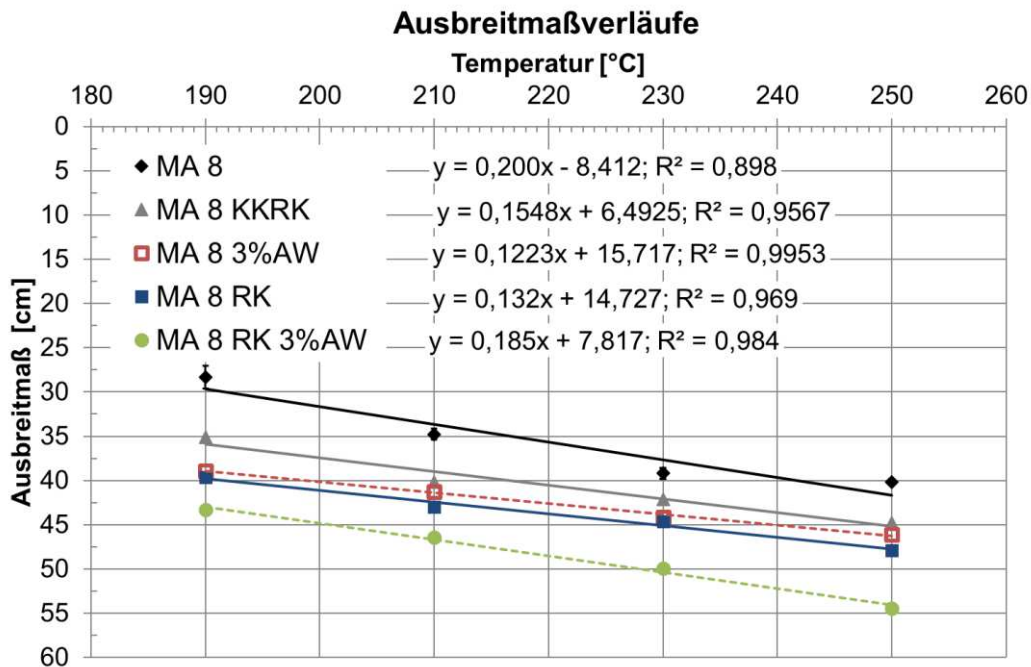


Abbildung 21: Ausbreitmaßverläufe MA 8

Im Diagramm in Abbildung 21 sind die Ergebnisse der MA 8 Mischgüter dargestellt. Das Referenzmischgut hat hier wieder die steilste Gerade ( $c = 0,20 \text{ cm/K}$ ), aber den niedrigsten  $d$  Koeffizient ( $d = -8,2 \text{ cm}$ ) und liegt über den anderen Regressionslinien. Das MA 8 KKRK Mischgut hat wieder die niedrigsten Ausbreitmaße unter den modifizierten Varianten. Der Unterschied zu den MA 4 ist, dass die Koeffizienten von MA 8 RK ( $c = 0,13 \text{ cm/K}$ ,  $d = 14,7 \text{ cm}$ ) und MA 8 3%W ( $c = 0,12 \text{ cm/K}$ ,  $d = 15,7 \text{ cm}$ ) diesmal sehr ähnlich sind und die Ausbreitmaße von MA 8 RK größer als diese von MA 8 3%W sind. Das Mischgut mit den höchsten Ausbreitmaße ist wieder die Variante RK 3%AW.

Die MA 8 Referenz, MA 8 RK sowie MA 8 RK 3%AW wurden an drei verschiedenen Proben wiederholt, um die Wiederholbarkeit der Prüfung zu überprüfen. Im Diagramm in Abbildung 21 ist die Standardabweichung bei diesen zwei Varianten dargestellt. Die maximale Standardabweichung für die Referenz ist 1,3cm, für die Modifizierung mit RK 0,5cm und für die Variante RK 3%AW 0,6cm. Aufgrund der kleinen Streuung der Ergebnisse ist die Standardabweichung in diesem Maßstab schwierig zu sehen. Das alles spricht für eine sehr gute Wiederholbarkeit des Versuchs.

#### 4.4.3 Korrelation zwischen Mischmoment und Ausbreitmaß

In Abbildung 22 ist die Korrelation zwischen den Mischmomenten und den Ausbreitmaßen bei Herstellungstemperaturen von 210°C, 230°C und 245°C dargestellt. Auf der x-Achse sind die Mischmomentmesswerte und auf der y-Achse die Ausbreitmaßmesswerte dargestellt, die von den linearen Regressionen (Abbildung 17, Abbildung 18, Abbildung 20 und Abbildung 21) berechnet wurden. Im linken Diagramm in Abbildung 22 ist die Korrelation für MA 4 und auf dem rechten für MA 8 zu sehen.

Die Mischmoment- und Ausbreitmaßergebnisse weisen einen linearen Zusammenhang auf. Die lineare Regression der Korrelation von MA 4 hat ein Bestimmtheitsmaß von 0,87 und von MA 8 liegt das Bestimmtheitsmaß bei 0,86.

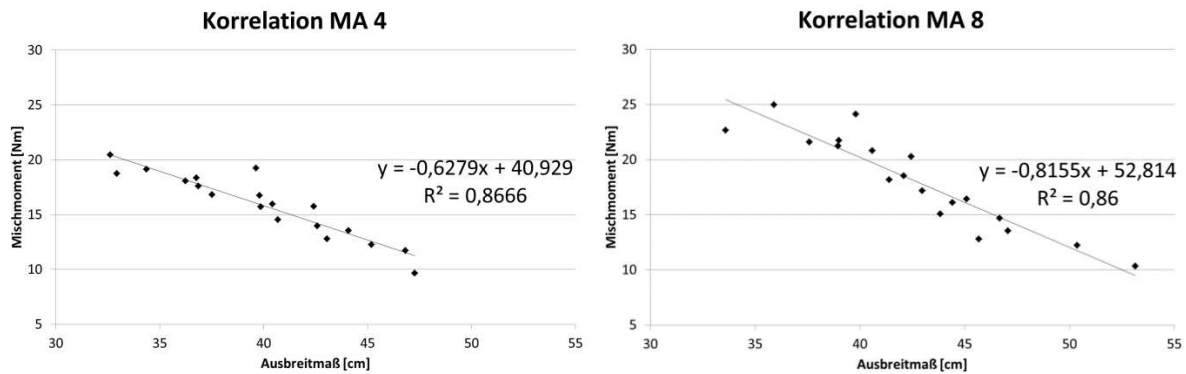


Abbildung 22: Korrelation zwischen Drehmoment und Ausbreitmaß

In Abbildung 23 ist der Vergleich zwischen den Korrelationen MA 4 und MA 8 dargestellt. So dargestellt, können leichter die Unterschiede zwischen beiden Mischgütern betrachtet werden. In Rot sind die MA 4 und in Schwarz die MA 8 Ergebnisse dargestellt. Es sind auch die linearen Regressionen angegeben. Die MA 4 Mischmomenten haben eine kleinere Bandbreite. Sie fangen bei 20 Nm an und enden bei 10 Nm. Die MA 8 Mischmomenten fangen bei 25 Nm an und enden ebenfalls bei 10 Nm. Das gleiche kann auch beim Ausbreitmaßversuch beobachtet werden. MA 8 hat eine größere Bandbreite als MA 4. Das heißt, dass es einen kleineren Unterschied bei der Verarbeitbarkeit zwischen den modifizierten MA 4 Varianten (sie liegen eng aneinander) im Vergleich zu den modifizierten MA 8 Varianten (sie liegen weiter auseinander) gibt.

Die MA 4 Mischgüter haben, allgemein betrachtet, niedrigere Mischmomente im unteren Temperaturbereich im Vergleich zu den MA 8 Mischgüter. Im oberen Temperaturbereich sind die Werte ausgeglichen. Betrachtet man die Ausbreitmaßwerte, sieht es umgekehrt aus. Im unteren Temperaturbereich fangen MA 4 und MA 8 gleich an und im oberen Temperaturbereich erreichen die MA 4 Mischgüter niedrigere Werte. Der Ausbreitmaßversuch zeigt, dass MA 4 bei gleichem Mischmoment, steifer als MA 8 reagiert.

Einerseits zeigen die Drehmomentmessungen, dass MA 4 Mischgüter im Vergleich zu MA 8 Mischgütern kompakter aneinander liegen und tendenziell bessere Verarbeitbarkeit (niedrigere Drehmomente) haben. Andererseits zeigen die Ausbreitmaßegebnisse, dass die MA 4 Mischgüter im Vergleich zu den MA 8 Mischgütern ebenfalls kompakter aneinander liegen, aber eine schlechtere Verarbeitbarkeit haben. Grund für die größere Bandbreite von MA 8 für beide Versuchsarten sind das weichere Bindemittel, der niedrigere Bindemittelgehalt und die gröbere Sieblinie von MA 8. Der Grund für den Unterschied der Verarbeitbarkeit zwischen MA 4 und MA 8 beim Drehmomentversuch und beim Ausbreitmaßversuch ist der Unterschied der Werte im unteren Temperaturbereich beider Versuchsarten.

Die MA 4 Verarbeitbarkeit beim Mischmoment fängt niedriger als MA 8 an. Die MA 4 Verarbeitbarkeit beim Ausbreitmaß fängt gleich mit MA 8 an. Das führt zu einem Unterschied zwischen den Ergebnissen im unteren Temperaturbereich. Dieser Unterschied kann damit erklärt werden, dass beide Versuche unterschiedliche Verarbeitbarkeit prüfen. Bei den Drehmomentmessungen wird das Mischgut (190°C) mit einer Scherbewegung des Mischwerks durchgemischt. Die gröbere Kantkörnung spielt eine wesentliche Rolle beim Widerstand gegen diese Scherbewegung. Grund dafür ist der Kontakt zwischen der Gesteinskörnung und der Trommelwand des Mixers. Das ist ein Nachteil, der beim Ausbreitmaß nicht auftreten kann.



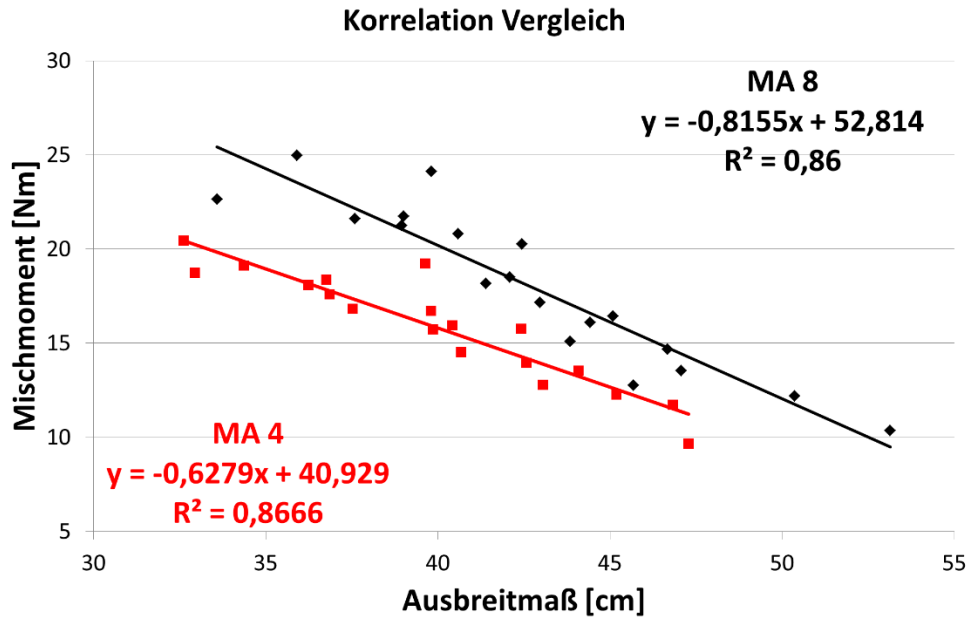


Abbildung 23: Vergleich Korrelation MA 4/MA8

#### 4.4.4 Streichversuch Mischanlage

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse vom Streichversuch dargestellt. Die Temperatur, bei der das jeweilige Mischgut streichbar war, wurde als Einbautemperatur dokumentiert. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse ist im Kapitel 6 zu finden.

Tabelle 6: Ergebnisse Streichversuch

Mischgutart	Einbautemperatur [°C]
MA 8 (Referenz)	245
MA 8 KKRK	225
MA 8 3%AW	220
MA 8 RK 3%AW	190

Für alle vier Mischgüter, die in Tabelle 6 zu finden sind, wurden Ausbreit- und Mischmoment – Messungen durchgeführt. Um die Einbautemperatur laut dem jeweiligen Versuch zu ermitteln, wurde als Benchmark für die Verarbeitbarkeit des Ausbreitmaß oder das Drehmoment des unmodifizierten Gussasphalts bei 245°C und für alle anderen Mischungen die äquiviskose Temperatur (also die Temperatur, bei der sich gleiches Ausbreitmaß oder Drehmoment einstellt) ermittelt. Es wurde eine Temperatur von 245°C als Referenz ausgewählt, weil dieses Mischgut in der Praxis bei 245 °C eingebaut wird.

In Abbildung 24 ist dargestellt wie die äquiviskose Temperatur berechnet wird. Im linken Diagramm sind die Drehmomentverläufe und im rechten die Ausbreitmaßverläufe zu sehen. In Schwarz sind die Ergebnisse für MA 8 KK (das Referenzmischgut) und in Grau die Ergebnisse für MA 8 3%AW dargestellt.

Das Drehmoment für das MA 8 Referenz bei 245°C wird mittels der linearen Regression berechnet. Der Koeffizient  $y$  ist das Drehmoment und  $x$  die Temperatur. Einer Temperatur von 245°C entspricht ein Drehmoment von 21,2 Nm.

Für das Referenzmischgut ist der Koeffizient x der bekannte Koeffizient ( $x = 245^{\circ}\text{C}$ ) und y der unbekannte Koeffizient. Für MA 8 3%AW ist es umgekehrt. Der Koeffizient y ist bekannt ( $y = 20,8 \text{ Nm}$ ) und der Koeffizient x wird gesucht. In diesem Fall wird die lineare Regression für MA 8 3%AW verwendet:

Das heißt, dass MA 8 Referenz ein Drehmoment von 21,2 Nm bei  $245^{\circ}\text{C}$  und MA 8 3%W bei  $190^{\circ}\text{C}$  haben. Die äquivalente Einbautemperatur von MA 8 3%AW ist  $190^{\circ}\text{C}$ . Die Berechnung für das rechte Diagramm in Abbildung 24 wird analog durchgeführt.

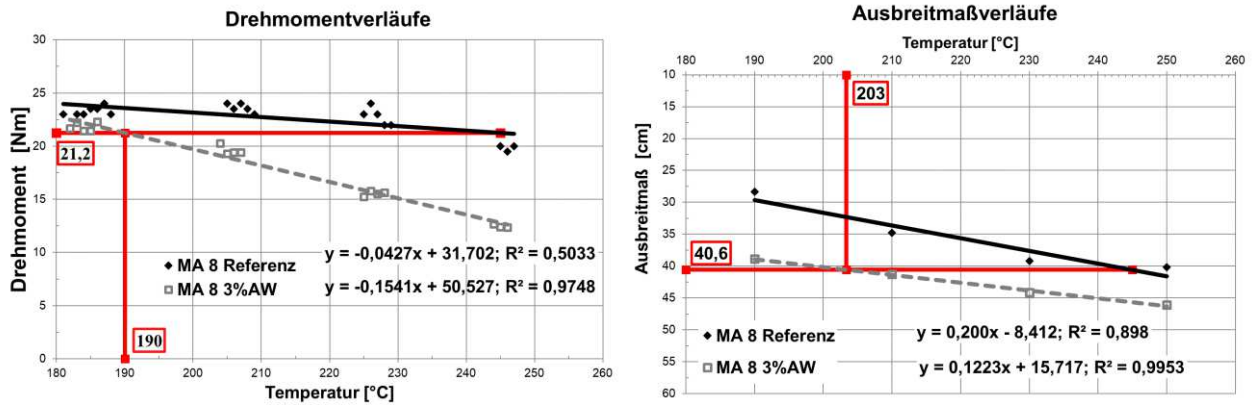


Abbildung 24: Berechnen der äquivalenten Temperatur

In Tabelle 7 sind die Einbautemperaturen von allen vier Mischgütern zusammengefasst.

Tabelle 7: Ermittelten Einbautemperaturen mittels Mischmoment – Messungen und Ausbreitmaß - Messungen

Mischgutart	Einbautemperatur mittels Mischmoment – Messungen [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Absolute Abweichung Streichversuch / Mischmomentversuch [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Einbautemperatur mittels Ausbreitmaß – Messungen [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Absoluter Abweichung Streichversuch / Ausbreitmaßversuch [ $^{\circ}\text{C}$ ]
MA 8	245	-	245	-
MA 8 KKRK	213	$225 - 213 = 12$	220	$225 - 220 = 5$
MA 8 3%AW	190	$220 - 190 = 30$	203	$220 - 203 = 17$
MA 8 RK 3%AW	157	$190 - 157 = 33$	177	$190 - 161 = 13$

In Abbildung 25 sind die absoluten Fehler der mit Ausbreit- und Mischmoment – Messungen ermittelten Einbautemperaturen zu den Einbautemperaturen vom Streichversuch dargestellt. Klar zu sehen ist, dass die Ergebnisse von dem Ausbreitversuch deutlich näher an den Ergebnissen des Streichversuchs sind. Das kann damit erklärt werden, dass der Gussasphalt in der Praxis durch Ausbreiten auf die Oberfläche verteilt wird. Das Drehmoment spielt eine Rolle nur im Asphaltkocher, in dem das Mischgut gerührt wird. Ein weiterer Grund dafür ist der Kontakt zwischen der Gesteinskörnung und der Trommelwand des Mixers beim Drehmomentmessen.

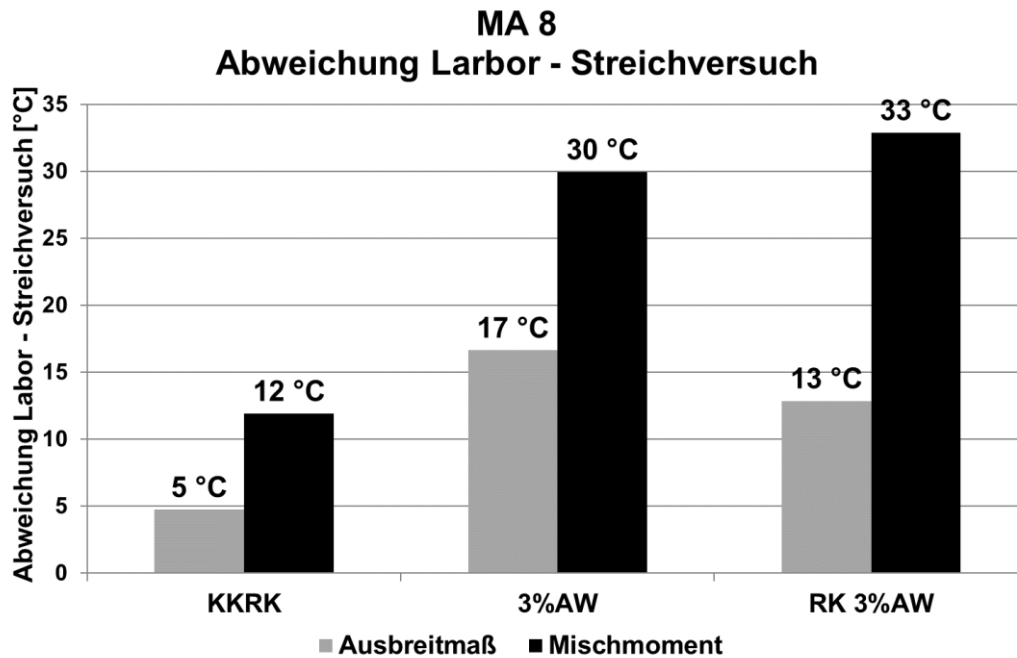


Abbildung 25: Abweichung Einbautemperaturen Labor - Feldmessungen

#### 4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bis zu diesem Zeitpunkt existiert noch kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Im Zuge dieser Dissertation wurden zur Kontrolle der Verarbeitbarkeit zwei Prüfmethode entwickelt. Die erste Methode ist die Bestimmung des Drehmoments durch die Verwendung eines großräumigen Gegenlaufzwangsmischers mit Messsystem. Die zweite Methode ist die Bestimmung des Ausbreitmaßes.

Im Rahmen dieses Kapitels wurde die Verarbeitbarkeit der Mischgüter MA 4 und MA 8 (konventionelle und temperaturabgesenkten Mischgüter) bestimmt. Alle Drehmomentverläufe von MA 4 fangen bei etwa 20 Nm an und verteilen sich dann radial mit dem Anstieg der Temperatur. Im Unterschied zu den MA 4 Ergebnissen verteilen sich die linearen Regressionen von MA 8 Mischgütern nicht radial, sondern parallel in Abhängigkeit von der Modifizierungsart. Sowohl für MA 4 als auch für MA 8 haben die Mischgüter mit Wachs eine bessere Verarbeitbarkeit als diese ohne Wachs und die Variante RK 3%AW führt zu den niedrigsten Drehmomenten unter allen Ergebnissen.

Die Ausbreitmaßverläufe sowohl von MA 4 als auch von MA 8 haben im Gegensatz zu den Drehmomentverläufen eine ähnliche parallele Verteilung. Es kann zudem festgestellt werden, dass die mit Wachs modifizierten Varianten für MA 4 höhere Ausbreitmaße als diejenigen ohne Wachs haben. Das Mischgut mit den höchsten Ausbreitmaße ist MA 4 RK 3%AW. Der Unterschied zwischen MA 8 und MA 4 ist, dass die Ergebnisse von MA 8 RK und MA 8 3%AW diesmal sehr ähnlich sind und die Ausbreitmaße von MA 8 RK größer als diese von MA 8 3%AW sind. Das MA 8 RK 3%AW Mischgut hat wieder die günstigste Verarbeitbarkeit unter den modifizierten Varianten beider Gussasphaltarten.

Es wurde zusätzlich die Korrelation zwischen beiden Versuchen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Mischmoment- und Ausbreitmaßergebnisse einen linearen Zusammenhang aufweisen. Die lineare Regression der Korrelation von MA 4 hat ein Bestimmtheitsmaß von 0,87, und bei MA 8 liegt das Bestimmtheitsmaß bei 0,86. Mittels Vergleiches beider Korrelationen wurden die Unterschiede zwischen beiden Mischgütern analysiert. Sowohl die Drehmomentmessungen als auch die Ausbreitmaßmessungen zeigen, dass

die MA 4 Mischgüter im Vergleich zu den MA 8 Mischgütern kompakter aneinander liegen. Grund für die größere Bandbreite von MA 8 für beide Versuchsarten sind das weichere Bindemittel, der kleinere Bindemittelgehalt und die gröbere Sieblinie von MA 8.

Anhand dieses Korrelationsvergleichs sieht man, dass beide Versuchsarten unterschiedlich im unteren Temperaturbereich funktionieren. Dieser Unterschied im unteren Temperaturbereich kann damit erklärt werden, dass beide Versuche unterschiedliche Verarbeitbarkeit prüfen. Bei den Drehmomentmessungen wird das Mischgut (190°C) mit einer Scherbewegung des Mischwerks durchgemischt. Die gröbere Kantkörnung spielt eine wesentliche Rolle bei dem Widerstand gegen diese Scherbewegung. Ein weiterer Unterschied ist der Kontakt zwischen der Gesteinskörnung und der Trommelwand des Mixers. Das ist ein Nachteil, der beim Ausbreitmaß nicht auftreten kann.

Die entwickelten, temperaturabgesenkten Gussasphalte wurden schließlich in der Mischanlage großtechnisch umgesetzt, um die tatsächliche Einbautemperatur zu prüfen. Die Temperatur, bei der das jeweilige Mischgut streichbar war, wurde als Einbautemperatur dokumentiert. Es wurde festgestellt, dass die Ergebnisse des Ausbreitversuchs deutlich näher an den Ergebnissen der Streichversuche liegen. Das kann damit erklärt werden, dass der Gussasphalt in der Praxis durch Ausbreiten auf die Oberfläche verteilt wird. Das Drehmoment spielt nur im Asphaltkoher, in dem das Mischgut homogenisiert wird, eine Rolle.

## 5 OPTIMIERUNG DER TEMPERATURABSENKUNG VON GUSSASPHALT

Die Optimierung der Temperaturabsenkung von Gussasphalt bei gleichbleibendem Gebrauchsverhalten ist im Rahmen dieser Doktorarbeit ein Hauptthema. Das präsentierte Prüfprogramm in diesem Kapitel umfasst zunächst die Optimierung der Temperaturabsenkung unter Beimengung unterschiedlicher Wachsarten bzw. wird parallel dazu die Methode der Kornsubstitution entwickelt. Dabei wurde die mögliche Temperaturabsenkung auf Bindemittel- und Mischgutebene untersucht. Anschließend wurde das Gebrauchsverhalten in Bezug auf Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und Kälterisse für temperaturabgesenkte Gussasphalt überprüft.

Zuerst wird der Stand der Technik der Temperaturabsenkung von Asphaltmischgütern und anschließend die Optimierung von vier Gussasphaltmischgütern (MA 11, MA 8 und zwei MA 4) präsentiert.

### 5.1 Stand der Technik

#### 5.1.1 Gussasphalt vs. Walzasphalt

Die Hauptbestandteile von Gussasphalt sind die Füllerkomponente ( $\leq 0,063$  mm) mit bis zu 30 M% und das Bindemittel mit 8 M% bis 10 M% [1]. Bis zu 40 M% des Mischguts sind daher als Mastix zu bezeichnen, der Rest wird durch gröbere Körnungen eingenommen. Dabei ist das Ziel ein dichtes Mischgut, ohne technisch relevanten Hohlraumgehalt zu erzeugen. In Abbildung 26 wird ein Vergleich zwischen dem Querschnitt eines Gussasphalt-Probekörpers und eines Walzasphalt-Probekörpers im gleichen Maßstab gezeigt.

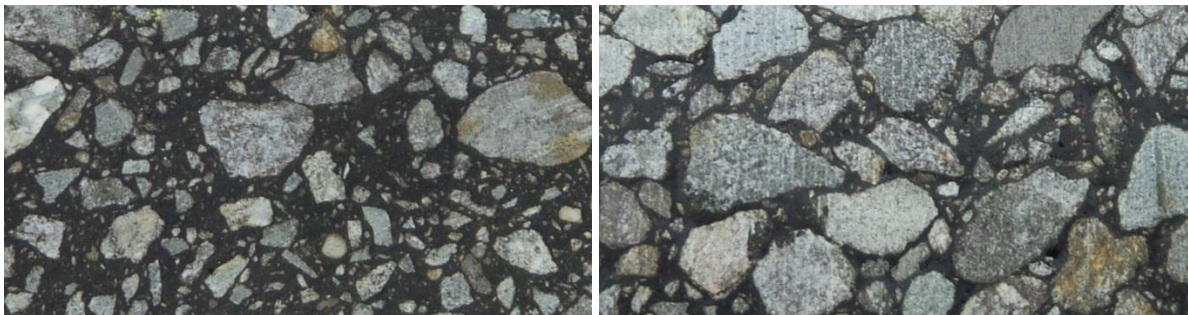


Abbildung 26: Gussasphalt (links), Walzasphalt (rechts)

#### 5.1.2 Anwendungsgebiete

##### Straßenbelag

Der Gussasphalt als Straßenbelag findet Einsatz als Deckschicht oder als Dichtungsschicht unter Deckschichten aus offenporigem Asphalt und wird im hochrangigen Straßennetz vor allem wegen seiner guten Abdichtungsfunktion verwendet. Die wasserundurchlässige Deckschicht aus Gussasphalt schützt den unteren Fahrbahnaufbau, wodurch eine lange Nutzungsdauer ermöglicht werden kann.

##### Brückenbau

Beim Brückenbau erfüllt der Gussasphalt eine wichtige Funktion als Bestandteil der Abdichtung und kann gleichzeitig die Rolle einer Schutz- und Deckschicht übernehmen. Das ist ein Hauptanwendungsgebiet von diesem Baustoff [74].

### Garagenbefestigung

Der Gussasphalt wird in Tiefgaragen verwendet, weil er flüssigkeitsundurchlässig ist und dem Schutz der Betonbauteile vor Tausalzbeanspruchung dient. Er entspricht der erforderlichen Brandklasse und bei Reparaturmaßnahmen können die Flächen nach kurzer Zeit wieder benutzt werden [75].

### Gehsteig-, Radweg- und Bahnsteigbefestigung

Der Gussasphalt wird auch im Bereich von gering belasteten Verkehrsflächen, wie z.B. Gehsteigen verwendet. In diesem Fall werden weichere Gussasphaltrezepte benutzt. Vorteil bei dieser Art Befestigung ist der Wegfall von Fertiger und dadurch wird der Einbau von schmalen Gehsteigen möglich [75]. Ähnlich wie bei der Gehsteigbefestigung kann der Gussasphalt für Radwege verwendet werden [74]. Gussasphalt eignet sich auch zum Einsatz auf Bahnsteigen. Vorteil in diesem Fall sind die leichte Reinigung, die gute Abdichtung und die hohe Flexibilität des Einbauquerschnitts beim händischen Einbau [74].

### Hochbau

Im Hochbau finden der Gussasphalt Einsatz als Estrich und wird oft für Industrieböden verwendet.

### Sondergebiete

Andere Bereiche wie Sportplätze, Wasserbau, Deponiebau, Tunnels sind auch ein Teil des Einsatzgebiets des Gussasphalts [74].

## 5.1.3 Additive und Methoden zur Temperaturabsenkung

In diesem Abschnitt werden Produkte und Methoden beschrieben, die für den Einsatz bei temperaturabgesenkten Asphalten geeignet sind. Dabei werden sowohl Bitumen- und Asphaltadditive als auch verfahrenstechnische Methoden berücksichtigt.

### 5.1.3.1 Organische Zusätze

Viskositätsverändernde organische Zusätze dienen zur Anfertigung von viskositätsverändernden Bindemitteln oder werden direkt bei der Produktion des Asphalts hinzugefügt. Sie senken die Viskosität des Bindemittels bei hohen Temperaturen und führen daher zu einer Reduzierung der Misch- und Einbautemperaturen [76]. Abbildung 27 stellt eine systematische Verteilung der Wachsarten dar.

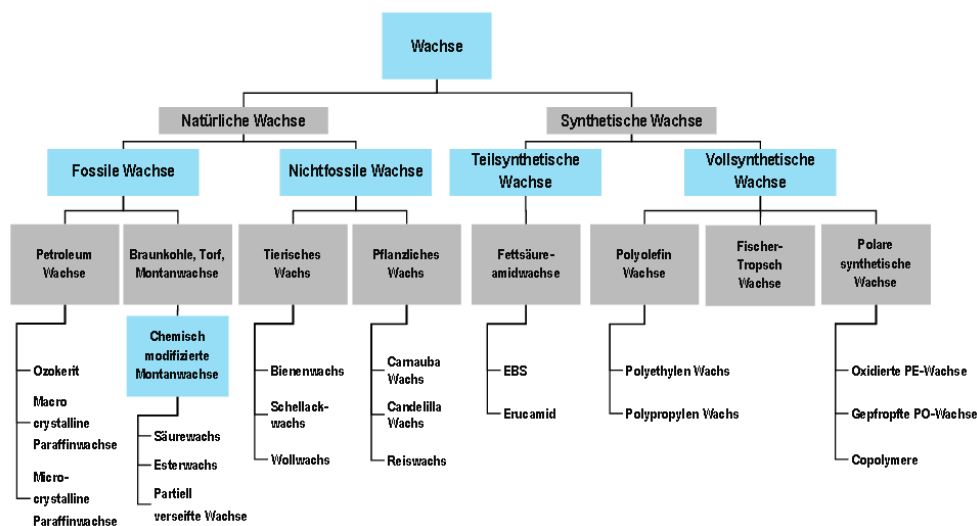


Abbildung 27: Klassifizierung von Wachsen [77]

### Fischer-Tropsch (FT) Wachs

Im Jahr 1925 wurde FT-Wachs von Franz Fischer und Hans Tropsch erfunden. Das Wachs ist ein Gemisch aus festen, meist unverzweigten, gesättigten Kohlenwasserstoffen und wird mit der Fischer-Tropsch-Synthese gewonnen [78].

Es gibt einen Unterschied zwischen der Kettenlänge der FT-Moleküle und der Kettenlänge erdöleigener Paraffine. Deswegen weisen die FT-Paraffine andere physikalische Eigenschaften auf. Daher ist der Vergleich mit den paraffinischen Anteilen im Bitumen nicht möglich. Bei Raumtemperatur ist das FT-Wachs ein harter Festkörper. Bei Temperaturen oberhalb von 115°C ist das FT-Wachs vollständig in Bitumen löslich und wirkt viskositätssenkend. Bei Temperaturen unterhalb von 80 °C bis 90 °C kristallisiert das FT-Wachs aus und es bildet sich eine Art Netzstruktur im Bitumen, die höhere Steifigkeit gewährleistet. Das FT-Wachs ist ein bekanntes Produkt in der Asphaltindustrie und findet häufig Einsatz bei der Temperaturabsenkung von Asphalt. Sein Nachteil ist das Herstellungsverfahren, das sich umweltbelastend auswirkt [78].

### Amidwachs

Amidwachse sind teilsynthetische Kohlenwasserstoffe. Der Tropfpunkt des Amidwachses befindet sich laut Herstellerangaben zwischen 140°C und 145°C, während der Erstarrungspunkt zwischen 135 °C und 142 °C liegt. Das fast weiße Additiv ist als Pulver oder Granulatform erhältlich und kann direkt dem Bitumen beigemischt werden oder erst während des Asphaltmischvorgangs zugesetzt werden. Das Additiv bringt eine bessere Steifigkeit des Bindemittels bei hohen Temperaturen. Eine Konzentration von nicht mehr als 3% M bezogen auf Bitumengehalt ist laut Hersteller optimal [79].

### Polyethylenwachs

Das Polyethylenwachs, das im Rahmen dieser Dissertation verwendet wird, wird bei der Firma Clariant International Ltd. entwickelt und wird als Licocene PE 4201 vertrieben. Dessen Tropfpunkt liegt bei rund 128°C [80]. Ein ähnliches Produkt (Luwax A) der Firma BASF (Deutschland) besitzt einen Tropfpunkt zwischen 107°C und 114°C [81].

Untersuchungen zeigen, dass durch Polyethylenwachs-Modifikation eine viskositätssenkende Wirkung erzielt werden kann, jedoch diese Effekte nicht signifikant sind. Durch die hohen Herstellungskosten ist dieses Produkt nicht wirtschaftlich und findet aus diesem Grund keine Anwendung im Asphaltstraßenbau. Da die Prozessoptimierung mit dem Polyethylenwachs leicht und genau zu beschreiben ist und alle Eigenschaften bei verschiedenen Temperaturen leicht definierbar sind, ist es aus wissenschaftlicher Sicht empfehlenswert, das Polyethylenwachs im Rahmen des Prüfprogramms zu berücksichtigen.

### Montanwachs

Das reine Montanwachs kann man mit der Hilfe einer Toluolextraktion aus Braunkohle und danach aus einer Trennung des Toluols vom Rohmontanwachs mittels Verdampfungsanlage gewinnen. Montanwachs ist kein reines Additiv und ist ein Stoffgemisch aus Rohmontanwachs und höhermolekularen Kohlenwasserstoffen. Wegen dieses Verhältnisses sind die Tropfpunkt- und die Erstarrungsproduktspannen sehr breit. Der Tropfpunkt liegt zwischen 80°C und 150°C und das Erstarrungsprodukt liegt zwischen 75°C und 145°C. Montanwachs wird in einer Granulatform verkauft und kann in der Asphaltmischanlage zugesetzt werden oder direkt als schon modifiziertes Bitumen gekauft werden [82].

### 5.1.3.2 Mineralische Zusätze/Methoden

#### Rundkorn

Eine neue Idee, die im Rahmen dieser Dissertation entwickelt wurde, ist das Ersetzen von bei der Asphaltproduktion üblicherweise eingesetztem Kantkorn durch Rundkorn. Während bei anderen Asphalttypen (Asphaltbeton, Splittmastixasphalt, Offenporiger Asphalt) ein Einsatz von Rundkorn einerseits aufgrund der mangelnden Lastabtragung und in der Deckschicht und zusätzlich aufgrund mangelnder Griffigkeit nicht möglich ist, ist dies bei Gussasphalt anders. Die Lastabtragung erfolgt bei Gussasphalt zum überwiegenden Teil über den Asphaltmastix und aufgrund des hohen Bitumen- und Feinkorngehalts ist kaum direkter Korn-Korn-Kontakt vorhanden. Zur Herstellung einer entsprechenden Griffigkeit wird die fertige Schicht mit Edelbrechkorn abgesplittet. Das Mischgutkonzept vom Gussasphalt ist so aufgebaut, dass die Gesteinskörnungen im Mastix „schwimmen“. Das Rundkorn kann zu einer Absenkung der Herstellungstemperatur führen, weil es besser als Kantkorn „schwimmt“. Bei der Mischgutherstellung und beim Einbauen, wenn der Mastix flüssig ist, verbessert die runde Form der Gesteinskörner also die Verarbeitbarkeit. In Abbildung 28 ist ein Überblick der verschiedenen Mischgutkonzepte zu finden.

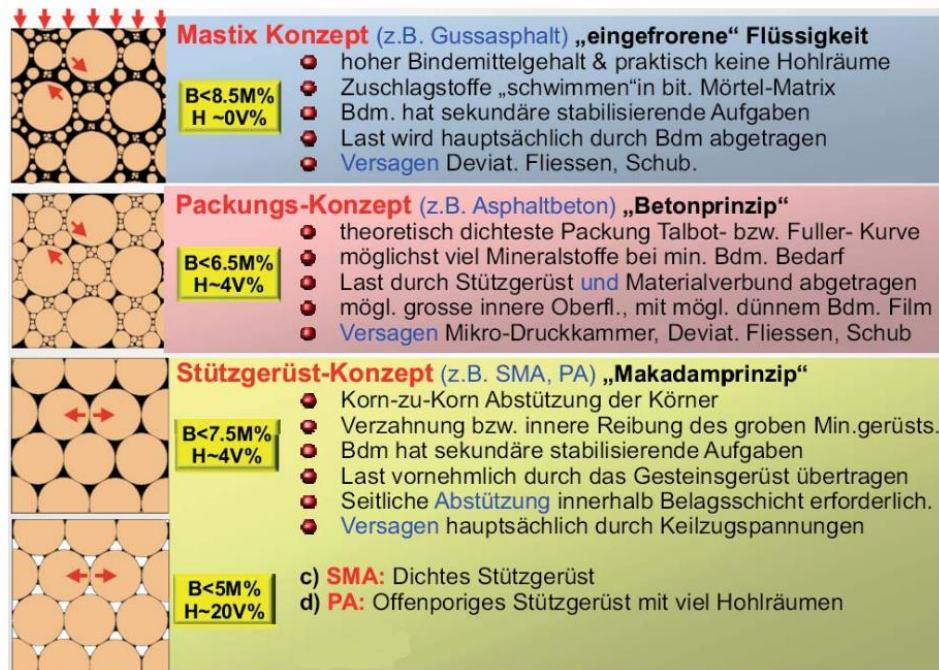


Abbildung 28: Heißmischgut - Mischgutkonzepte[83]

#### Zeolithe

Zeolithe charakterisieren sich als Gerüstsilikate mit lockerer Struktur, die im Inneren Fremdmoleküle, in diesem Fall - Wasser, aufnehmen und wieder abgeben, ohne ihre Form zu verändern, d.h. sie sind form- und größenstabil. Im Misch- und Einbautemperaturbereich geben die Zeolithe Wassermoleküle als Dampf ab. Dadurch wird das effektive Volumen des Bindemittels erhöht und die Viskosität gesenkt [84]. Der Wassergehalt von natürlichen Zeolithen beträgt 6 – 10 M.-% und von synthetisch hergestellten Zeolithen 25 M.-%. Beim Mischprozess werden Zeolithe gemeinsam mit dem Füller zugegeben. Das im Zeolith gebundene Wasser wird beim Erhitzen als Wasserdampf freigesetzt und somit wird die Verarbeitungsviskosität des Bitumens abgesenkt. Deswegen ist der Einbau vom Asphaltmischgut bei niedrigen Temperaturen möglich [78].



### 5.1.3.3 Chemische Zusätze

Chemische Additive sind eine andere Möglichkeit zur Herstellung von temperaturabsenkten Asphalten. Sie entstehen als eine Kombination von Emulgatoren, Tensiden, Polymeren und Additiven zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Mischguts und der Verdichtung sowie auch als Haftvermittler. Die zugegebene Menge und der Temperaturabsenkungsgrad hängen von den spezifischen Produkten ab. Chemische Additive werden in der Form von Emulsion angebracht oder bei Bindemittelfertigung hinzugefügt und dadurch mit dem Asphalt gemischt [79].

#### Evotherm

Es sind die folgenden Produkte bekannt – Evotherm ET (häufig als nur Evotherm verweist), die letztendlich von Evotherm DAT und Evotherm 3G ersetzt werden:

- Evotherm ET (Emulsion Technologie) verwendet ein chemisches Bündel von Emulgatoren und Haftvermittler. Das Additiv macht 30 M.-% des Bindemittelgehalts aus und wird als Emulsion angebracht.
- Evotherm DAT (Dispersed Asphalt Technology) ist dasselbe chemisches Bündel gemischt mit einer kleinen Wassermenge, die in der Asphaltfertigungslinie vor der Mischkammer eingespritzt wird.
- Evotherm 3G ist eine wasserfreie Variante von Evotherm.

#### Rediset WMX

Hier handelt es sich um eine Kombination aus kationischen Tensiden und organischen Additiven, die die Rheologie verändern. Die chemische Modifikation des Bitumens fördert die aktive Adhäsion zum Gestein. Andere Komponenten des Zusatzes reduzieren die Viskosität des Bindemittels. Rediset WMX kommt in der Form von Pellets vor und enthält kein Wasser. Durch die Zugabe von 1,5 – 2,0 M.-% vom Bitumen wird laut Hersteller eine Temperaturabsenkung von 15 bis 30 °C erreicht.

#### REVIX

Eine Vielfalt von Tensiden, Wachsen, Verarbeitungshilfsstoffen, Polymeren und anderen Materialien werden in diesem Verfahren verwendet, um die innere Reibung zwischen Partikeln zu vermindern. Hier ist eine Temperaturabsenkung laut Herstellerangaben von 15 bis 27°C möglich.

## 5.2 Klassifizierung von Gussasphalt

#### Produktnormen

Die Anforderungen der Regelwerke und Normen an die Baustoffe folgen grundsätzlich immer dem gleichen Schema. Die EN XXX sind die harmonisierten Europäischen Rahmennormen und legen Anforderung und deren charakteristische Niveaus innerhalb von Anforderungskategorien fest. Die ÖNORM EN XXX ist die österreichische Umsetzung der EN XXX. Dabei werden geographische, topographische, klimatische und geologische Verhältnisse berücksichtigt und für Österreich geeignete Anforderungskategorien bestimmt.

#### Prüfnormen

Die EN YYYY sind die harmonisierten Prüfnormen der in der EN XXX definierten Anforderungen. Zusätzlich können weitere Anforderung bzw. Regeln für die Anwendung durch weitere ÖNORMEN und/oder Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) gefordert werden [85].

### Anforderungen

Anforderungen an das Gussasphaltemischgut sind in der EN 13108-6 [1] sowie der nationalen Umsetzung ÖNORM B 3585-1 [86] geregelt:

- Mindest-Bindemittelgehalt  $B_{min}$
- Mindestwert der Eindringtiefe nach 30 Minuten  $I_{min}$
- Höchstwert der Eindringtiefe nach 30 Minuten  $I_{max}$
- maximale Zunahme der Eindringtiefe nach 30 weiteren Minuten  $I_{ncmax}$
- maximale kumulative Verformung nach 2 500 Zyklen,  $U_{2\,500\,max}$
- maximale kumulative Verformung nach 5 000 Zyklen,  $U_{5\,000\,max}$
- Treibstoffbeständigkeit, maximaler Massenverlust  $C_{i,max}$
- verbleibende Mindest-Festigkeit  $\beta_{min}$
- maximale Bruchtemperatur  $TSRST_{max}$
- Höchsttemperatur des Asphaltmischgutes
- Grenzwerte der Korngrößenverteilung und die Kennzeichnung von Gussasphalt

Für Gussasphalte kann gemäß [86] 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 wird anhand eines exemplarischen Beispiels die Bezeichnung einer Gussasphaltekennzeichnung erläutert [1, 86, 87]. Die in der Tabelle 6 erläuterte Art der Mischgutkennzeichnung ist keine gültige Bezeichnung nach Europäischer Norm, findet jedoch in Österreich Anwendung und wird auch in dieser Arbeit verwendet. Grund dafür ist das, dass in Österreich häufig der Durchmesser des Kugeleindrucks bei Gussasphaltemischgütern angegeben wird. 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 3585-1 werden Anforderungen an diesen Kennwert gestellt. [87, 88]

Für Gussasphalt gibt es zwei Standfestigkeitsklassen M1 und M2, welche in der ÖNORM B 3585-1 hinsichtlich ihres Widerstands gegen bleibende Verformung definiert werden. M1 wird bei hochbelasteten Flächen verwendet und darf eine maximale Eindringtiefe  $I_{max}$  von 3,5 mm nach 30 Minuten aufweisen

**Tabelle 6: Erläuterung der Bestandteile einer in Österreich häufig benutzten Gussasphaltekennzeichnung [1, 87]**

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
KE 36	Kugeleindruckdurchmesser von 36 mm

Für beide Typen M1 und M2 sind alle in diesem Kapitel erwähnten Bindemittel zulässig. Laut der Norm hängen die Bindemittelart und die Zusammensetzung von Bindemittelmischungen vom geforderten Widerstand gegen die bleibende Verformung ab. Weitere Angaben sind nicht gemacht.

In der ÖNORM 3580 – 1 für Asphaltbeton findet man detailliertere Angaben in welchen Fällen und was für Bitumenarten verwendet werden: „Für die Typen A1, A5, A6 und A7 sind alle Bindemittel, für die Typen A2, A3 und A4 modifizierte Bindemittel gemäß 5.9 zulässig. Die Typen A2, A3 und A4 dürfen auch mit Straßenbaubitumen unter Verwendung von Bindemittel modifizierenden Zusätzen hergestellt werden.“ Das heißt, dass die Typen mit hohen Verformungsbeständigkeit mit PmB herzustellen sind [43]

Laut [87] sind Gussasphalte mit Größtkörnern 11, 8 und 4 herzustellen. Das Prüfprogramm im Kapitel 5 beinhaltet vier Gussasphalten (MA 11, MA 8 und zwei MA 4). Es fängt mit dem Mischgut für das hochrangige Straßennetz, das mit PmB 25/55-65 hergestellt wurde, und endet mit dem Mischgut für Gehsteige, dessen Bitumen mit einer Mischung aus Oxidations- und Destillationsbitumen hergestellt wurde. Aus Beispielen in der Praxis in Österreich, wo Gussasphalt mit Größtkorn 11 und PmB für Baustellen aus dem hochrangigen Straßennetz verwendet wurde, wurde als erstes Mischgut im Prüfprogramm das MA 11 PmB ausgewählt. Die anderen drei Mischgüter sind weitere Standardmischgüter in für Straßen-, Garagen und Gehsteigbefestigungen.

### 5.3 Ziele und Herangehensweise

Nachhaltigkeit im Bauwesen im Allgemeinen, sowie im Straßenbau im Besonderen ist ein Thema, das in den letzten 20 Jahren starke Beachtung erhalten hat. Ein nachhaltiger Baustoff muss dabei verschiedene Dimensionen berücksichtigen, unter anderem effizienten Umgang mit knappen, natürlichen Ressourcen und Energie, Kosteneffizienz und Gesundheitsaspekte von Personal und Nutzern. Der Verbrauch von Energie und Bitumen als knappe Ressourcen hat aufgrund der hohen Produktionstemperaturen und der Zusammensetzung spezielle Relevanz für Gussasphalt. Zentrales Thema des Kapitels 5 ist die Implementierung von Niedertemperaturasphalt-Technologien für die Produktion von Gussasphalt und damit die Reduktion des Energieeinsatzes und der Treibhausgas-Emissionen (THG) in der Asphaltindustrie.

Folgende Ziele sind definiert:

- Auswahl von Produkten und Methoden für die Temperaturabsenkung von Gussasphalten und Optimierung von den temperaturabgesenkten Gussasphalten im Labor. Durch eine detaillierte Sichtung der am Markt befindlichen Produkte und Methoden zur Temperaturabsenkung, werden die Produkte und Methoden herausgefiltert, die für den Einsatz bei temperaturabgesenkten Gussasphalten geeignet sind.
- Optimierung der Temperaturabsenkung von Gussasphalt durch die ausgewählten Produkte und Methoden (Wachsmodifikation bzw. gezielte Substitution von Kantkorn (KK) durch Rundkorn (RK)).
- Temperaturabsenkung auf Bitumenebene. Das Ausgangsbitumen wird zuerst mit verschiedenen Additiven und Additivegehalten gemischt und dann wird mittels des Rotationsviskosimeters (RV) das Temperaturabsenkungspotential ermittelt.
- Temperaturabsenkung auf Mischgutebene. Es wird Gussasphalt anhand verschiedener Zusätze/Methoden zur Temperaturabsenkung hergestellt und dann wird mittels Drehmomentmessungen das Temperaturabsenkungspotential ermittelt.

- Untersuchung des Gebrauchsverhaltens (Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und Kälterisse). Es wurde das Gebrauchsverhalten sowohl des Referenzmischgutes als auch der temperaturabgesenkten Mischgüter bestimmt, damit festgestellt werden kann, bei welchen modifizierten Mischgütern eine maximale Temperaturabsenkung bei gleichem oder besseren Gebrauchsverhalten wie das Referenzmischgut erreicht wird.

## 5.4 Materialien

### 5.4.1 Additive und Methoden

Im Kapitel 5.1.3 werden verschiedene Produkte und Methoden zur Temperaturabsenkung von Asphalten beschreiben. Im aktuellen Kapitel 5.4.1 wurden in die engere Auswahl nur diese, die für den Einsatz bei temperaturabgesenkten Gussasphalten geeignet sind, genommen. Dabei werden sowohl Bitumen- und Asphaltadditive als auch verfahrenstechnische Möglichkeiten berücksichtigt. Über die Analyse der in der Literatur angegebenen Energie- und Emissionseinsparungen bei Walzasphalten können die Produkte/Methoden mit höchstem Potenzial ausgewählt werden. Die organischen Additive (Wachse) umfassen den größten Teil der Literaturrecherche, weil sie einen großen Einsatz bei der Temperaturabsenkung von Asphalten finden und sich am besten zur Optimierung von Gussasphalt eignen.

Folgende Additive und Methoden wurden ausgewählt:

- Fischer-Tropsch-Wachs (**FTW**)
- Amidwachs (**AW**)
- Polyethylenwachs (**PW**)
- Rundkorn (**RK**)
- Zeolithe (**Z**) + Amidwachs (**AW**) [89]

### 5.4.2 Bitumen

Bei der Optimierung des Gussasphalts mit Größtkorn 11 wurde PmB 25/55-65 verwendet. In Tabelle 8 sind einige Kennwerte zu sehen.

Tabelle 8: Bindemittelkennwerte PmB 25/55-65

Parameter	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	53 [1/10 mm]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	72.8 °C

Bei der Optimierung der Gussasphalte mit Größtkorn 8 und 4 wurden Mischungen vom Oxidationsbitumen 90/10 und dem Destillationsbitumen 70/100 verwendet. In Tabelle 9 und

Tabelle 10 sind einige Kennwerte beider Bitumen zusammengefasst.

Tabelle 9: Bindemittelkennwerte 90/10

Parameter	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	10 [1/10 mm]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	93,0 °C

Tabelle 10: Bindemittelkennwerte 70/100

Parameter	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	80 [1/10 mm]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	45,2 °C

### 5.4.3 Gestein

Die im Zuge dieser Arbeit geprüften Gussasphaltemischgüter beinhalten die Gesteinsarten Kalkstein, Dolomitstein, Kersantit und karbonatischer Kies.

Kalkstein (**Fremdfüller/Kalksteinmehl**) 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. Der Kalkstein kommt zum Einsatz bei der nachfolgenden Gussasphaltoptimierung in der Form von Kalksteinmehl [90].

Dolomitstein (Kantkorn **KK**) 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. Im Rahmen dieser Arbeit wurde Dolomitstein aus Steinbruch **Gaaden** verwendet. [90, 91].

Kersantit (Kantkorn **KK**) ist eine Unterart der Gesteinsart Lamprophyr und tritt als Ganggestein auf. Ganggesteine sind Erstarrungsgesteine (magmatische Gesteine/Magmatite) und entstehen durch Erstarren von Gesteinsschmelze (Magma) in Spalten (Trennflächen im Gestein) in einer geringen Krustentiefe. Kersantit ist zäh, hart und hat eine gute Bitumenhaftung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde Kersantit aus Steinbruch **Loja** verwendet [91, 92].

Karbonatischer Kies (Rundkorn **RK**) ist ein typisches Sediment von Fließgewässern, die in Kalkgebieten vorkommen. Der Transport in Bächen und Flüssen erfolgt als Boden- oder Schleppfracht, was letztlich, bei ausreichender Transportdistanz, für die Zurundung der Körner sorgt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde karbonatischer Kies (später in dieser Arbeit Rundkorn genannt) aus Kiesgrube **Badenerstraße** verwendet [90, 93].

### 5.4.4 Gussasphaltarten

Das Prüfprogramm im Kapitel 5 beinhaltet vier Gussasphaltarten. Es fängt mit dem Mischgut für das hochrangige Straßennetz, das mit PmB 25/55-65 hergestellt wurde, und endet mit dem Mischgut für Gehsteige, das mit einer Mischung aus Oxidations- und Destillationsbitumen hergestellt wurde:

- MA 11 PmB 25/55-65, M1, G1, KE36 (**MA 11**)
- MA 8 90/10, M1, G1, KE36 (**MA 8**)
- MA 4 90/10, M2, G3, KE33 (**MA 4 Garage**)
- MA 4 90/10 M2, G3, KE36 (**MA 4 Gehsteig**)

### 5.4.5 MA 11

In diesem Kapitel wird das Mischgut MA 11 im Detail vorgestellt. Als Fremdfüller wird Kalksteinmehl eingesetzt, die Kantkörnung ist Kersantit, die Rundkörnung karbonatischer Kies. Als Bindemittel kommt PmB 25/55-65 zum Einsatz. Die Sieblinie des Mischguts ist in Abbildung 29 dargestellt. Wesentlich ist, dass bei Substitution des Kantkorns durch Rundkorn lediglich die feine und grobe Gesteinskörnung ausgetauscht wurde. Füllerart, Füllergehalt, Bitumen und Bitumengehalt, sowie Sieblinien blieben dabei unverändert. Für die Optimierung der Temperaturabsenkung durch Wachsmodifikation kamen kommerzielle Produkte zum Einsatz: Amidwachs (AW), Fischer-Tropsch Wachs (FTW) sowie Polyethylenwachs (PW).

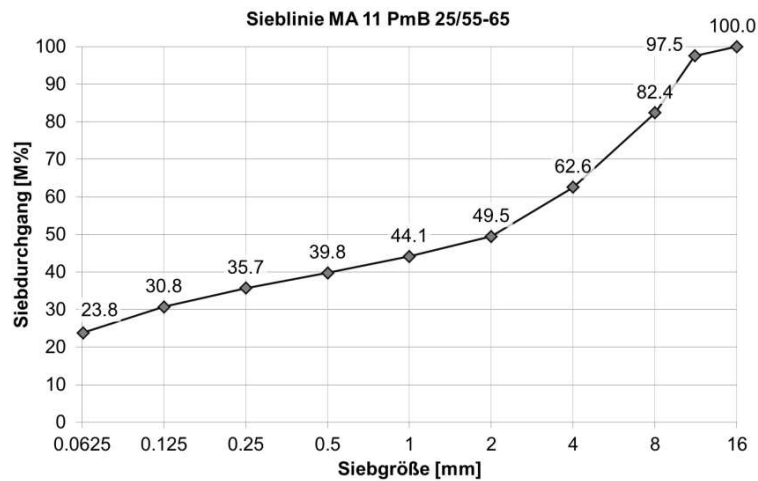


Abbildung 29: MA 11 Sieblinie

In Tabelle 11 sind alle geprüften MA 11 Mischgutvarianten aufgelistet. In der gesamten Arbeit sind die Wachsanteile auf den Bitumengehalt bezogen.

Tabelle 11: MA 11 Mischgutvarianten

Variante	Beschriftung	Anmerkungen
0	Referenz	
1	4%AW	Bei Variante 1 wird das Referenzmischgut mit 4 M% AW modifiziert.
2	10%AW	Bei Variante 2 wird das Referenzmischgut mit 10 M% AW modifiziert.
3	4%FTW	Bei Variante 3 wird das Referenzmischgut mit 4 M% FTW modifiziert.
4	4%PW	Bei Variante 4 wird das Referenzmischgut mit 4 M%PEW modifiziert.
5	4%AW + 0,5%Z	Bei Variante 5 wird das Referenzmischgut mit 4 M%AW und 0,5 M%Z modifiziert.
6	4%AW + 2,5%Z	Bei Variante 6 wird das Referenzmischgut mit 4 M%AW und 2,5 M%Z modifiziert.
7	KKRK 0/4	Bei Variante 7 wird das Kantkorn 0/4 durch Rundkorn 0/4 ersetzt.
8	KKRK 4/11	Bei Variante 8 wird das Kantkorn 4/11 durch Rundkorn 4/11 ersetzt.
9	KKRK 4/11 4%AW	Bei Variante 8 wird das Kantkorn 4/11 durch Rundkorn 4/11 ersetzt und zusätzlich mit 4 M%AW modifiziert.
10	RK	Bei Variante 9 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt.
11	RK 4%AW	Bei Variante 10 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 4 M%AW modifiziert.
12	RK 2,5%AW	Bei Variante 11 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 2,5 M%AW modifiziert.

Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 zeigen die Rezepturen der betrachteten Varianten im Überblick.

Tabelle 12: MA 11 Rezepturen der Varianten mit Wachsmodifikation

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
		Referenz	4%AW	10%AW	4%FTW	4%PW
Bindemittel	PmB 25/55-65	8,20 M%	7,87 M%	7,38 M%	7,87 M%	7,87 M%
Additiv	Wachs		0,33 M%	0,82 M%	0,33 M%	0,33 M%
Füller	Kalksteinmehl	26,3 M%	26,3 M%	26,3 M%	26,3 M%	26,3 M%
Gesteinskörnung	KK	65,5 M%	65,5 M%	65,5 M%		
	RK				65,5 M%	65,5 M%

Tabelle 13: MA 11 Rezepturen der Varianten mit Zeolithen

		Variante 5 4%AW + 0,5%Z	Variante 6 4%AW + 2,5%Z
Bindemittel	PmB 25/55-65	7,87 M%	7,87 M%
Additiv	Wachs	0,33 M%	0,33 M%
Füller	Kalksteinmehl	26,17 M%	25,64 M%
	Zeolith	0,13 M%	0,66 M%
Gesteinskörnung	KK	65,5 M%	65,5 M%
	RK		

Tabelle 14: MA 11 Rezepturen der Varianten mit Rundkorn

		Variante 7 KKRK 0/4	Variante 8 KKRK 4/11	Variante 9 KKRK 4/11 4%AW	Variante 10 RK	Variante 11 RK 4%AW	Variante 12 RK 2,5%AW
Bindemittel	PmB 25/55-65	8,20 M%	8,2 M%	7,87 M%	8,20 M%	7,87 M%	7,99 M%
Additiv	Wachs			0,33 M%		0,33 M%	0,21 M%
Füller	Kalksteinmehl	27,1 M%	26,1 M%	26,1 M%	27,5 M%	27,5 M%	27,5 M%
Gesteinskörnung	KK	33,9 M%	35,7 M%	35,7 M%			
	RK	30,8 M%	30,0 M%	30,0 M%	64,3 M%	64,3 M%	64,3 M%

#### 5.4.6 MA 8

In diesem Kapitel wird das Gussasphaltmischgut MA 8 im Detail vorgestellt. Als Fremdfüller wird Kalksteinmehl eingesetzt, für Kantkörnung wird Dolomitgestein aus Steinbruch Gaaden und Kersantit aus Steinbruch Loja verwendet. Die Rundkörnung ist karbonatischer Kies aus Kiesgrube Badenerstraße. Als Bindemittel kommt eine Mischung von Oxidationsbitumen 90/10 und Destillationsbitumen 70/100 zum Einsatz (82% 90/10 + 18% 70/100). Die Sieblinie des Mischguts ist in Abbildung 30 dargestellt und wesentliche Bindemittelkennwerte in

Tabelle 15. Bei der Substitution des Kantkorns (KK) durch Rundkorn (RK) wurde lediglich die feine und grobe Gesteinskörnung ausgetauscht. Füllerart, Füllergehalt, Bitumen und Bitumengehalt, sowie Sieblinien blieben dabei unverändert. Für die Optimierung der Temperaturabsenkung durch Wachsmodifikation kamen kommerzielle Produkte zum Einsatz: Amidwachs (AW) und Montanwachs (MW)

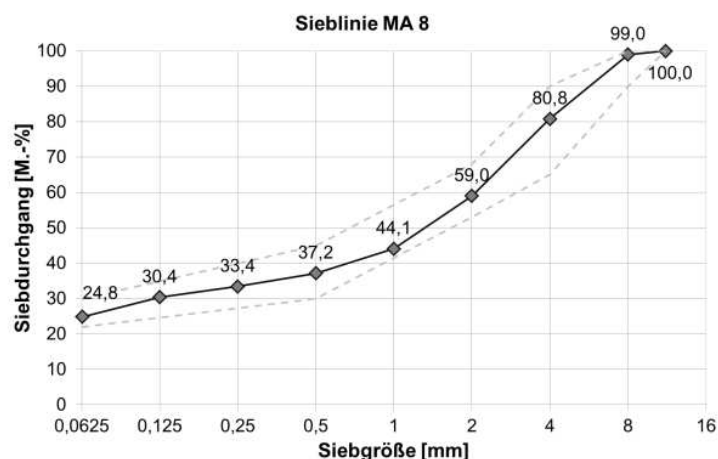


Abbildung 30: MA 8 Sieblinie



Tabelle 15: Bindemittelkennwerte

Parameter	70/100	90/10	82% 90/10 + 18% 70/100
	Wert	Wert	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	89 [1/10 mm]	10 [1/10 mm]	19 [1/10 mm]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	45,2 °C	93,0 °C	81,5 °C

Das Referenzmischgut ist ein nicht modifiziertes MA 8 Mischgut. Zusätzlich wurden Mischgüter mit verschiedenen Additiven und Additivgehalten verwendet. Eine Alternative zur Temperaturabsenkung ist die Substitution des Kantkorns mit Rundkorn. Es wurden Mischgüter entwickelt, wo nur ein Teil der Körnung mit Rundkorn war (2/8) und Mischgüter wo die ganze Sieblinie aus Rundkorn besteht. Es ist wichtig zu erwähnen, dass der Füllergehalt und die Sieblinie unverändert bleiben.

Da der Mastix eine entscheidende Rolle für die Eigenschaften des Gussasphalts spielt, wurde zusätzlich zum Prüfprogramm für MA 8 der Anteil des Füllers im Mastix geändert und dessen Auswirkung auf die Verarbeitbarkeit untersucht. Der Einfluss des Füllergehaltes auf das Gebrauchsverhalten wird im Kapitel 5.7.4 beleuchtet. In Tabelle 16 sind alle geprüften MA 8 Mischgutvarianten aufgelistet.

Tabelle 16: MA 8 Mischgutvarianten

Variante	Beschriftung	Anmerkungen
0	Referenz	
1	2%AW	Bei Variante 1 wird das Referenzmischgut mit 2 M% AW modifiziert.
2	3%AW	Bei Variante 2 wird das Referenzmischgut mit 3 M% AW modifiziert.
3	KKRK	Bei Variante 3 wird das Kantkorn 2/8 durch Rundkorn 2/8 ersetzt.
4	KKRK 2%AW	Bei Variante 4 wird das Kantkorn 2/8 durch Rundkorn 2/8 ersetzt und zusätzlich mit 2 M%AW modifiziert.
5	RK	Bei Variante 5 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt.
6	RK 2%AW	Bei Variante 6 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 2 M%AW modifiziert.
7	RK 3%AW	Bei Variante 7 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 3 M%AW modifiziert.
8	RK 4%AW	Bei Variante 8 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 4 M%AW modifiziert.
9	RK 4%MW	Bei Variante 9 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 4 M%MW modifiziert.
10	(-) Füller	Bei Variante 10 wird die Sieblinie so geändert, dass mit 5 Prozentpunkte weniger Fremdfüller verwendet wurde.

Tabelle 17, Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen die Rezepturen der betrachteten Varianten im Überblick.

Tabelle 17: MA 8 Rezepturen der Varianten mit KK und KKRK

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
		Referenz	2%AW	3%AW	KKRK	KKRK 2%AW
Bindemittel	82% 90/10 + 18% 70/100	8,90 M%	8,72 M%	8,63 M%	8,9 M%	8,72 M%
Additiv	Wachs		0,18 M%	0,27 M%		0,18 M%
Füller	Kalksteinmehl	20,0 M%	20,0 M%	20,0 M%	20,0 M%	20,0 M%
Gesteins- körn- ung	(KK)   Gaaden	39,1 M%	39,1 M%	39,1 M%	39,1 M%	39,1 M%
	(RK)   Loja	32,0 M%	32,0 M%	32,0 M%		
					32,0 M%	32,0 M%

Tabelle 18: MA 8 Rezeptur der Varianten mit Rundkorn

		Variante 5	Variante 6	Variante 7	Variante 8	Variante 9
		RK	RK 2%AW	RK 3%AW	RK 4%AW	RK 4%MW
Bindemittel	82% 90/10 + 18% 70/100	8,90 M%	8,72 M%	8,63 M%	8,54 M%	8,54 M%
Additiv	Wachs		0,18 M%	0,27 M%	0,36 M%	0,36 M%
Füller	Kalksteinmehl	25,0 M%	25,0 M%	25,0 M%	25,0 M%	25,0 M%
Gesteins-kör- nung	KK					
	RK	66,1 M%	66,1 M%	66,1 M%	66,1 M%	66,1 M%

Tabelle 19: MA 8 Rezeptur der Variante MA8 (-)Füller

		Variante 10 (-) Füller
Bindemittel	82% 90/10 + 18% 70/100	8,90 M%
Additiv	Wachs	
Füller	Kalksteinmehl	15,0 M%
Gesteinskör- nung	KK   Gaaden	39,1 M%
	RK   Loja	37,0 M%

In Abbildung 31 ist die Sieblinie der Mischgutvariante MA 8 (-)Füller zu sehen, die gröber als die Referenz ist.

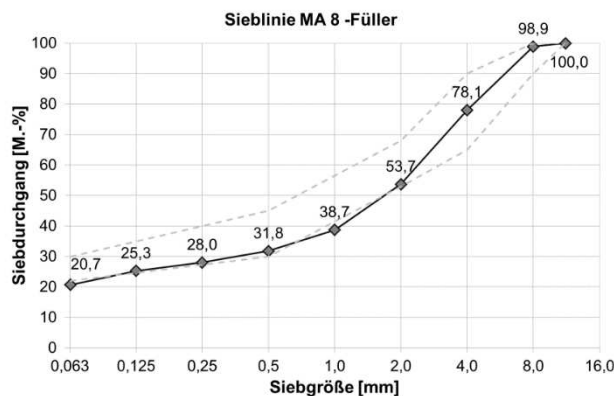


Abbildung 31: Sieblinie MA 8 (-) Füller

### 5.4.7 MA 4

In diesem Kapitel werden die Gussasphaltmischgüter MA 4 Garage und MA 4 Gehsteig im Detail vorgestellt. Als Fremdfüller wird Kalksteinmehl eingesetzt, die Kantkörnung ist Dolomitgestein, die Rundkörnung karbonatischer Kies. Als Bindemittel kommen zwei Mischungen von Oxidationsbitumen 90/10 und Destillationsbitumen 70/100 zum Einsatz:

- 90% 90/10 + 10% 70/100 (Garage)
- 85% 90/10 + 15% 70/100 (Gehsteig)

Die Sieblinie der Mischgüter ist in Abbildung 32 dargestellt, wesentliche Bindemittelkennwerte in Tabelle 20. Bei der Substitution des Kantkorns (KK) durch Rundkorn (RK) wurde lediglich die feine und die grobe Gesteinskörnung ausgetauscht. Füllerart, Füllergehalt, Bitumen und Bitumengehalt, sowie Sieblinien blieben dabei unverändert. Für die Optimierung der Temperaturabsenkung durch Wachsmodifikation kam ein kommerzielles Amidwachs (AW) zum Einsatz.

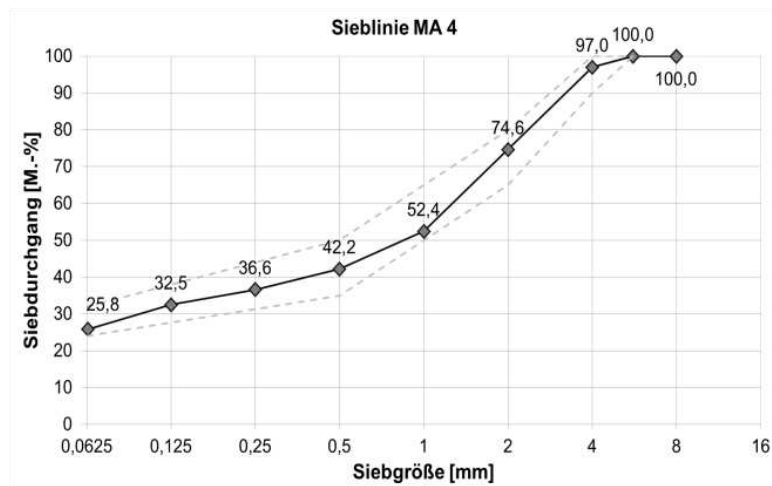


Abbildung 32: MA 4 Sieblinie

Tabelle 20: Bindemittelkennwerte

Parameter	90% 90/10 + 10% 70/100	85% 90/10 + 15% 70/100
	Wert	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	15 dmm	16 dmm
Erweichungspunkt Ring und Kugel	86,0 °C	85,5 °C

Garagenmischgut

In Tabelle 21 sind alle geprüften MA 4 (Garage) Mischgutvarianten aufgelistet.

Tabelle 21: MA 4 (Garage) Mischgutvarianten

Variante	Beschriftung	Anmerkungen
0	Referenz	
1	KKRK	Bei Variante 1 wird das Kantkorn 2/4 durch Rundkorn 2/4 ersetzt.
2	3%AW	Bei Variante 2 wird das Referenzmischgut mit 3 M% AW modifiziert.
3	RK	Bei Variante 3 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt.
4	RK 3%AW	Bei Variante 4 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 3 M% AW modifiziert.

Tabelle 22 zeigt die Rezepturen der betrachteten Varianten im Überblick.

Tabelle 22: MA 4 Garagenmischgut Rezeptur der vier betrachteten Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
		Referenz	KKRK	KK 3%W	RK	RK 3%W
Bindemittel	90% 90/10 + 10% 70/100	9,20 M%	9,2 M%	8,92 M%	9,2 M%	8,92 M%
Additiv	Amidwachs			0,28 M%		0,28 M%
Füller	Kalksteinmehl	24,8 M%	24,8 M%	26,3 M%	26,0 M%	26,0 M%
Gesteinskörnung	KK (Gaaden)	66,0 M%	50,0 M%	65,5 M%		
	RK		16,0 M%		64,8 M%	64,8 M%

Der Unterschied zwischen dem Garagen- und Gehsteigmischgut ist lediglich das Bindemittel. Das Garagenmischgut hat ein härteres Bindemittel und somit ist es steifer als das Gehsteigmischgut. Es ist zu erwarten, dass das Gehsteigmischgut bessere Verarbeitbarkeit, besseres Verhalten bei tiefen Temperaturen aber schlechteres bei hohen Temperaturen als das Garagenmischgut haben wird. Aus diesem Grund wurde ein anderes Prüfprogramm für das Gehsteigmischgut geplant. Die Optimierung mit RK und AW bleibt zur Kontrolle analog der Modifikation vom Garagenmischgut. Neu sind die Varianten (-) Füller und (+) Füller, wo die Sieblinie variiert wurde.

Gehsteigmischgut

In Tabelle 23 sind alle geprüften MA 4 (Gehsteig) Mischgutvarianten aufgelistet.

Tabelle 23: Mischgutvarianten

Variante	Beschriftung	Anmerkungen
0	Referenz	
1	RK 3%AW	Bei Variante 1 wird das Kantkorn vollständig durch Rundkorn ersetzt und zusätzlich mit 3 M% AW modifiziert.
2	(-) Füller	Variante 2 hat eine feinere Sieblinie und mit 5 Prozentpunkte weniger Fremdfüller als die Referenz.
3	(+) Füller	Variante 3 hat eine gröbere Sieblinie und mit 5 Prozentpunkte mehr Fremdfüller als die Referenz.

Tabelle 24 zeigt die Rezepturen der betrachteten Varianten im Überblick.

Tabelle 24: MA 4 Gehsteigmischgut Rezepturen der vier betrachteten Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3
		Referenz	RK 3%AW	(-) Füller	(+) Füller
Bindemittel	85% 90/10 + 15% 70/100	9,20 M%	8,92 M%	9,2 M%	9,2 M%
Additiv	Amidwachs		0,28 M%		
Füller	Kalksteinmehl	24,8 M%	26,0 M%	19,8 M%	29,8 M%
Gesteinskörnung	KK (Gaaden) RK	66,0 M%	64,8 M%	71,0 M%	61,0 M%

In Abbildung 33 sind die Sieblinien von Varianten 2 und 3 zu sehen. Die Variante 2 hat eine feinere und Variante 3 eine gröbere Sieblinie als die Referenz.

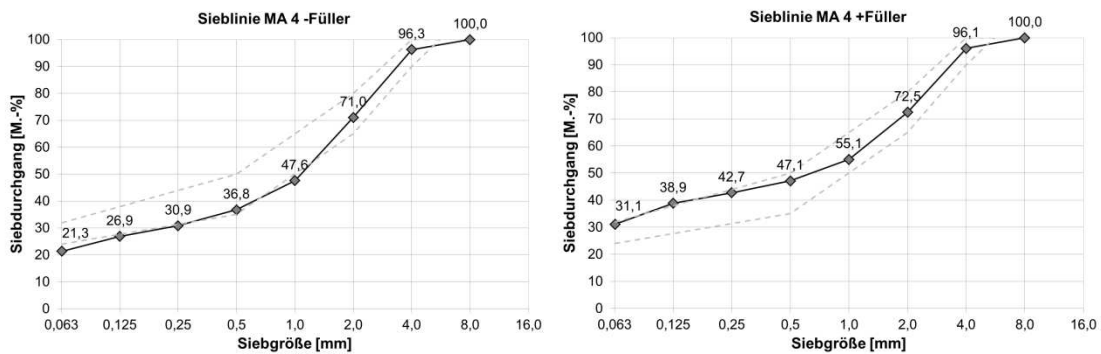


Abbildung 33: Sieblinie von Variante 2 (links) und Variante 3 (rechts)

## 5.5 Prüfmethoden

### 5.5.1 Temperaturabsenkung

Zwei Prüfmethoden wurden eingesetzt, um das Absenkpotential auf Bitumen- und Mischgutebene zu analysieren und zu vergleichen: der Rotationalviskosimeter (RV) und die Messung des Mischmoments in einem Gegenlaufszwangsmischer, wie er für die Laborproduktion von Asphaltmischgut eingesetzt wird.

Im Kapitel 4 wurden zwei Methoden zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit vorgestellt. Im aktuellen Kapitel 5 werden nur Ergebnisse von den Mischmoment-Messungen präsentiert. Grund dafür ist die chronologische Entwicklung beider Versuchsarten. Der Versuch Ausbreitmaß für Gussasphalt wurde später als die Mischmoment-Messungen entwickelt. Es ist erst am Ende des Prüfprogramms des aktuellen Kapitels zu den Überlegungen gekommen, wie mit einem einfacheren Versuch die Verarbeitbarkeit bestimmt werden kann.

#### 5.5.1.1 Rotationalviskosimeter (Bitumenebene)

Mithilfe des RVs kann die dynamische Viskosität von Bindemitteln in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt werden. Abbildung 34 zeigt den schematischen Aufbau: ein koaxiales System aus einer statischen, äußeren Hülle (1) und einer rotierenden inneren Spindel (2). Die Hülle wird mit Bitumen gefüllt (4). Das Moment, das notwendig ist, um die Spindel mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 Umdrehungen pro Minute zu bewegen, steht in direktem Zusammenhang zur dynamischen Viskosität der Probe. Die Prüfung wurde gemäß EN 13302 [54] durchgeführt.

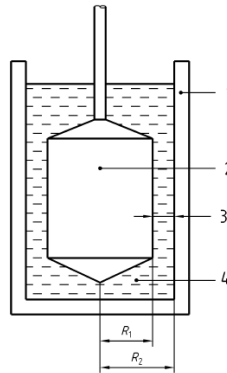


Abbildung 34: Prinzip des RVs [54]

#### 5.5.1.2 Mischmoment-Messungen (Mischgutebene)

Um das Potenzial zur Temperaturabsenkung nicht nur auf Bitumenebene zu untersuchen, sondern auch auf Mischgut-Ebene, wurden Mischmoment-Messungen mit Variation der Mischtemperatur durchgeführt. Die Prüfmethode ist im Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

### 5.5.2 Gebrauchsverhalten

Zur Ermittlung des Gebrauchsverhaltens wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Bitumenebene
  - Bending Beam Rheometer (BBR) gemäß EN 14771 [94]

Mithilfe vom BBR kann das Gebrauchsverhalten bei tiefen Temperaturen auf Bitumenebene festgestellt werden. Die Prüfmethode hat eine wichtige Rolle bei der Auswahl vom Bitumenadditiv gespielt (Kapitel 5.6.1.2).

- Mischgutebene
  - Abkühlprüfungen (TSRST) nach EN 12697-46 [58]
  - Einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT) nach EN 12697-25, Teil A [95]

Mit beiden Prüfmethoden konnten für die Gussasphalte GVO-kritische Kennwerte bestimmt werden (Kapitel 0).

### 5.5.2.1 Bending Beam Rheometer (BBR) gemäß EN 14771 [94]

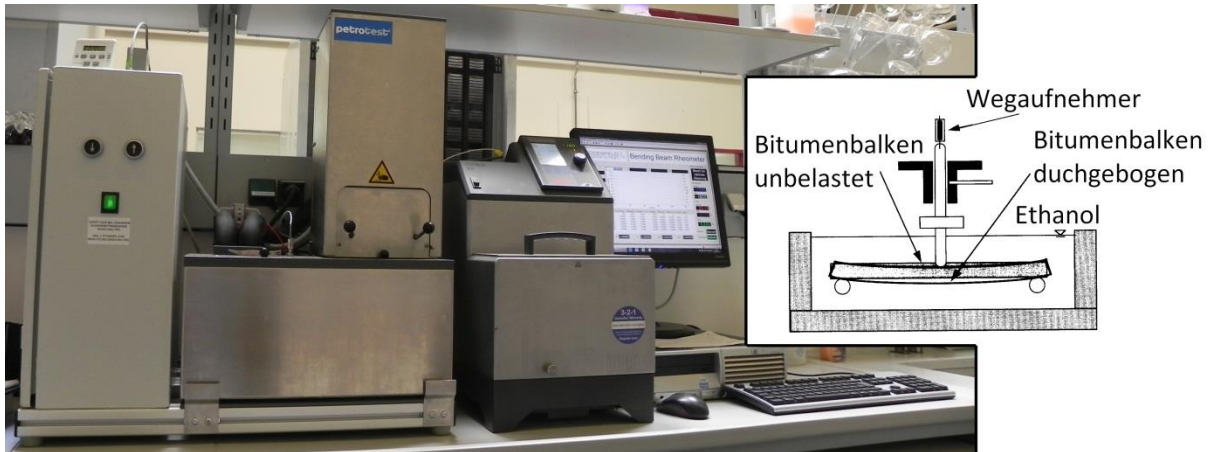


Abbildung 35: Bending Beam Rheometer (BBR) und Messprinzip [96]

Um das Tieftemperaturverhalten von Bitumen beurteilen zu können, wird mit Hilfe eines Bending Beam Rheometers BBR eine Biegezugspannung an einen Bitumenbalken eingebracht und die daraus resultierende Durchbiegung gemessen (Abbildung 35). Daraus kann die Steifigkeit  $S$  und ein sogenannter  $m$ -Wert (Relaxationsfähigkeit, Kriechfähigkeit) des Bitumens errechnet werden. Je geringer die Steifigkeit (verformbar) und je höher der  $m$ -Wert (Spannungen gut abbaubar), desto besser ist das Tieftemperaturverhalten von Bitumen. Um eine optimale Temperierung des Bitumenbalkens zu erreichen, wird die Messung in einem Ethanolbad durchgeführt. Wasser kann hier aufgrund der tiefen Temperaturen nicht verwendet werden. Die Messmethode selbst basiert auf der Balkentheorie (3-Punkt-Biegeversuch). In der Mitte des Bitumenbalkens wird über einen luftgelagerten Stempel eine Auflast von 980 mN aufgebracht. Diese Last wird eine bestimmte Zeit lang aufrechterhalten und über einen Kraftaufnehmer ständig gemessen (Abbildung 35). Dadurch beginnt sich der Balken langsam durchzubiegen. Diese Durchbiegung wird mit einem Wegaufnehmer gemessen und anschließend als Graph über der Zeit (logarithmisch) dargestellt (Abbildung 36). Aus der Belastung und der Durchbiegung kann zu jeder Zeit die Steifigkeit mit Gleichung (4) berechnet werden:

$$S(t) = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot \delta(t) \cdot b \cdot h^3} \quad (4)$$

$S$	Steifigkeit [MPa]
$P$	Auflast [N]
$L$	Abstand zwischen den Auflagern [mm]
$\delta$	Durchbiegung [mm]
$b$	Balkenbreite [mm]
$h$	Balkenhöhe [mm]

Die so errechnete Steifigkeit kann nun in einem doppelt logarithmischen Graph über der Zeit aufgetragen werden. Legt man an diese Kurve eine Tangente, so stellt deren Steigung die Relaxationsfähigkeit des Bitumens zu diesem Zeitpunkt dar. D.h. fällt die Steifigkeitskurve mit zunehmender Zeit stark ab, so hat die an diese Kurve gelegte Tangente eine größere Steigung (m-Wert). Eine mit der Zeit abnehmende Steifigkeit bedeutet auch, dass der Abbau der eingebrachten Biegezugspannung infolge hoher Bitumenrelaxation groß ist. Um die Prüfzeit im Labor zu verkürzen, wird für diesen Versuch das „Zeit-Temperatur Superpositionsprinzip“ angewendet. Damit die Spannung auf den Bitumenbalken nicht über zwei Stunden aufrecht erhalten werden muss, um den maßgebenden Wert zu erreichen, wird der Biegeversuch nicht bei  $T_{min}$ , sondern bei  $T_{min}+10^{\circ}C$  durchgeführt. Dadurch wird die relevante Durchbiegung schon nach 60 Sekunden erreicht (Abbildung 36). Zur Ermittlung eines ausreichenden Zusammenhanges zwischen Kriechsteifigkeit und Belastungsdauer ist eine Gesamtversuchsdauer von 240 Sekunden notwendig.

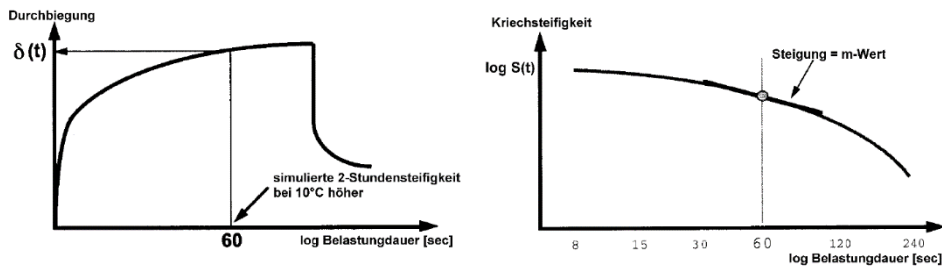


Abbildung 36: BBR, Durchbiegung, Steifigkeit, m-Wert [96]

Für den Biegebalkentest nach SUPERPAVE gelten die Grenzwerte  $S(60s) < 300$  MPa und  $m\text{-Wert}(60s) > 0,3$ . Ist  $S$  geringer als 300 MPa und der  $m$ -Wert über 0,3, so gelten die Tieftemperaturanforderungen für den betrachteten Temperaturbereich als erfüllt [94, 96].

#### 5.5.2.2 Abkühlprüfungen (TSRST) nach EN 12697-46 [58]

Abbildung 37 zeigt beispielhaft einen eingebauten prismatischen (50x50x200 mm) Probekörper zur Durchführung einer Abkühlprüfung (TSRST) nach EN 12697-46 [58] beginnend von einer Temperatur von  $+10^{\circ}C$  mit einer Abkühlrate von 10 K/h.



Abbildung 37: TSRST Aufbau

Mit der Abkühlprüfung wird die Temperatur bestimmt, bis zu der der Probekörper kryogene Zugspannungen aufnehmen kann, bevor er versagt. Bei der TSRST-Prüfung wird der Probekörper mit einer konstanten Geschwindigkeit abgekühlt, während seine Länge konstant bleibt. Hiermit wird ein verhindertes thermisches Schrumpfen erzielt, durch das kryogene Zugspannungen im Probekörper gebildet werden. Als Prüfergebnis



werden der Verlauf der kryogenen Zugspannungen über der Temperatur  $\sigma_{\text{kry}(T)}$ , die Ausfallspannung  $\sigma_{\text{kry, Ausfall}}$  und die Ausfalltemperatur  $T_{\text{Ausfall}}$  aufgezeichnet. Bei dieser Spannung und Temperatur reißt der Asphaltprobekörper. Die Bruchtemperatur  $T_{\text{Ausfall}}$  wird als Maß für die Beständigkeit gegen Kälterisse herangezogen.

Abbildung 38 zeigt der Verlauf von den einzelnen Prüfkomponenten in Abhängigkeit von der Zeit.

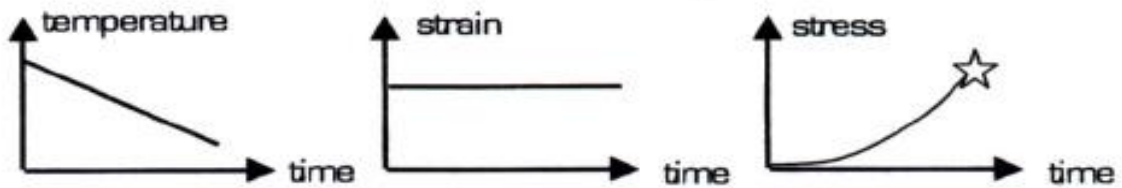


Abbildung 38: Versuchsschema der Abkühlprüfung [97]

### 5.5.2.3 Einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT) nach EN 12697-25, Teil A [95]

Abbildung 39 zeigt den Prüfaufbau für die einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT) nach EN 12697-25, Teil A [95] an zylinderförmigen Probekörpern (Durchmesser: 148 mm, Höhe: 60 mm) bei einer Temperatur von  $+50^{\circ}\text{C}$ . Die Belastung erfolgte mittels Blockimpuls mit einer Rate von 0,5 Hz. Die bleibende Axialverformung nach 3.600 LW wird als Maß für die Beständigkeit gegen bleibende Verformungen herangezogen.

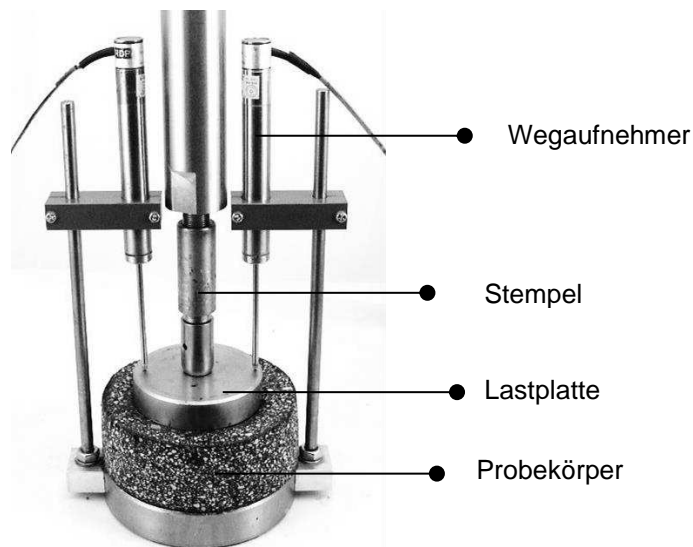


Abbildung 39: UCCT Aufbau

Bei dieser Prüfmethode wird ein zylindrischer Probekörper einer zyklischen Axialbelastung ausgesetzt. Um eine bestimmte Behinderung der Querdehnung zu erzielen, wird für die Lastplatte ein Durchmesser gewählt, der kleiner ist als der des Probekörpers.

#### Kurzbeschreibung

Mittels dieser Prüfmethode wird die Verformungsbeständigkeit der zylindrischen Probekörper bei hohen Temperaturen durch die zyklische Belastung bestimmt. Die zylindrischen Probekörper können entweder im Labor hergestellt oder aus der Straße gewonnen werden. Wenn der Probekörper auf die Prüftemperatur temperiert worden ist, kann der Probekörper zwischen zwei parallelen Lastplatten angeordnet werden. Der Durchmesser der oberen Platte beträgt 100 mm. Die Fassung auf der Unterseite der Platte ist 4 mm, deshalb ist der wirkliche Durchmesser, mit dem die Platte den Asphaltprobekörper presst, 96 mm. Die Belastung

erfolgt mittels Blockimpuls. Im Verlauf der Prüfung wird die Veränderung der Höhe des Probekörpers nach 3600 von Belastungszyklen bestimmt. Hiermit wird die bleibende Axial-Verformung des Probekörpers (in %) als Funktion der Anzahl der einaxialen Druckstößen gerechnet. Die Prüfergebnisse werden als Kriechkurve dargestellt.

### Probekörpervorbereitung

Die Probekörper müssen eine zylindrische Form haben und die Oberflächen der Probekörper müssen glatt und eben sein. Die Probekörper müssen  $60 \pm 2$  mm hoch sein und einen Durchmesser von  $148 \pm 5$  mm haben. Die in dieser Arbeit geprüften Probekörper wurden aus im Labor hergestellten Asphaltplatten herausgebohrt.

## 5.6 Optimierung auf Bitumenebene

Bei der Optimierung auf Bitumenebene wurde ausschließlich das Bindemittel PmB 25/55-65 verwendet. Der Anteil von 10 M% und 30 M% Wachsuzsatz wurde nur versuchsweise durchgeführt. In der Praxis werden derart hohe Gehalte nicht angewendet. Bei den Proben mit 30 M% Zusatz werden nur AW und FTW getestet, weil sich die Mischung von Bitumen mit einem so hohen Anteil an PW und MW nicht homogenisieren lässt.

### 5.6.1 Prüfprogramm

#### 5.6.1.1 Rotationalviskosimeter (RV)

Tabelle 25 zeigt das Prüfprogramm im RV. Die dynamische Viskosität wurde für das Grundbitumen (PmB) bestimmt, sowie für modifizierte Bindemittel mit unterschiedlichen Wachgehalten von 2 M% bis 30 M% bezogen auf die Bindemittelmasse. Die Proben wurden jeweils auf  $135^{\circ}\text{C}$  erhitzt und anschließend wurden Messungen bei  $135^{\circ}\text{C}$ , sowie  $140^{\circ}\text{C}$  bis  $250^{\circ}\text{C}$  in 10 K Schritten durchgeführt. Bei jeder Temperatur erfolgte eine dreifache Bestimmung. Das Grundbitumen, sowie das Bitumen mit 4 M% AW wurde an drei verschiedenen Proben wiederholt, um die Wiederholbarkeit der Prüfung, sowie der Wachsmodifikation zu überprüfen.

Tabelle 25: Prüfprogramm RV

	0 M.%	2 M%	4 M%	6 M%	10 M%	30 M%
PmB	3x					
AW		x	3x	x	x	x
FTW		x	x	x	x	x
MW		x	x	x		
PW		x	x	x	x	

Die Ermittlung der möglichen Temperaturabsenkung erfolgte dermaßen, dass zunächst die Viskosität des Grundbitumens bei  $230^{\circ}\text{C}$  ermittelt wurde. Die entsprechenden äquiviskosen Temperaturen (Temperatur, bei der sich dieselbe Viskosität einstellt) der wachsmodifizierten Proben wurden im Anschluss ermittelt. Die Temperaturdifferenz bei Äquiviskosität ergibt das Absenkpotenzial

### 5.6.1.2 Bending Beam Rheometer (BBR) gemäß EN 14771

In Tabelle 26 ist das Prüfprogramm BBR zu sehen. Die Probe 4 M%AW wurde 3x gemischt zur Verifizierung der Genauigkeit mehrerer Einzelmischungen gleicher Rezeptur.

Tabelle 26: Prüfprogramm BBR

	0 M%	2 M%	4 M%	6 M%	10 M%	30 M%
PmB	x					
AW		x	x	x	x	x
FTW		x	x	x	x	x
MW		x	x	x	x	
PW		x	3x	x	x	

### 5.6.2 Vorbereitung Bitumenproben

#### Kurzbeschreibung

Das Bitumen und der entsprechende Zusatz werden bei 185°C aufgeheizt, damit ein erforderlicher flüssiger Zustand erreicht wird. Sie werden in Dosen mit einem Füllvolumen von 2 l eingefüllt und die Mischung verläuft zwischen 10 und 24 Minuten bei 185°C.

#### Die Vorbereitung des Bitumens

Zuerst wird das Bitumen in einem belüfteten Wärmeschrank 4 Stunden bei 185°C aufgeheizt. Danach wird es in 2 l Dosen eingegossen, in denen später das Mischen stattfindet.

#### Vorbereiten des Zusatzes

Hinsichtlich des Prüfprogramms kann der prozentuelle Anteil des Zusatzes im Bitumen variieren. Es ist besser für das Mischen, wenn der Zusatz vor dem Mischvorgang in einem flüssigen Zustand ist. Das Aufheizen bei 185°C dauert zwischen 10 und 20 Minuten je nach Menge des Zusatzes.

#### Mischen

Die Dose mit dem auf 185 °C temperierten Bitumen wird auf einem vortemperierten Sandbad zusammen mit einer Heizmanschette gestellt. Sandbad und Manschette sind wegen des Wärmeverlusts höher auf 220°C eingestellt. Die davor definierte Masse vom Additiv wird zum Bitumen zugegeben. Das Bitumen zusammen mit dem Additiv werden mittels Bitumenmischer homogenisiert. In Tabelle 27 sind die Mischbedingungen zusammengefasst (Temperatur, Dauer, Umdrehungen pro Minute)

Tabelle 27: Mischbedingungen Bitumenproben

Bitumen	Menge Additive [%]	Dauer [min]	U/Min	Temperatur [°C]
PmB 25/55-65	2	10	200-400	185 +/- 5°C
PmB 25/55-65	4	10	200-400	185 +/- 5°C
PmB 25/55-65	6	12	200-400	185 +/- 5°C
PmB 25/55-65	10	12	200-400	185 +/- 5°C
PmB 25/55-65	30	12	600	185 +/- 5°C

Nach dem Mischen das Bitumen werden die RV/BBR Proben gegossen und für 24 Stunden auf Raumtemperatur temperiert.

### 5.6.3 Ergebnisse

#### 5.6.3.1 Temperaturabsenkung

Die ausgewählten Produkte/Methoden wurden zunächst kleinmaßstäblich mittels des Rotationalviskosimeters (RV) im Labor geprüft, um ihr Temperaturabsenkungspotenzial auf Bitumenebene zu bestimmen. Ziel ist eine maximale Temperaturabsenkung bei gleichbleibender Verarbeitbarkeit zu erreichen. Mit RV wurde die Viskosität des Bitumens bei verschiedenen Temperaturen und Additivgehalte bestimmt. Durch Messung der dynamischen Bindemittelviskosität soll die Verarbeitbarkeit des Bitumens ausgewertet werden, um eine ausreichende Pumpfähigkeit und Mischbarkeit sicherzustellen.

RV Tests wurden laut des Versuchsprogramms in Tabelle 25 durchgeführt. In Abbildung 40 sind alle durchgeführten Versuche dargestellt. Auf der x-Achse der Diagramme ist die Prüftemperatur in °C und auf der y-Achse die dynamische Viskosität in mPa\*s gezeigt. In Abbildung 40 sind vier Diagrammen für jeweils ein Additiv bei verschiedenen Konzentrationen zu sehen. Die Benchmark für die Berechnung der Temperaturabsenkung auf Bitumenebene ist die dynamische Viskosität vom reinen PmB 25/55-65 bei 245 °C. Dieser Wert von 57,8 mPa\*s ist in jedem Diagramm zu finden. Die Temperatur 245 °C ist so ausgewählt, weil diese die übliche Einbautemperatur für Gussasphalt in Österreich ist. In Abbildung 40 ist zu sehen, dass die Viskosität des Bindemittels mit der Zunahme an Wachsgehalt absinkt. Das Grundbitumen, sowie das Bitumen mit 4 M% AW wurde an drei verschiedenen Proben wiederholt, um die Wiederholbarkeit der Prüfung, sowie des Mischprozesses mit dem Wachs zu überprüfen. Im Diagramm oben links in Abbildung 40 ist die Standardabweichung für diese zwei Varianten dargestellt. Die maximale Standardabweichung für das reine PmB ist 4 mPa\*s und für die Variante mit 4 M% AW 19 mPa\*s. Aufgrund der kleinen Streuung der Ergebnisse ist die Standardabweichung in diesem Maßstab schwierig zu sehen. Das alles spricht für eine sehr gute Wiederholbarkeit des Versuchs und des Mischprozesses Bitumen mit Wachs. In Tabelle 28 sind die Standardabweichungswerte zu sehen.

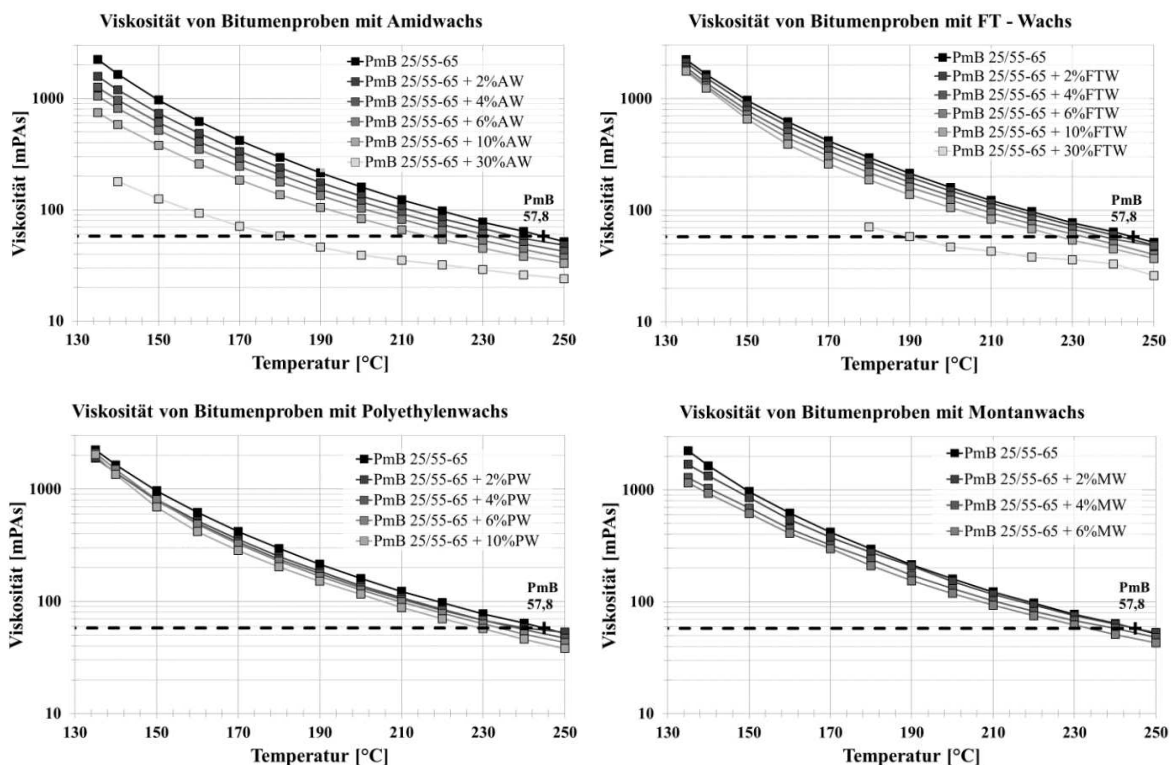


Abbildung 40: Dynamische Viskosität bei verschiedenen Temperaturen für das Grundbitumen (PmB) und für vier verschiedene Modifikationen mit Wachsen bei fünf verschiedenen Wachsgehalten

Tabelle 28: Standardabweichung RV

Prüftemperatur [°C]	PmB 25-55/65		PmB 25-55/65 + 4%AW	
	Mittelwert Viskosität [mPa*s]	Standardabweichung [mPa*s]	Mittelwert Viskosität [mPa*s]	Standardabweichung [mPa*s]
135	2241	2	1260	19
140	1641	2	962	11
150	966	1	608	4
160	621	0	407	1
170	419	2	284	1
180	295	3	205	2
190	215	2	152	3
200	160	3	117	3
210	123	3	92	4
220	97	2	73	3
230	77	2	60	3
240	64	3	49	4
250	52	4	42	3

Bei den Proben mit 30 M% Zusatz werden nur AW und FTW getestet, weil, wie am Anfang des Kapitels 5.6 erwähnt wurde, sich die Mischung von Bitumen und so einem hohen Anteil an PW und MW nicht homogenisieren lässt. In Abbildung 41 ist der fehlgeschlagene Versuch 30 M% PW mit dem PmB zu mischen.



Abbildung 41: 30 M% PW Mischung

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse von allen Tests im Zusammenhang dynamische Viskosität bei 245°C zu Additivgehalt bei allen verwendeten Zusätzen. Die Daten sind in logarithmischer Skalierung dargestellt. Damit der Zusammenhang der dynamischen Viskosität bei 245°C zu Additivgehalt klar dargestellt wird, wurde folgende logarithmische Funktion (5) verwendet:

$$\eta(wc) = a \cdot \ln(wc) + b \quad (5)$$

$\eta$  dynamische Viskosität [mPa\*s]

$wc$  Wachsgehalt [M%]

$a, b$  Koeffizienten der Regression

Der Koeffizient  $a$  beschreibt den Einfluss des Wachses auf die Änderung der dynamischen Viskosität. Der Koeffizient  $b$  zeigt die dynamische Viskosität bei 1 M% Wachsgehalt. Je kleiner der Absolutwert von  $b$  und höher der Absolutwert von  $a$  desto größer ist das Potenzial zur Absenkung der Viskosität des jeweiligen Wachses. Die höchste Viskositätsreduktion liegt bei AW, folgend von FTW, PW und MW. In Abbildung 42 ist zu sehen, dass AW einen klaren Vorteil gegenüber den anderen Zusätzen hat. Die Variante mit AW hat eine optimale Kombination der Koeffizienten  $a$  und  $b$ . FTW, PW und MW zeigen ähnliche Eigenschaften.

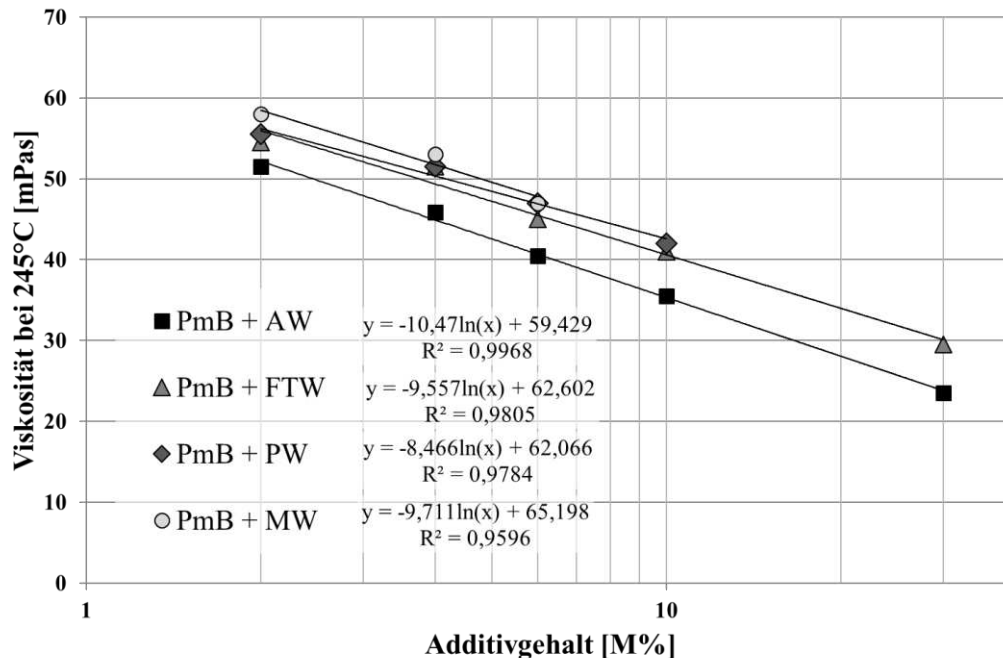


Abbildung 42: Dynamische Viskosität bei 245°C zu verschiedenen Additivgehalten für alle modifizierten Varianten

Um die mögliche Temperaturabsenkung auf Bitumenebene zu bestimmen, wurden Ergebnisse vom Referenzbitumen PmB 25/55-65 verwendet. Die äquiviskose Temperatur bei 57,8 mPa\*s (die Temperatur bei gleicher dynamischer Viskosität) wurde bei allen modifizierten Varianten des Referenzbitumens ermittelt. Aus diesem Grund, wurde angenommen, dass die dynamische Viskosität zwischen zwei Messtemperaturen einen linearen Trend hat. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 43 zu sehen. Zusätzlich wurde für jede modifizierte Variante die lineare Regression in folgender Formel (6) verwendet:

$$T_{eq}(wc) = c \cdot wc + d \quad (6)$$

$T_{eq}$  äquiviskose Temperatur [°C]

$wc$  Wachsgehalt [M%]

$c, d$  Koeffizienten der Regression

Der Koeffizient  $c$  beschreibt den Einfluss des Wachsgehalts auf die Temperaturabsenkung. Der Koeffizient  $d$  zeigt den Schnittpunkt bei 0 M% Wachsgehalt mit der y-Achse. In der Theorie soll der Koeffizient  $d$  245 °C für alle geprüften Proben sein, weil das die Temperatur bei 57,8 mPa\*s für das Grundbitumen ist. Die Werte von  $d$  schwanken von 240 °C bis 251 °C. Das kann damit erklärt werden, dass die Entwicklung der dynamischen Viskosität zwischen zwei Messtemperaturen als linear angenommen worden ist. Diese Entwicklung ist in der Realität nicht linear.

Ähnlich wie in Abbildung 42 wird das beste Potenzial zur Temperaturabsenkung bei den Proben mit AW ermittelt, gefolgt von FTW, PW und MW. Falls nur die Neigung  $c$  der Regressionen berücksichtigt wird,

dann sollte MW die besten Werte haben. Das wäre für höhere Wachsgehalte richtig. Da aber der Schnittpunkt *d* der höchste bei MW ist, schneidet MW schlechter bei Wachsgehalten unter 6 M% ab, und solche Wachsgehalte sind repräsentativ bei Wachsenanwendung im Feld. Aus wirtschaftlichen Gründen wird kein höherer Wachsgehalt als 4 M% in der Praxis verwendet.

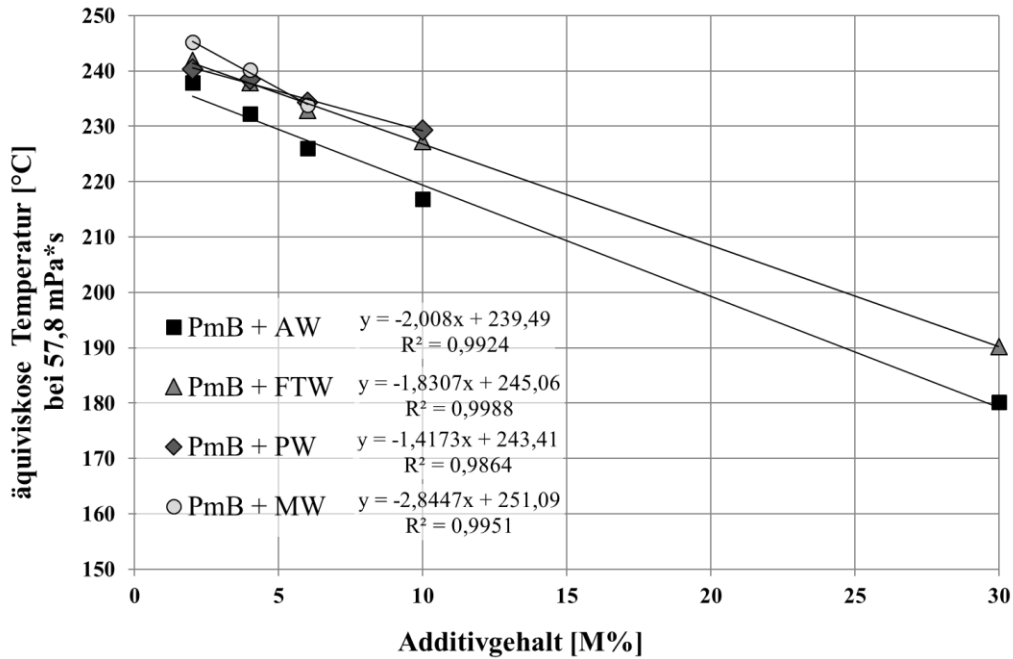


Abbildung 43: Äquivalente Temperatur bei 57,8 mPa\*s zu verschiedenen Additivgehalten für alle modifizierten Varianten

In Abbildung 44 ist die ermittelte mit dem RV Temperaturabsenkung für die verschiedenen Varianten dargestellt. Es wurden folgende Additivgehalte berücksichtigt: 2 M%, 4 M%, 6 M%, 10 M% und 30 M% bezogen auf die Bitumenmasse. Als Benchmark für diese Prüfung dient die Viskosität des Ausgangsbitumens bei 245°C. Die in Abbildung 44 dargestellte Temperaturabsenkung ergibt sich aus der äquivalenten Temperatur der Proben mit Wachs Zugabe. Als Schlussfolgerung der Prüfung mittels Rotationalviskosimeter kann man AW als das Additive mit dem höchsten Potenzial zur Temperaturabsenkung bezeichnen.

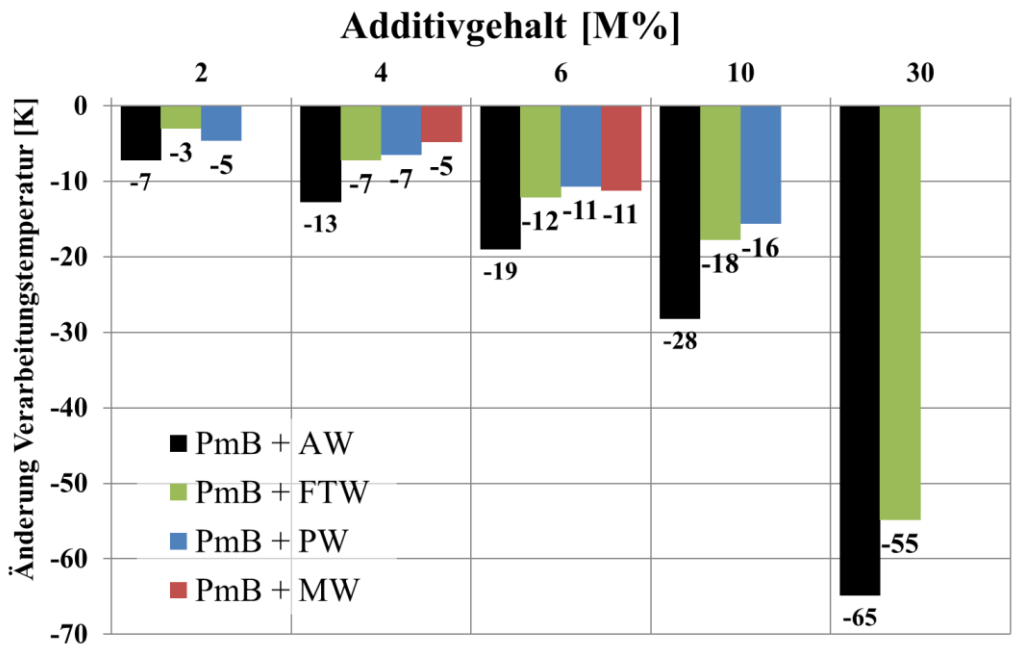


Abbildung 44: Ergebnisse Temperaturabsenkung Bitumenprüfungen: Rotationalviskosimeter

### 5.6.3.2 Gebrauchsverhalten

Um den Einfluss der verschiedenen Additive auf die Eigenschaften des Bitumens bei tiefen Temperaturen zu ermitteln, werden Versuche mit Bending Beam Rheometer (BBR) laut EN 14771 durchgeführt. In Abbildung 45 sind die Ergebnisse vom BBR aufgezeichnet. Als Ergebnis ist das Lower PG (Performance Grade) nach SUPERPAVE bei ungealtertem Bitumen dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass das Amidwachs wieder das bessere Additiv ist. Es ist erkennbar, dass je mehr Wachsadditiv beigemischt wird, umso schlechter die Performance im Tieftemperaturbereich ausfällt. Bei einer Wachszugabe von bis zu 4 M% verhalten sich alle Zusätze ähnlich. Ab 6 M% Zusatz verhält sich das Amidwachs deutlich besser als die anderen Zusätze.

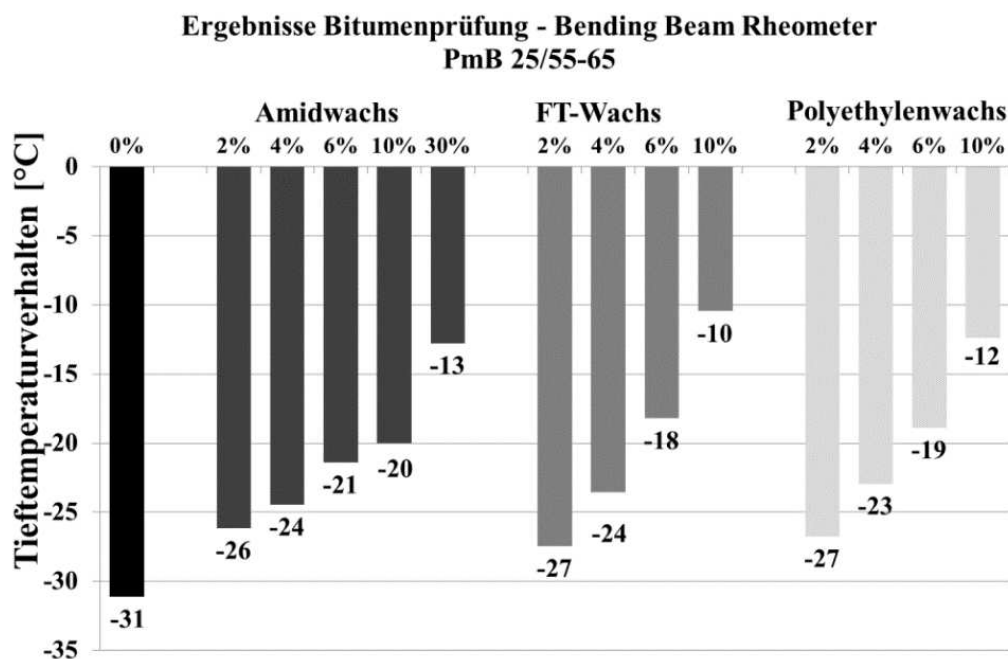


Abbildung 45: Ergebnisse Bitumenprüfungen: Bending Beam Rheometer

## 5.7 Optimierung auf Asphaltebene

### 5.7.1 MA 11

#### 5.7.1.1 Prüfprogramm

Tabelle 29 zeigt das Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen mit Gussasphalt MA 11. Das Referenzmischgut ist ein MA 11 Mischgut mit PmB 25/55-65. Zusätzlich wurden Mischgüter mit verschiedenen Additiven und Additivgehalte hergestellt:

- 4 M% AW
- 10 M% AW
- 4 M% FTW
- 4 M% PW

Die Variante mit 10 M% Wachszusatz wurde durchgeführt, um die Verarbeitbarkeit auf Bitumen- und Mischgutebene zu vergleichen. In der Praxis werden derart hohe Gehalte nicht angewendet, weil sie



unwirtschaftlich sind. Da das Montanwachs auf Bitumenebene schlechter als die anderen Wachse auf Bitumenebene abschneidet, wird es bei der Optimierung von MA 11 nicht berücksichtigt.

Diese vier modifizierten Varianten wurden mit 100% Kantkorn hergestellt. Eine Alternative zur Temperaturabsenkung ist die Substitution des Kantkorns mit Rundkorn. Es wurden Mischgüter entwickelt, bei denen nur ein Teil der Körnung mit Rundkorn war (0/4 oder 4/11) und Mischgüter, bei denen die ganze Sieblinie aus Rundkorn besteht. Es ist wichtig zu erwähnen, dass der Füllergehalt und die Sieblinie unverändert bleiben. Bei dem Referenzmischgut wurde eine dreifache Bestimmung zur Kontrolle gemacht. Mehr Information über die Wiederholbarkeit des Versuchs ist im Kapitel 4 zu finden.

Die Prüfprozedur für die Mischmoment-Messungen mit dem Gegenlaufzwangsmischer ist im Kapitel 4.3.1 beschrieben.

**Tabelle 29: Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen mit Gussasphalt MA 11**

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	3x			
4%AW	x			
10%AW	x			
4%FTW	x			
4%PW	x			
4%AW + 0,5%Z	x			
4%AW + 2,5%Z	x			
KKRK 0/4			x	
KKRK 4/11		x		
RK				x
RK 2,5%AW				x
RK 4%AW				x

In Tabelle 30 ist das Prüfprogramm für die TSRST-Versuchsreihe dargestellt. Bei allen Varianten außer RK 2,5%AW und RK 4%AW wurde eine dreifache Bestimmung durchgeführt. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit wurde bei diesen zwei Varianten eine zweifache Bestimmung gemacht. Das TSRST-Prüfprogramm beinhaltet alle Mischgüter, die kritisch für den unteren Temperaturbereich sind.

**Tabelle 30: Prüfprogramm für die TSRST-Versuche mit Gussasphalt MA 11**

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	3x			
4%AW	3x			
KKRK 4/11		3x		
KKRK 4/11 4%AW		3x		
RK				3x
RK 2,5%AW				2x
RK 4%AW				2x

In Tabelle 31 ist das Prüfprogramm für die UCCT-Versuchsreihe dargestellt. Bei allen Varianten außer RK 4%AW wurde eine dreifache Bestimmung geschafft. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit wurde bei dieser Variante eine zweifache Bestimmung gemacht.

Tabelle 31: Prüfprogramm für die UCCT – Versuche mit Gussasphalt MA 11

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	3x			
4%AW	3x			
KKRK 4/11		3x		
KKRK 4/11 4%AW		3x		
RK				3x
RK 2,5%AW				3x
RK 4%AW				2x

### 5.7.1.2 Ergebnisse

#### Temperaturabsenkung

Um die Temperaturabsenkung auf Mischgutebene von MA 11 zu untersuchen, wurden Mischmoment-Messungen laut Prüfprogramm in Tabelle 29 durchgeführt. Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen die Versuchsergebnisse der Mischmoment-Messungen. Die Datenpunkte in den Diagrammen zeigen die Mittelwerte der Mischmomente bei der jeweiligen Temperatur, wo mehr als 20 Mischmomentwerte gespeichert worden sind. Als Benchmark um das Temperaturabsenkungspotential von den modifizierten Varianten zu berechnen wurde das Mischmoment des Referenzmischguts (MA 11) bei 245°C festgelegt. Um den Zusammenhang zwischen Mischmoment und Temperatur zu beschreiben, wurde die folgende lineare Regression (7) verwendet:

$$M_{mix}(T) = g * T + h \quad (7)$$

$M_{mix}$	Drehmoment [Nm]
T	Temperatur [°C]
$g, h$	Koeffizienten der Regression

Der Koeffizient  $g$  gibt die Temperaturanfälligkeit des Mischguts im Zusammenhang mit dem Drehmoment an. Ein höherer Absolutwert von  $g$  bedeutet steilere Absenkung des Drehmoments mit zunehmender Temperatur. Der Koeffizient  $h$  gibt das theoretische Mischmoment bei 0°C. Ein niedriger Koeffizient  $h$  und höherer Absolutwert von  $g$  bedeuten einen großen Temperaturabsenkungspotential auf Mischgutebene.

Bei der Berechnung der Temperaturabsenkung sind Werte über 60 K nicht realistisch und sie wurden nur rechnerisch bestimmt. 60 K wird als die Obergrenze der Temperaturabsenkung festgelegt, weil es keine Daten außerhalb dieser Grenze gibt. Für alle Varianten mit Temperaturabsenkung >60 K kann zusammengefasst werden, dass sie Mischgüter mit einem großen Temperaturabsenkungspotential sind.

Abbildung 46 zeigt die Versuchsergebnisse der Mischgüter mit Wachsmodifikation. Hinsichtlich der Koeffizientenwerte von den Varianten mit 4 M% Wachsgehalt, AW und FTW zeigen ein besseres Temperaturabsenkungspotential als PW im Vergleich zur Referenz. AW hat eine Temperaturanfälligkeit von -0,23 Nm/K, FWT von -0,21 Nm/K und PW von -0,16 Nm/K. Das Mischgut mit 10 M% AW hat die niedrigsten Mischmomente unter den Varianten mit Wachs. Die Temperaturanfälligkeit von dieser Variante ist kleiner als 4 M% AW (-0,18 Nm/K und -0,23 Nm/K). Da aber der Schnittpunkt mit der y-Achse bei 0°C viel niedriger (58,9 Nm und 73,0 Nm) ist, schneidet das Mischgut mit mehr Wachsgehalt besser ab.

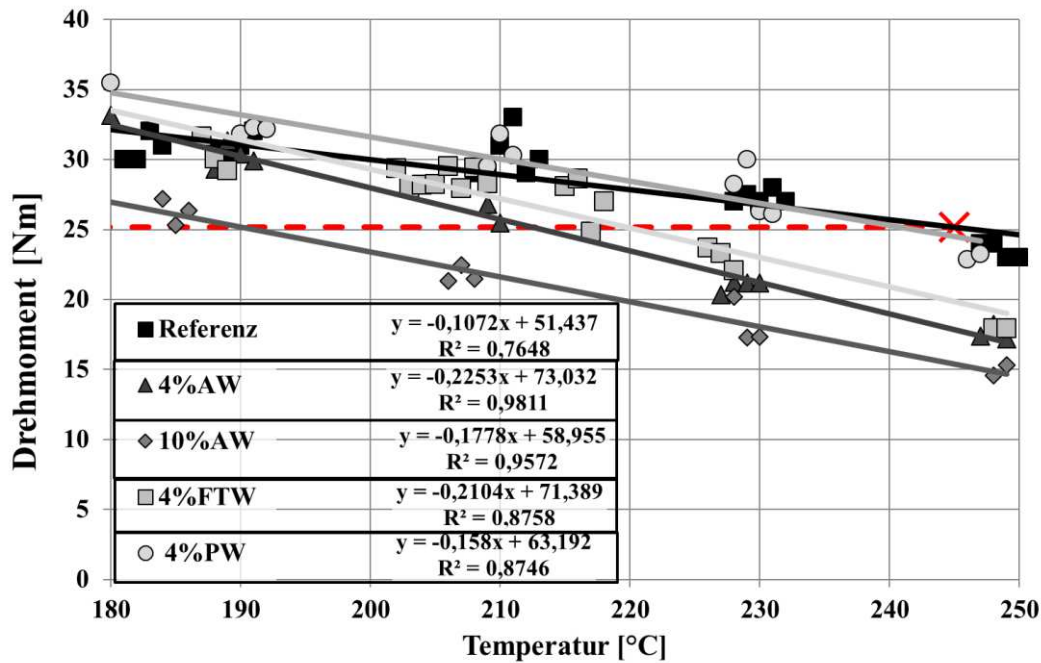


Abbildung 46: Mischmoment vs. Temperatur für die Referenz und die wachsmodifizierten MA 11 Mischgüter

In Abbildung 47 sind die Ergebnisse von den Mischmoment-Messungen der Varianten mit Zugabe von Zeolith. Der Zeolith wurde in Kombination mit AW verwendet. Es wurden zwei Mischgüter geprüft:

- MA 11 KK + 4%AW + 0,5%Z
- MA 11 KK + 4%AW + 2,5%Z

Die anderen zwei modifizierten Varianten im Diagramm dienen zum leichteren Vergleich der Ergebnisse. Es ist zu sehen, dass die Zugabe von 0,5 M%Z keinen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Mischgutes hat. Sowohl die Temperaturanfälligkeit von 4%AW und 4%AW+0,5%Z als auch ihre theoretischen Mischmomente bei 0 °C (-0,23 Nm/K und -0,21 Nm/K; 73,0 Nm und 71,4 Nm) unterscheiden sich kaum voneinander. Die Zugabe von mehr Zeolith (2,5 M%) verschlechtert sogar die Ergebnisse. Die Zugabe von 2,5 M%Z neutralisiert der Effekt der Wachszugabe und bringt die modifizierte Variante auf das Niveau der Referenz. Vom Hersteller des mineralischen Zusatzes Zeolith wurde die Auskunft bekommen, dass der Temperaturabsenkungseffekt von Zeolith im Labormaßstab schwierig festzustellen ist [98].

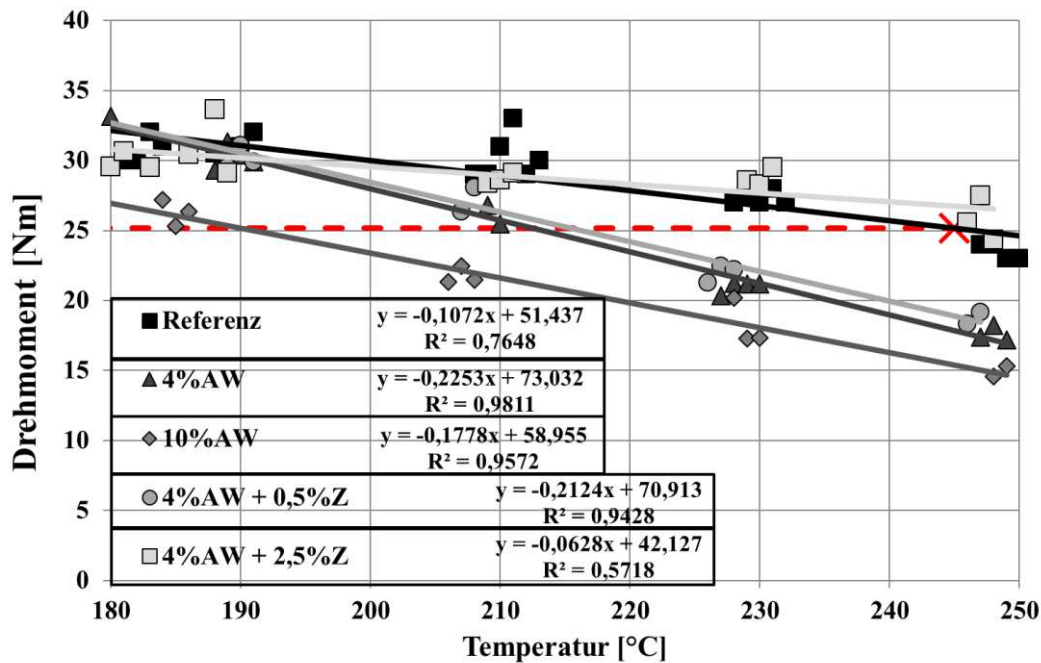


Abbildung 47: Mischmoment vs. Temperatur für die Referenz und die mit Zeolith modifizierten MA 11 Mischgüter

Abbildung 48 beinhaltet Ergebnisse, bei denen das Kantkorn durch Rundkorn ersetzt wurde. Es wurden drei Varianten ohne Wachs untersucht. Wenn beide Varianten, bei denen das Kantkorn nur teilweise mit Rundkorn substituiert wurde, verglichen werden, dann sieht man, dass KKRK 0/4 eine niedrigere Temperaturanfälligkeit als KKRK 4/11 (-0,20 Nm/K und -0,23 Nm/K) und einen niedrigeren Koeffizient  $h$  (67,2 Nm und 77,9 Nm) hat. Da beide Varianten sehr ähnliche Drehmomente bei 190°C haben ist die steilere Absenkung des Drehmoments entscheidend dafür, dass den Drehmoment-Verlauf von KKRK 4/11 günstiger unter KKRK 0/4 liegt. Die vollständige Substitution mit Rundkorn führt zu einer zusätzlichen Temperaturanfälligkeit (-0,23 Nm/K) und hat die niedrigsten Drehmomente der drei Varianten.

In Abbildung 48 werden zusätzlich Varianten präsentiert, bei denen beide Methoden Wachs und Rundkorn kombiniert wurden. Die Variante mit RK 2,5 M% AW liegt sehr nah an der reinen Modifizierung mit RK (-0,24 Nm/K und -0,23 Nm/K) und die Variante RK 4 M% AW hat das größte Temperaturabsenkungspotential.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Varianten mit Rundkorn und ohne Wachs ähnliche Eigenschaften im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit wie die Varianten KK mit Wachs haben. Die Varianten KKRK 4/11 und RK weisen eine Neigung der linearen Regression von -0,23 Nm/K und -0,23 Nm/K und Schnittpunkten mit der y-Achse bei 0°C von 72,9 Nm und 70,32 Nm auf. Wenn man die Rundkornvarianten mit den Wachsvarianten vergleicht sieht man, dass sie sehr ähnliche Verläufe haben (4 M%AW  $g$  (-0,23 Nm/K),  $h$  (73,0 Nm) und 4 M% FTW  $g$  (-0,21 Nm/K),  $h$  (71,39 Nm)). Die Rundkornmodifikationen schneiden trotzdem besser ab und haben ein besseres Temperaturabsenkungspotential.

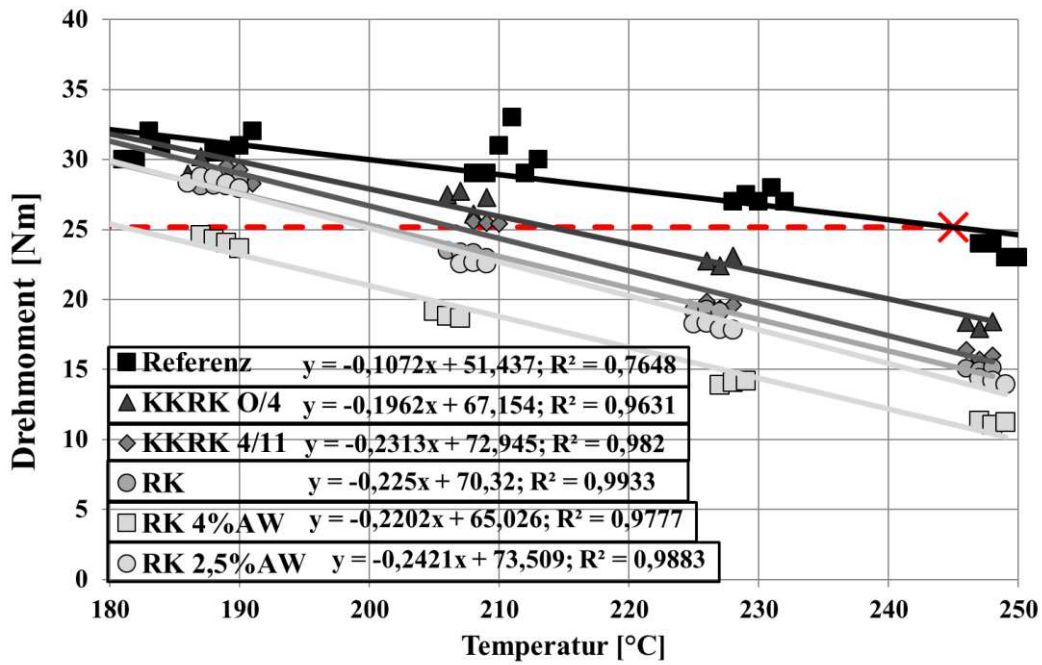


Abbildung 48: Mischmoment vs. Temperatur für die Referenz und die mit Rundkorn modifizierten Mischgüter

In Abbildung 49 sind die berechneten Änderungen der Verarbeitungstemperatur der Drehmomentmessung mit dem Labormischer dargestellt. Hierbei wurde als Benchmark die Viskosität (i.e. das notwendige Drehmoment) des unmodifizierten Gussasphalts bei 245°C und für alle anderen Mischungen die äquivalente Temperatur (also die Temperatur, bei der sich gleiches Drehmoment einstellt) ermittelt. Es wurden elf verschiedene Modifikationsvarianten des Gussasphalts geprüft.

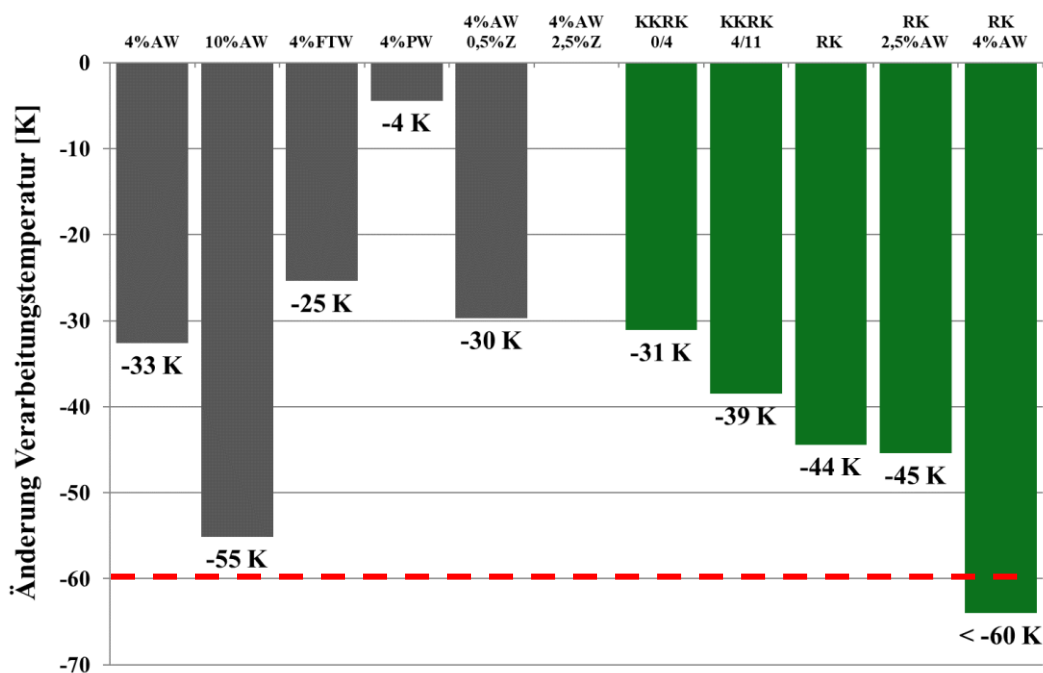


Abbildung 49: Ergebnisse Temperaturänderung MA 11 Mischgutuntersuchung – Labormischer

Durch die Modifizierung mit Amidwachs (AW, 33 K) wurden im Vergleich zu den Mischgütern mit FT-Wachs (FTW, 25 K) und Polyethylenwachs (PW, 4 K) eine größere Temperaturabsenkung erreicht

(Abbildung 49). Mit der 10%AW Variante wurde eine um 55 K niedrigere Einbautemperatur im Vergleich zu der Referenz ermittelt.

Zusätzlich zu dem Wachs wurde auch Zeolith als eine mögliche Methode zur Temperaturabsenkung geprüft. Es wurden zwei Mischgüter hergestellt (4%AW 0,5%Z und 4%AW 2,5%Z). Die erste Variante hat eine Einbautemperatur mit 3 K höher als die Variante ohne Zeolith. Der höhere Gehalt an Zeolith (2,5 M%) neutralisiert der Effekt vom Wachs und es wurde keine Absenkung der Einbautemperatur festgestellt.

Der neu entwickelte Ansatz, das Kantkorn vollständig oder teilweise durch Rundkorn zu ersetzen, hat positive Ergebnisse gezeigt. Die Verarbeitbarkeit wurde stark verbessert und die reine Substitution von Kantkorn durch Rundkorn ermöglichte eine Temperaturabsenkung von 31 K (bei Substitution der Fraktion 0/4) bzw. 39 K (bei Substitution der Fraktion 4/11) und 44 K bei Substitution der gesamten Gesteinsfraktion mit Ausnahme des Füllers. Damit zeigt sich, dass das Absenkpotehtial durch den Ersatz von Kantkorn durch Rundkorn gleich bzw. höher als bei der Wachsmodifikation ist. Wird lediglich die 0/4 Fraktion ersetzt, so ergibt sich eine Temperaturabsenkung, die mit 4 M% Amidwachs-Modifikation vergleichbar ist. Für den Austausch der 4/11 bzw. der gesamten 0/11 Fraktion ist das Absenkpotehtial um 6 K bis 11 K höher als bei Amidwachs-Modifikation. Eine Kombination von Amidwachs und Rundkorn hat fast den doppelten Effekt (>60 K). Da das Wachs ein teures Produkt ist, wäre es wirtschaftlicher den Wachsgehalt und somit die Materialkosten zu reduzieren. Aus diesem Grund wurde eine kostengünstigere Variante (RK 2,5 M% AW) geprüft. Die erreichte Temperaturabsenkung in diesem Fall ist 45 K.

Im Kapitel 5.6 und dem aktuellen Kapitel 5.7 wurde die Temperaturabsenkung auf Bitumen- und Mischgutebene mit Darstellungen der Zusammenhänge zwischen Wachszugabe und dynamischer Viskosität, sowie zwischen Temperatur und Viskosität/Mischmoment beschrieben. Hier soll nur im Überblick und vergleichend auf die Ergebnisse, die auf Bitumen- bzw. Mischgutebene, gewonnen wurden, eingegangen werden. Abbildung 50 zeigt einen Vergleich der möglichen Änderungen der Verarbeitungstemperatur von verschiedenen Bindemitteln bzw. Mischgütern im Vergleich zum Referenzbindemittel PmB 25/55-65 ohne Zusätze bzw. zum Referenzmischgut MA 11. In Bezug auf wachsmodifizierte Produkte wird deutlich, dass die Temperaturabsenkung auf Bitumenebene in jedem Fall klar von der ermittelten Absenkung auf Mischgutebene abweicht. Bei AW und FTW unterschätzt eine Analyse auf Bitumenebene die tatsächlich mögliche Absenkung auf Mischgutebene. Der Unterschied zwischen den beiden Betrachtungsebenen liegt zwischen 20 K und 18 K. Für PW zeigt die Bitumenebene unwesentlich höheres Absenkpotehtial als die Mischgutebene. Der Unterschied beträgt hier 1 K. Die Reihung der einzelnen Produkte stimmt jedoch für beide Betrachtungsebenen überein: PW mit dem geringsten Potential, gefolgt von FTW und AW.

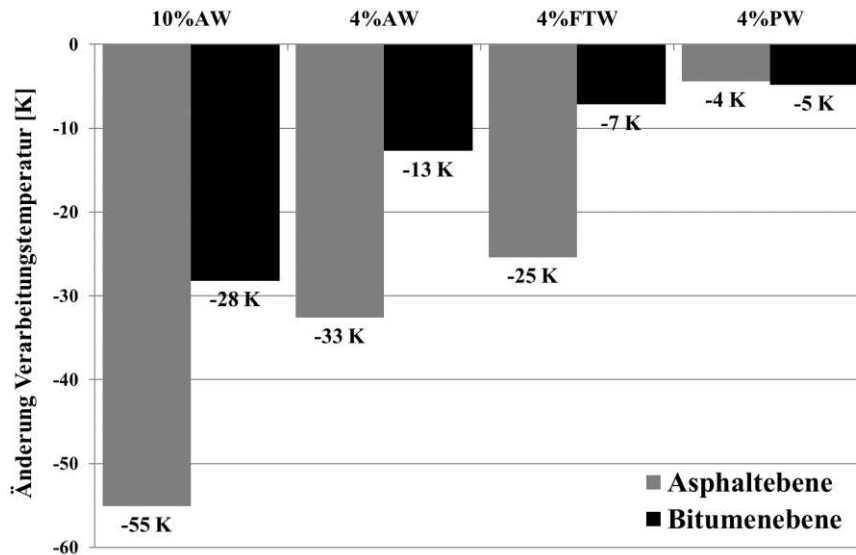


Abbildung 50: Vergleich der Temperaturänderung auf Bitumen- und Mischgutebene

### Gebrauchverhalten

Kritisch im Bereich von Gussasphalt ist die Beständigkeit gegen Risse bei tiefen Temperaturen durch Klima- und Verkehrsbeanspruchung, sowie ausreichende Verformungsstabilität bei hohen Temperaturen (Widerstand gegen Spurrinnenbildung). Dafür werden zunächst wiederum für ein unmodifiziertes Mischgut (Referenz) Abkühlprüfungen (TSRST) durchgeführt, um Referenzwerte für thermische erzeugte (kryogene) Spannungen zu erhalten. Zudem werden zyklische, einaxiale Druckversuche (UCCT) bei hohen Temperaturen (50°C) durchgeführt, um den Widerstand gegen bleibende Verformungen zu ermitteln. Im Anschluss werden diese Kennwerte auch für die modifizierten Mischgüter ermittelt. Ziel ist es, das Gebrauchverhalten auf gleichem Niveau wie bei konventionellem Gussasphalt zu halten bzw. es zu verbessern.

Abbildung 51 beinhaltet die Ergebnisse der Abkühlprüfung. Dabei wird die Bruchtemperatur  $T_{\text{Ausfall}}$  dargestellt, bei der ein Probekörper reißt, weil die thermisch induzierten (kryogenen) Spannungen die Zugfestigkeit überschreiten. Im Diagramm sind jeweils Mittelwerte aus drei bzw. zwei Einzelversuchen mit der zugehörigen Standardabweichung ersichtlich.

Festzustellen ist, dass die Bruchtemperatur bei allen Mischgütern zwischen -33°C und -36°C liegt. Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mischgütern zu beobachten. Damit zeigen alle Varianten eine hohe Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse. Die ermittelten Bruchtemperaturen sind im Vergleich zu anderen Asphalttypen deutlich günstiger. Um einen Überblick zu bekommen, ob diese Ergebnisse befriedigend sind, ist zu erwähnen, dass die höchste Anforderung für die Bruchtemperatur einer Deckschicht laut ÖNORM B3580-2 bei -30°C liegt. Die hohe Rissbeständigkeit ist zwei Umständen geschuldet: Einerseits weisen Gussasphalte einen hohen Anteil an Bindemittel auf, das für den Spannungsabbau bei Abkühlung verantwortlich ist. Zudem ist durch den geringen Hohlraumgehalt eine große effektive Querschnittsfläche verfügbar, wodurch die Zugfestigkeit ansteigt.

Unter Berücksichtigung der Streuung der Ergebnisse zeigt sich kein signifikanter Einfluss bei der Wachsmodifikation auf das Tieftemperaturverhalten, obgleich bekannt ist, dass durch das Auskristallisieren des Wachsanteils eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit auftritt [22]. Zumindest bei der hier untersuchten Variante mit 4 M% Amidwachs-Modifikation lässt sich keine negative Auswirkung auf die Rissbeständigkeit feststellen. Als Schlussfolgerung kann man zusammenfassen, dass sowohl das Referenzmischgut als auch die modifizierten Mischgüter eine sehr hohe Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse aufweisen.

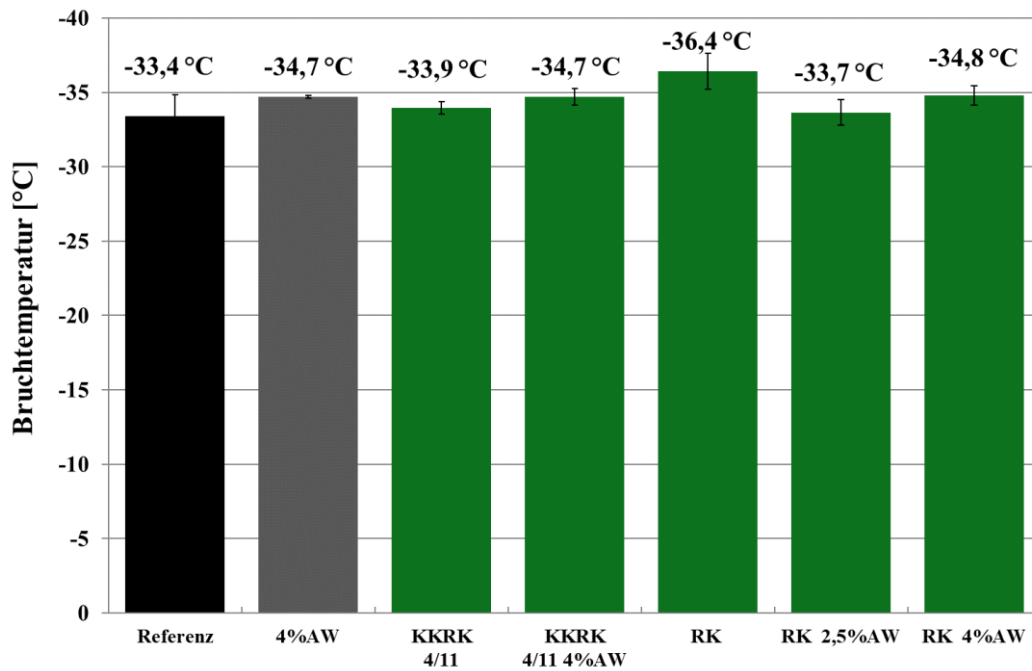


Abbildung 51: Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen (TSRST)

In Abbildung 52 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT) dargestellt. In den Diagrammen sind die Ergebnisse der bleibenden, axialen Verformung nach 3.600 Lastwechseln in % aufgetragen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Ersetzen des Kantkorns mit dem Rundkorn zu einer Erhöhung der Verformung von 3 Prozentpunkten führt. Mit der Zugabe von 4 M% Amidwachs ist eine signifikante Reduktion der Verformung von etwa 50% zu beobachten. Es wurde zusätzlich die Variante RK 2,5 %AW geprüft und sie liegt auf dem Niveau der Referenz.

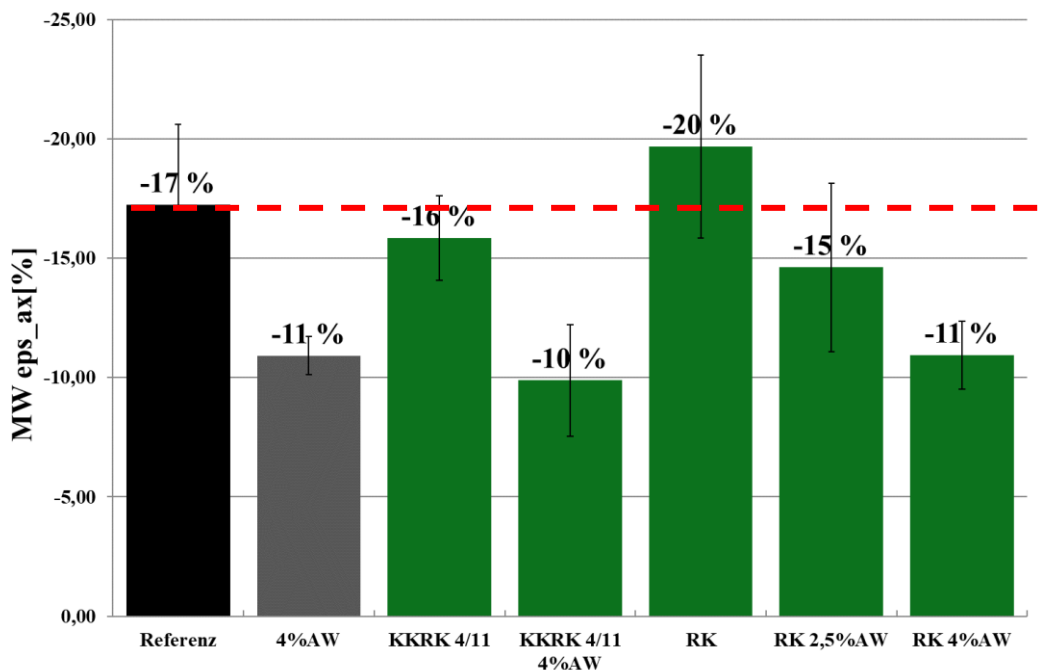


Abbildung 52: Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT)



## 5.7.2 MA 8

### 5.7.2.1 Prüfprogramm

Tabelle 32 zeigt das Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen mit Gussasphalt MA 8. Das Referenzmischgut ist ein nicht modifiziertes MA 8 Mischgut. Zusätzlich wurden Mischgüter mit verschiedenen Additiven und Additivgehalte hergestellt:

- 2 M% AW
- 3 M% AW
- 4 M% AW
- 4 M% MW

Das Montanwachs wurde in das Prüfprogramm aufgenommen, da es in der Praxis häufig Anwendung findet.

Eine Alternative zur Temperaturabsenkung ist die Substitution des Kantkorns mit Rundkorn. Es wurden Mischgüter entwickelt, bei denen nur ein Teil der Körnung mit Rundkorn war (2/8) und Mischgüter, bei denen die ganze Sieblinie aus Rundkorn besteht. In Kapitel 5.7.1 werden zwei KKRK Varianten untersucht. Da bei MA 11 die KKRK Variante mit Substitution der größeren Kantkörnung besser ausschneidet, wird bei der Optimierung von MA 8 nur die Variante KKRK 2/8 (Kantkörnung 2/8 wird durch Rundkörnung 2/8 ausgetauscht) berücksichtigt.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass der Füllergehalt und die Sieblinie unverändert bleiben. Bei dem Referenzmischgut wurde eine zweifache Bestimmung und bei der RK eine dreifache Bestimmung durchgeführt. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit wurde bei allen anderen Varianten eine einfache Bestimmung gemacht.

**Tabelle 32: Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen mit Gussasphalt MA 8**

	0/8	0/2	2/8	---
KK	0/8	0/2	2/8	---
RK	---	2/8	0/2	0/8
Referenz	2x			
(-) Füller	x			
3%AW	x			
KKRK		x		
KKRK 2%AW		x		
RK				3x
RK 2%AW				x
RK 3%AW				x
RK 4%AW				x
RK 4%MW				x

In Tabelle 33 ist das Prüfprogramm für die TSRST-Versuchsreihe dargestellt. Bei allen Varianten außer RK 3%AW wurde eine dreifache bzw. vierfache Bestimmung durchgeführt. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit wurde für die Variante RK 3%AW eine zweifache Bestimmung gemacht. Das TSRST-Prüfprogramm beinhaltet alle Mischgüter, die für den unteren Temperaturbereich kritisch sind.

Tabelle 33: Prüfprogramm für die TSRST - Versuche mit Gussasphalt MA 8

KK	0/8	0/2	2/8	---
RK	---	2/8	0/2	0/8
Referenz	4x			
3%AW	3x			
KKRK		3x		
RK				4x
RK 3%AW				2x
RK 4%AW				3x
RK 4%MW				3x

In Tabelle 34 ist das Prüfprogramm für die UCCT-Versuchsreihe. Bei allen Varianten außer der Referenz wurde eine dreifache Bestimmung durchgeführt. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit wurde eine zweifache Bestimmung bei der Referenz gemacht. Im Kapitel 5.7.1 hat sich herausgestellt dass die Beständigkeit gegen Verformung kritischer für den Gussasphalt ist. Deswegen ist das Prüfprogramm für UCCT umfangreicher als für TSRST.

Tabelle 34: Prüfprogramm für die UCCT-Versuche mit Gussasphalt MA 8

KK	0/8	0/2	2/8	---
RK	---	2/8	0/2	0/8
Referenz	2x			
2%AW	3x			
3%AW	3x			
KKRK		3x		
KKRK 2%AW		3x		
RK				3x
RK 2%AW				3x
RK 3%AW				3x
RK 4%AW				3x
RK 4%MW				3x

### 5.7.2.2 Ergebnisse

#### Temperaturabsenkung

Um die Temperaturabsenkung auf Mischgutebene von MA 8 zu untersuchen, wurden Mischmoment-Messungen laut Prüfprogramm in Tabelle 32 durchgeführt. In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die Versuchsergebnisse der MA 8 Mischgüter dargestellt. Um den Zusammenhang zwischen Mischmoment und Temperatur zu beschreiben, wurde die lineare Regression vom Kapitel 5.7.1.2 verwendet.

Im Diagramm in Abbildung 53 sind die Drehmomentverläufe eines Mischguts mit der Variation des Füllergehalts und eines mit Wachszugabe. Die Variante (-)Füller hat der niedrigste Absolutwert von  $g$  (-0,03 Nm/K) und der niedrigste Absolutwert von  $h$  (27,5 Nm). Diese Variante hat eine sehr ähnliche Neigung der linearen Regression wie die Referenz. Da aber das theoretische Mischmoment bei 0°C kleiner ist, liegt diese Variante günstiger, und zwar parallel unter der Referenz. Die Variante mit Wachs hat die höchste Temperaturanfälligkeit (-0,15 Nm/K) und den höchsten Schnittpunkt mit der y-Achse bei 0°C (50,5 Nm). Der Koeffizient  $h$  ist entscheidend in diesem Fall und führt zu einem höheren Temperaturabsenkungspotential bei der Variante mit weniger Füller. Im Diagramm ist zu sehen, dass der Bestimmtheitsmaß der Referenz ziemlich niedrig ist. Grund dafür ist die Empfindlichkeit des Bestimmtheitsmaßes gegenüber der linearen Regression.

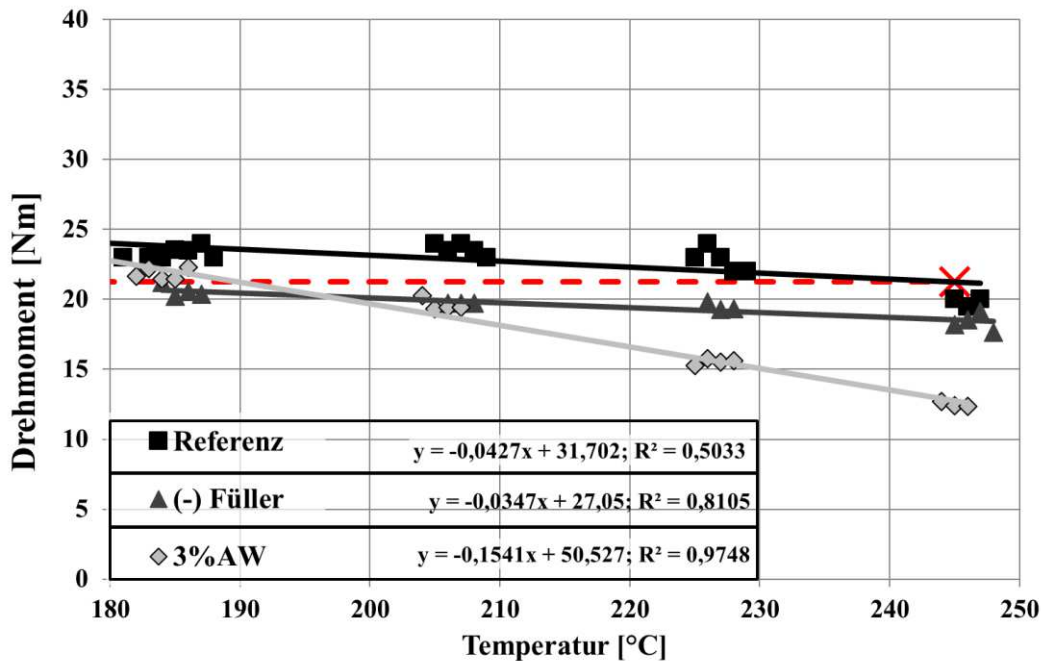


Abbildung 53: Mischmoment vs. Temperatur für die Referenz und die KK-Mischgüter

Im Diagramm in Abbildung 54 sind die Drehmomentverläufe der Mischgüter mit RK. Wenn das Mischgut mit der Substitution der 2/8 Kantkörnung durch 2/8 Rundkörnung betrachtet wird, dann kann festgestellt werden, dass die Absolutwerte der Koeffizienten  $g$  und  $h$  (-0,16 Nm/K und 55,6 Nm) höher als diese der Referenz (-0,04 Nm/K und 31,7 Nm) und die Drehmomente der modifizierten Variante bei einer Temperatur über 200 °C niedriger sind. In demselben Diagramm sind noch die Drehmomentverläufe der Mischgüter mit der vollständigen Substitution der Kantkörnung durch Rundkörnung. Die Reihenfolge nach Temperaturabsenkungspotential stimmt mit dem Modifizierungsgrad (mit dem Anstieg der RK- und Wachszugabe erhöht sich der Modifizierungsgrad) überein. Die niedrigste Temperaturabsenkung liefert die reine Substitution mit RK, gefolgt von RK + 2%AW, RK + 3%AW und RK + 4%AW. Die Variante KKRK wurde zusätzlich mit Wachs modifiziert (KKRK 2%AW) und liegt auf dem Niveau von RK + 2%W.

Im Allgemeinen liegen alle RK Varianten mit Wachs nah aneinander mit einem klaren Abstand zur reinen Modifikation mit RK. Die RK Variante ohne Wachs hat die höchste Temperaturanfälligkeit und sie sinkt antiproportional mit der Wachszugabe ab, wenn man die anderen Varianten betrachtet. Sowohl der Koeffizient  $g$  als auch  $h$  sinkt mit dem Modifizierungsgrad ab. Je höher aber der Modifizierungsgrad desto geringer der Unterschied zwischen den Varianten. Das heißt, dass die Optimierungsgrenze langsam erreicht wird. Bei den wachsmodifizierten KK Varianten von MA 11 wurde festgestellt, dass das Wachs ein Temperaturabsenkungspotential weit über 4 M% hat. Es wird also nicht das Potential des Wachses erschöpft, sondern des Mischguts. Ein Drehmoment unter 10 Nm scheint das Minimum für den vorliegenden Gussasphalt zu sein.

Im Prüfprogramm ist weiter eine Variante mit MW hinzugefügt. Wenn man die Varianten RK + 4%AW und RK + 4%MW vergleicht dann kann festgestellt werden, dass es kaum Unterschiede zwischen  $g$  (-0,13 Nm/K und -0,12 Nm/K) und  $h$  (40,1 Nm und 39,2 Nm) gibt.

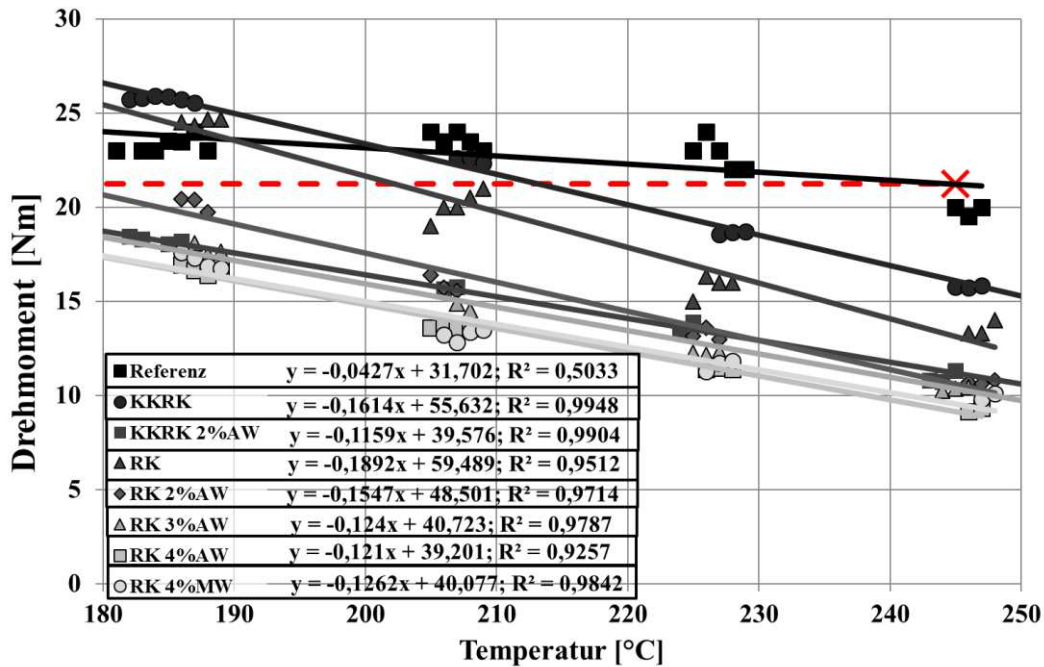


Abbildung 54: Mischmoment vs. Temperatur für die Referenz und die RK-Mischgüter

In Abbildung 55 sind die berechneten Änderungen der Verarbeitungstemperatur von der Drehmomentmessung mit dem Labormischer dargestellt. Als Benchmark wurde hier die Viskosität (i.e. das notwendige Drehmoment) des unmodifizierten Gussasphalts bei 245 °C ermittelt und für alle anderen Mischungen die äquivalente Temperatur (also die Temperatur, bei der sich gleiches Drehmoment einstellt) ermittelt.

Die Drehmomentergebnisse der Variante (-)Füller zeigen, dass dieses Mischgut bei einer viel niedrigeren Temperatur (Temperaturabsenkung > 60 K) als die Referenz eingebaut werden kann. Weniger Füller bedeutet weniger Mastix, was tatsächlich die Verarbeitbarkeit eines Gussasphaltes stark verändern kann. Der Effekt von Füllergehalt wird näher im Kapitel 5.7.4 untersucht. In Abbildung 55 ist weiter zu sehen, dass die Wachsmodifizierung der Referenz eine Temperaturabsenkung von 55 K bringt. Die reine Substitution von Kantkorn durch Rundkorn ermöglicht eine Temperaturabsenkung von 32 K (bei Substitution der Fraktion 2/8) bzw. 43 K bei Substitution der gesamten Gesteinsfraktion mit Ausnahme des Füllers. Die Kombination von Amidwachs und Rundkorn hat einen wesentlich höheren Effekt. Es ist eine Temperaturabsenkung von > 60 K erreichbar. Es wurden RK Varianten mit 2, 3 und 4 %AW geprüft. Je mehr Wachs dazugegeben wird desto höher ist die Temperaturabsenkung und desto kleiner die Unterschiede zwischen den Varianten. Zwischen den Wachsarten Amidwachs und Montanwachs konnte kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden.

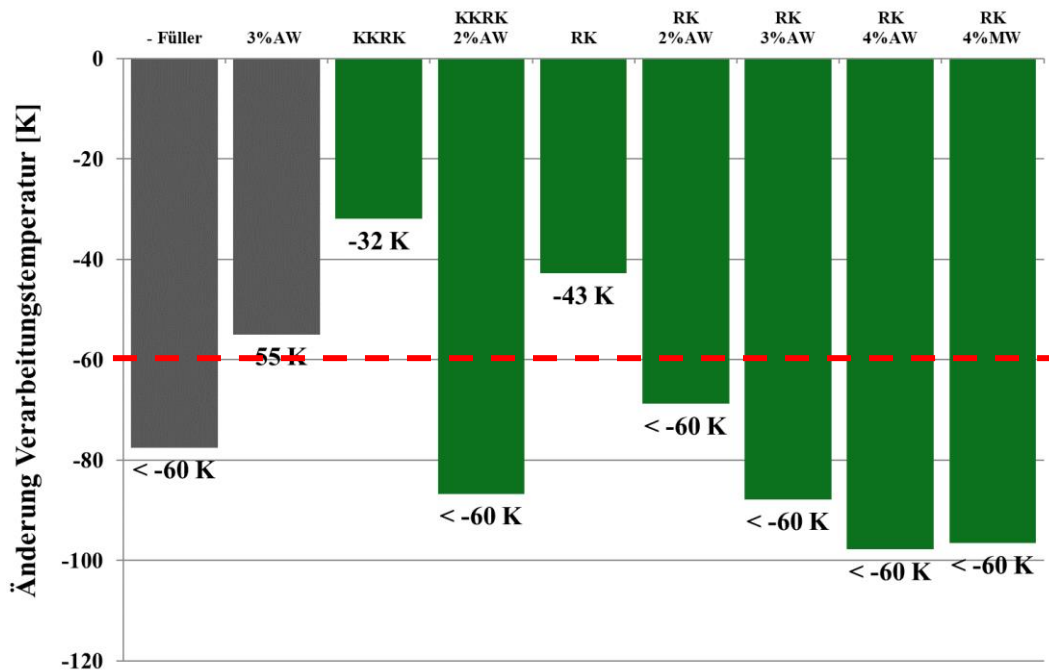


Abbildung 55: Ergebnisse Temperaturänderung MA 8 Mischgutuntersuchung – Labormischer

#### Gebrauchsverhalten

Für die Optimierung des Gebrauchsverhaltens wurden zwei Zusätze und eine Methode berücksichtigt: Amidwachs, Montanwachs und der Ersatz des Kantkorns durch Rundkorn. Mit diesen Zusätzen/Methoden wurde in diesem Arbeitspaket das Gebrauchsverhalten von MA 8 Mischgütern geprüft und gegebenenfalls optimiert. Ziel ist hier wieder, das Gebrauchsverhalten auf gleichem Niveau wie bei konventionellem Gussasphalt zu halten bzw. es zu verbessern.

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse (Bruchtemperaturen) der Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen dargestellt. Die Zusätze/Methoden wurden mit dem Referenzmischgut so kombiniert, dass sechs Varianten berücksichtigt wurden. Die Bruchtemperatur liegt bei allen Mischgütern zwischen  $-25^{\circ}\text{C}$  und  $-28^{\circ}\text{C}$ . Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mischgütern zu beobachten. Um einen Überblick zu bekommen, ob diese Ergebnisse befriedigend sind, ist zu erwähnen, dass die Anforderungen für die Bruchtemperatur einer Deckschicht laut ÖNORM B3580-2 bei  $-30^{\circ}\text{C}$  und  $-25^{\circ}\text{C}$  liegen. Alle geprüften Mischgüter erfüllen die Anforderung  $\text{TSRST}_{\text{max-25,0}}$  und das beim Einsatz von einem harten Oxidationsbitumen (90/10) und Wachs. Als Schlussfolgerung kann man zusammenfassen, dass sowohl das Referenzmischgut als auch die modifizierten Mischgüter eine gute Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse aufweisen.

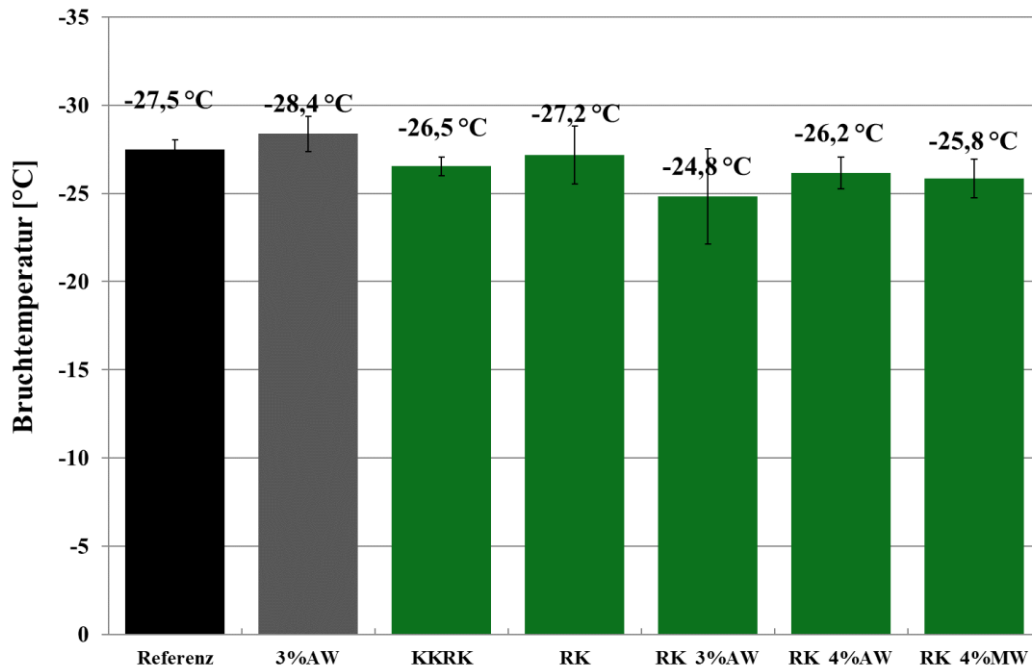


Abbildung 56: MA 8 Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen (TSRST)

In Abbildung 57 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT) dargestellt. Es sind die bleibenden, axialen Verformungen nach 3.600 Lastwechsel in % aufgetragen. Das Referenzmischgut weist eine Verformung von -9% auf und dieser Wert wird als Benchmark aufgenommen. Mit der Zugabe von Amidwachs zum Referenzmischgut wird die Verformung reduziert. Dabei steigt die Beständigkeit gegen Verformung proportional zum Wachsgehalt. Bei der Substitution der Fraktion 2/8 mit Rundkorn bleibt die Verformung auf demselben Niveau wie beim Referenzmischgut.

Die vollständige Substitution mit Rundkorn liegt über dem Benchmark. Das Wachs hat das Potenzial die Beständigkeit gegen Verformung bei +50°C zu verbessern. Die Variante RK 3%AW erreicht dieselbe Verformung wie die Referenz. Empfehlenswert ist eine Zugabe von 3% Wachs. 4% Wachszugabe ist als Extremfall zu betrachten, der unter wirtschaftlichen Maßstäben großtechnischen kaum zur Anwendung kommt. In Abbildung 57 ist zu sehen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Wachsorten (Amidwachs und Montanwachs) gibt.

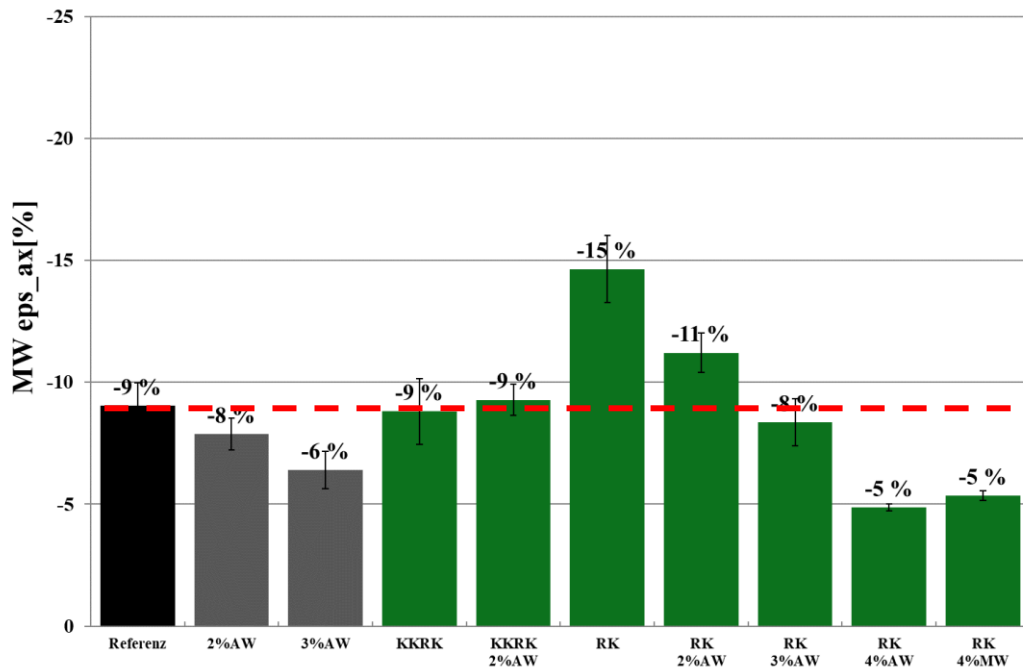


Abbildung 57: Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT)

### 5.7.3 MA 4 Garagenmischgut

#### 5.7.3.1 Prüfprogramm

Analog zum Kapitel 5.7.1 wird für das MA 4 Garagenmischgut zuerst die Verarbeitbarkeit und anschließend die Beständigkeit bei hohen und tiefen Temperaturen präsentiert. Die Zusätze bzw. Methoden, die eingesetzt wurden, sind AW, und der Ersatz des Kantkorns durch Rundkorn. In der Optimierung des MA 8 hat das Montanwachs ähnlichen Effekt wie das Amidwachs auf die Eigenschaften des Mischguts gezeigt. Da im Kapitel 5.6 das Amidwachs das bessere Produkt auf Bitumenebene war, wurde im Prüfprogramm der MA 4 Mischgüter auf das Montanwachs verzichtet. Die ausgewählten Modifikationsvarianten für das Garagenmischgut sind folgende:

- Referenz
- 3%AW
- KKRK
- RK
- RK 3%AW

In Tabelle 35 ist das Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen dargestellt. Bei allen Varianten wurde eine einfache Bestimmung gemacht. Bei allen drei Versuchsarten wurden die gleichen Mischgutvarianten geprüft. Das sind die Varianten, die für das MA 8 Mischgut die besseren Ergebnisse geliefert haben.

**Tabelle 35: Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen mit Gussasphalt MA 4 Garage**

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	x			
3%AW	x			
KKRK		x		
RK				x
RK 3%AW				x

In Tabelle 36 ist das Prüfprogramm für die TSRST-Versuchsreihe dargestellt. Bei allen Varianten wurde eine dreifache Bestimmung gemacht.

**Tabelle 36: Prüfprogramm für die TSRST-Versuche mit Gussasphalt MA 4 Garage**

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	3x			
3%AW	3x			
KKRK		3x		
RK				3x
RK 3%AW				3x

In Tabelle 37 ist das Prüfprogramm für die UCCT-Versuchsreihe dargestellt. Bei allen Varianten wurde eine dreifache Bestimmung gemacht.

**Tabelle 37: Prüfprogramm für die UCCT-Versuche mit Gussasphalt MA 4 Garage**

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	3x			
3%AW	3x			
KKRK		3x		
RK				3x
RK 3%AW				3x

### 5.7.3.2 Ergebnisse

#### Temperaturabsenkung

In Abbildung 58 sind die Ergebnisse der Verarbeitbarkeit der MA 4 (Garagenmischgut) dargestellt. Um den Zusammenhang zwischen Mischmoment und Temperatur zu beschreiben, wurde die lineare Regression vom Kapitel 5.7.1.2 verwendet.

Die Variante RK 3%AW hat die höchste Temperaturanfälligkeit (-0,17 Nm/K) und den höchsten Koeffizient  $h$  (52,3 Nm). RK 3%AW ist auch die Variante mit den niedrigsten Drehmomenten. Die anderen drei modifizierten Varianten liegen sehr nah aneinander. KK 3%AW hat die bessere Temperaturanfälligkeit (-0,12 Nm/K) und die niedrigeren Drehmomente von den drei. Die Varianten ohne Wachs liegen fast parallel zueinander (-0,12 Nm/K und -0,12 Nm/K). Entscheidend bei diesen Varianten sind die Koeffizienten  $h$ . RK hat



ein theoretisches Mischmoment bei 0°C von 41,1 Nm, KKRK von 42,8 Nm und deswegen ist das RK Mischgut das Mischgut mit dem besseren Temperaturabsenkungspotential.

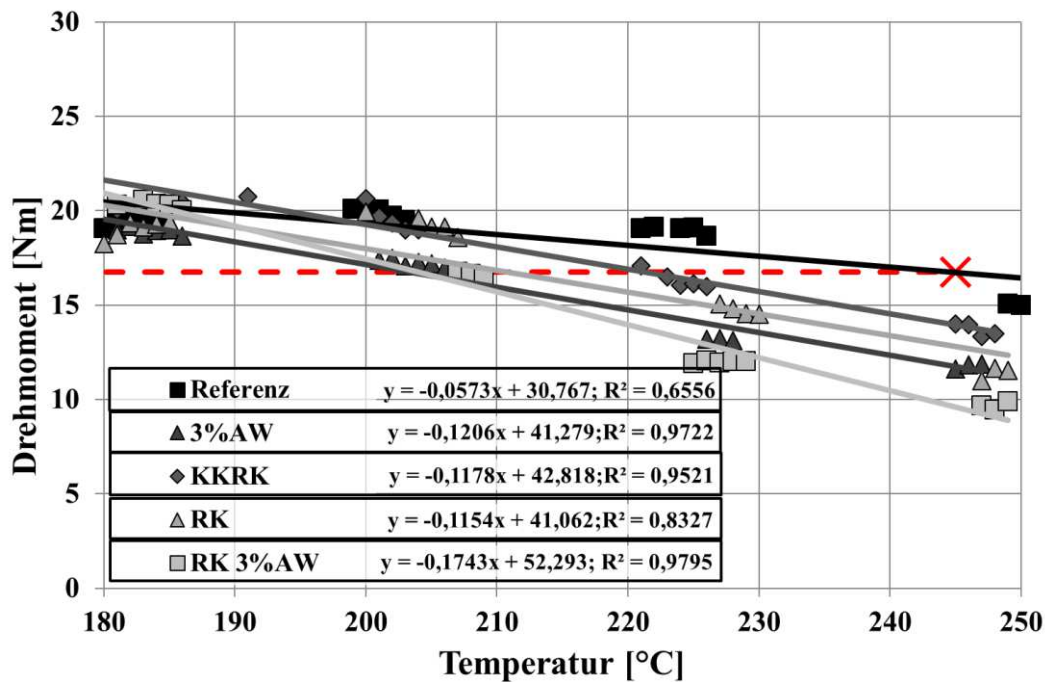


Abbildung 58: Mischmoment vs. Temperatur für alle Varianten

In Abbildung 59 sind die berechneten Änderungen der Verarbeitungstemperatur von der Drehmomentmessung mit dem Labormischer dargestellt. Als Benchmark wurde hier die Viskosität (i.e. das notwendige Drehmoment) des unmodifizierten Gussasphalts bei 245°C ermittelt und für alle anderen Mischungen die äquivalente Temperatur (also die Temperatur, bei der sich gleiches Drehmoment einstellt) ermittelt.

Wie bei den anderen Gussasphalten (MA 11 und MA 8) haben auch hier die Varianten ohne Wachs die kleinste Temperaturabsenkung. Für die Variante KKRK wurde eine Temperaturabsenkung von 24 K und für RK von 34 K berechnet. Dass die runde Kornform die Verarbeitbarkeit positiv beeinflusst, wird hier aber durch die Wachsmodifizierten Varianten nicht bewiesen. KK 3%AW hat eine Temperaturabsenkung von 42 K und RK 3%AW von 41 K.

In Abbildung 58 ist zu sehen, dass beide Regressionslinien einen Schnittpunkt bei 16,5 Nm haben, die Regression von KK 3%AW niedrigere Drehmomente bei 180 °C hat und die Regression von RK 3%AW steiler ist. Beide Varianten liegen am Versuchende auch nah bei der 10 Nm Grenze. Der vorliegende MA 4 Gussasphalt besteht aus 35% Mastix (Biumen + Füller) und 65% feine Körnung (Korngruppe 0/4). Je kleiner die Gesteinskörnung desto weniger spielt ihre Form eine Rolle. Aus diesem Grund wird allein mit Wachszugabe eine gleiche Temperaturabsenkung wie bei RK 3%AW erreicht.

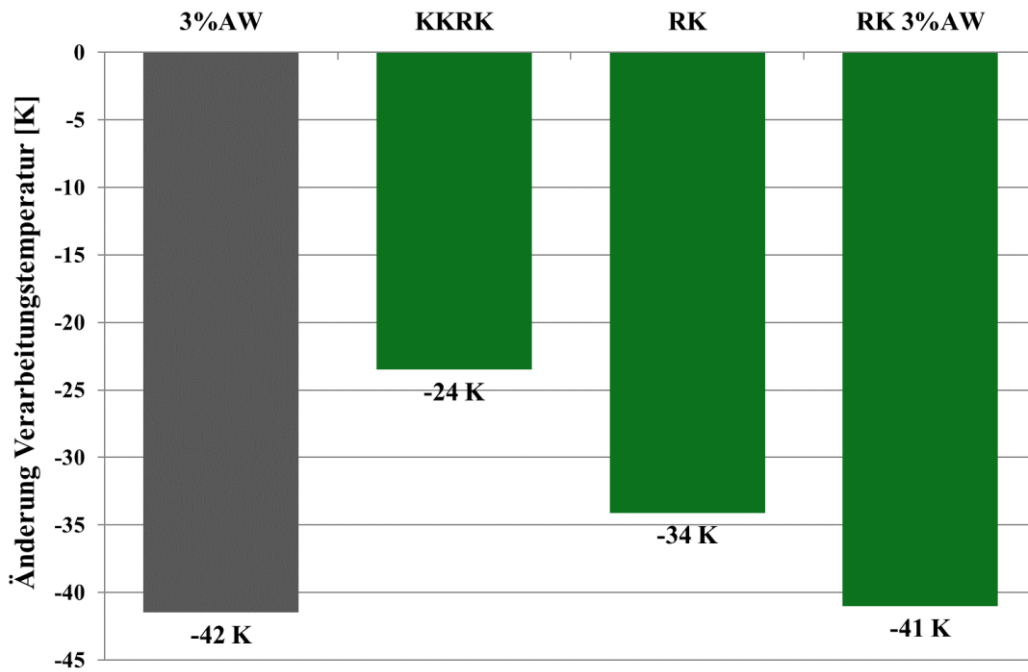


Abbildung 59: Ergebnisse Temperaturänderung MA 4 Garagenmischgut Mischgutuntersuchung – Labormischer

#### Gebrauchsverhalten

In Abbildung 60 sind die MA 4 (Garagenmischgut) Ergebnisse der Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen dargestellt. Die Bruchtemperaturen liegen bei den Mischgütern zwischen  $-27\text{ °C}$  und  $-23\text{ °C}$ . Das Auskristallisieren des Wachsanteils, das eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit hervorruft [22], zeigt einen negativen Effekt im Tieftemperaturbereich bei diesem Gussasphalt. Unter den drei Rezepturen (MA 11, MA 8 und MA 4 Garage) hat das Garagenmischgut das härteste Bindemittel. Trotzdem liegen die Bruchtemperaturen auf einem hohen Niveau.

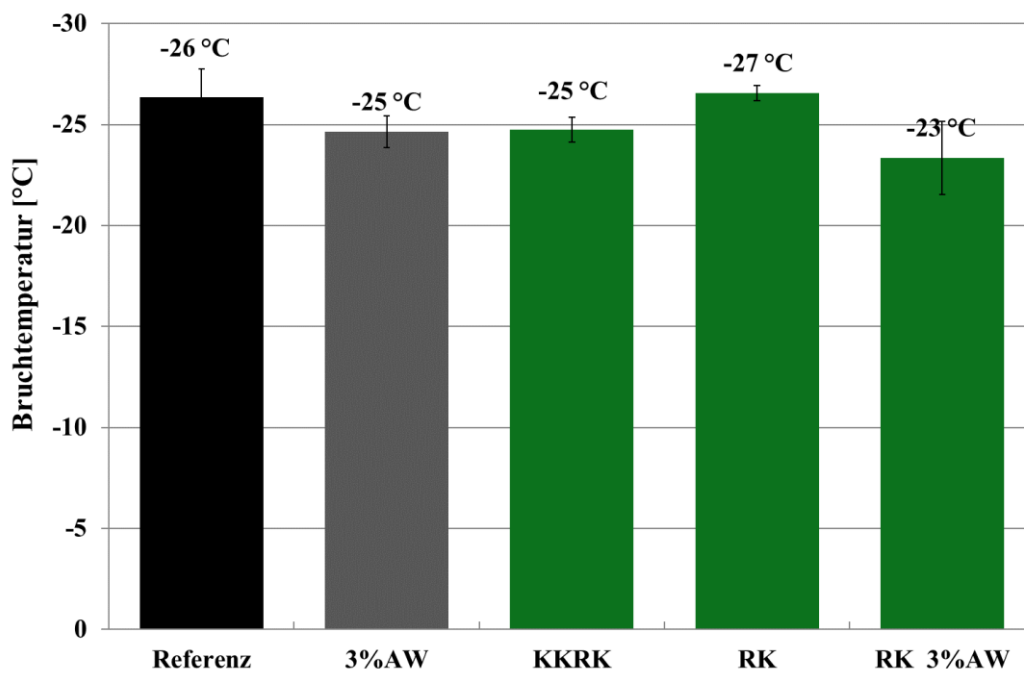


Abbildung 60: MA 4 Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen (TSRST)

In Abbildung 61 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT) dargestellt. Das Referenzmischgut weist eine Verformung von -5% auf und dieser Wert wird als Benchmark aufgenommen. Die höchste Verformung hat das modifizierte mit RK Mischgut (-9%). Alle anderen Varianten bleiben auf einem ähnlichen Niveau wie die Referenz.

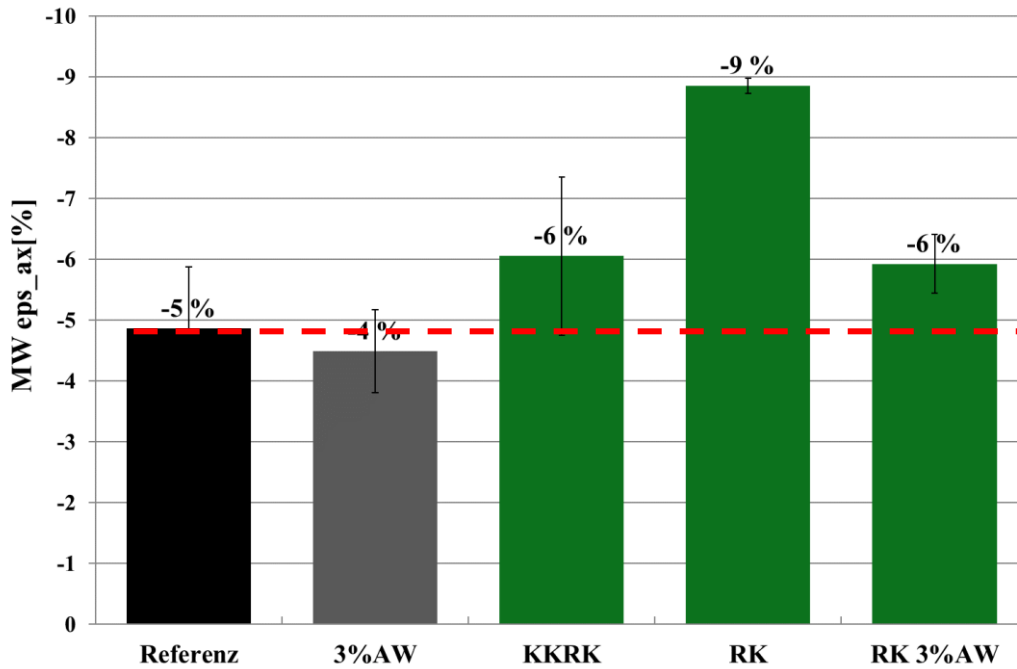


Abbildung 61: Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT)

## 5.7.4 MA 4 Gehsteigmischgut

### 5.7.4.1 Prüfprogramm

Für das MA 4 Gehsteig wurden analog zu MA 4 Garage zuerst die Verarbeitbarkeit und anschließend die Beständigkeit bei hohen und tiefen Temperaturen untersucht. Die Zusätze bzw. Methoden, die eingesetzt wurden, sind wie bei den anderen Gussasphalten das organische Additiv Amidwachs, und der Ersatz des Kantkorns durch Rundkorn. Bei MA 4 Gehsteig kommen die zusätzlichen Varianten (-) Füller und (+) Füller vor, bei denen die Sieblinie optimiert wurde (Kapitel 5.4.7). Die ausgewählten Modifikationsvarianten für das Gehsteigmischgut sind folgende:

- Referenz
- RK 3%W
- (-) Füller
- (+) Füller

Der Unterschied zwischen dem Garagen- und Gehsteigmischgut ist lediglich das Bindemittel. Das Garagenmischgut hat ein härteres Bindemittel und somit ist es steifer als das Gehsteigmischgut. Es ist zu erwarten, dass das Gehsteigmischgut bessere Verarbeitbarkeit, besseres Verhalten bei tiefen Temperaturen aber schlechteres bei hohen Temperaturen als das Garagenmischgut haben wird. Aus diesem Grund wurde ein anderes Prüfprogramm für das Gehsteigmischgut geplant. Die Optimierung mit RK und AW bleibt zur Kontrolle analog

der Modifikation vom Garagenmischgut. Neu sind die Varianten (-) Füller und (+) Füller, wo die Sieblinie variiert wurde.

In Tabelle 38 ist das Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen dargestellt, bei denen eine einfache Bestimmung gemacht wurde.

**Tabelle 38: Prüfprogramm für die Drehmomentmessungen mit Gussasphalt MA 4 Garage**

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	x			
RK 3%AW				x
(-) Füller	x			
(+) Füller	x			

In Tabelle 36 ist das Prüfprogramm für die TSRST-Versuchsreihe. Bei geprüften Varianten wurde eine dreifache bzw. vierfache Bestimmung gemacht.

**Tabelle 39: Prüfprogramm für die TSRST - Versuche mit Gussasphalt MA 4 Garage**

KK	0/11	0/4	4/11	---
RK	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	3x			
RK 3%AW				3x
(-) Füller	4x			
(+) Füller	3x			

In Tabelle 37 ist das Prüfprogramm für die UCCT-Versuchsreihe dargestellt. Bei den ersten zwei Varianten wurden eine zwölf- und eine neunfache Bestimmung gemacht. In diesen zwei Fällen wurde Bitumen aus verschiedenen Chargen verwendet. Das hatte zu einer Streuung der Ergebnisse geführt und es war notwendig mehrfach Mischgut herzustellen. Bei den restlichen zwei Varianten war eine zweifache Bestimmung ausreichend.

**Tabelle 40: Prüfprogramm für die UCCT - Versuche mit Gussasphalt MA 4 Garage**

KK <sup>*)</sup>	0/11	0/4	4/11	---
RK <sup>**)</sup>	---	4/11	0/4	0/11
Referenz	12x			
RK 3%AW				9x
(-) Füller	2x			
(+) Füller	2x			

#### 5.7.4.2 Ergebnisse

##### Temperaturabsenkung

In Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Verarbeitbarkeit des MA 4 Gehsteig dargestellt. Um den Zusammenhang zwischen Mischmoment und Temperatur zu beschreiben, wurde die lineare Regression vom Kapitel 5.7.1.2 verwendet. Wie bei den anderen Gussasphalten zeigt auch hier die Variante RK 3%AW ein hohes Temperaturabsenkungspotential mit wesentlich niedrigeren Drehmomenten als die Referenz. Die zusätzlichen Varianten (-) Füller und (+) Füller sind diejenigen mit der kleinsten Temperaturanfälligkeit (-0,04 Nm/K und -0,02 Nm/K). Sie unterscheiden sich wesentlich bei ihren Schnittpunkten mit der y-Achse. Die Variante (-) Füller hat einen niedrigeren Schnittpunkt (21,9 Nm) und das führt zu niedrigeren Drehmomenten

als die Variante (+) Füller. In Abbildung 62 ist zusätzlich zu sehen, dass die Zugabe von Füller zu den höchsten Drehmomenten führt.

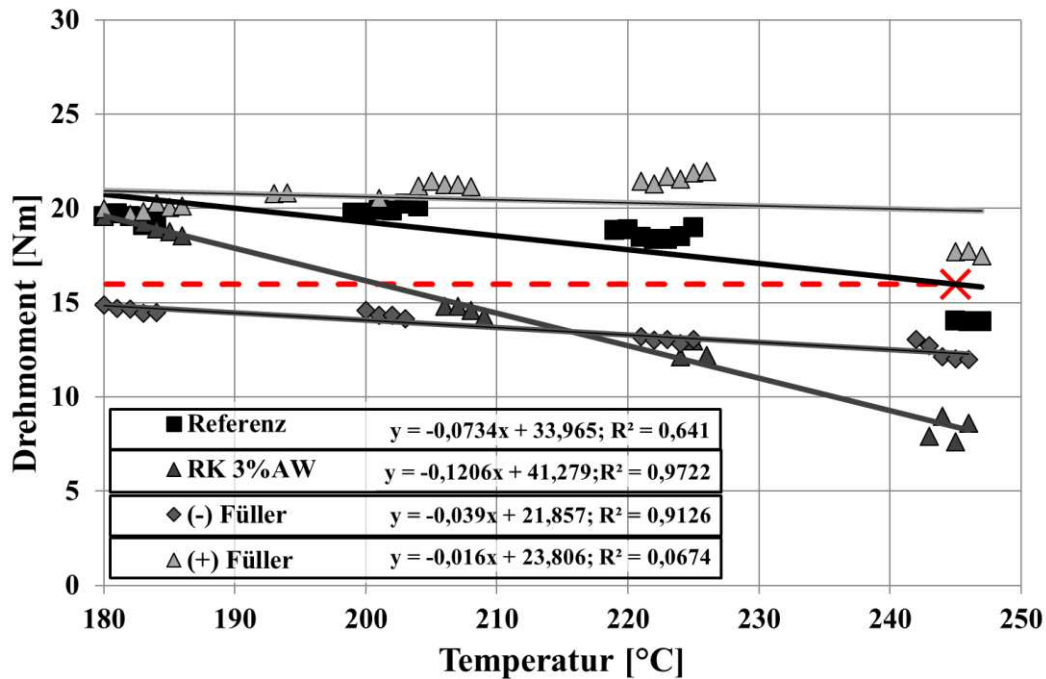


Abbildung 62: Mischmoment vs. Temperatur für alle Varianten

In Abbildung 63 sind die berechneten Änderungen der Verarbeitungstemperatur von der Drehmomentmessung mit dem Labormischer dargestellt. Als Benchmark wurde hier die Viskosität (i.e. das notwendige Drehmoment) des unmodifizierten Gussasphalts bei 245°C ermittelt und für alle anderen Mischungen die äquivalente Temperatur (also die Temperatur, bei der sich gleiches Drehmoment einstellt) ermittelt. Die Variante (+) Füller hat eine schlechtere Verarbeitbarkeit als die Referenz und das führt zu keiner Temperaturabsenkung. Die Variante (-) Füller hat dagegen eine viel bessere Verarbeitbarkeit und somit eine Temperaturabsenkung > 60 K. Die Variante RK 3%AW zeigt ein vergleichbares Temperaturabsenkungspotential wie bei dem Garmischgut.

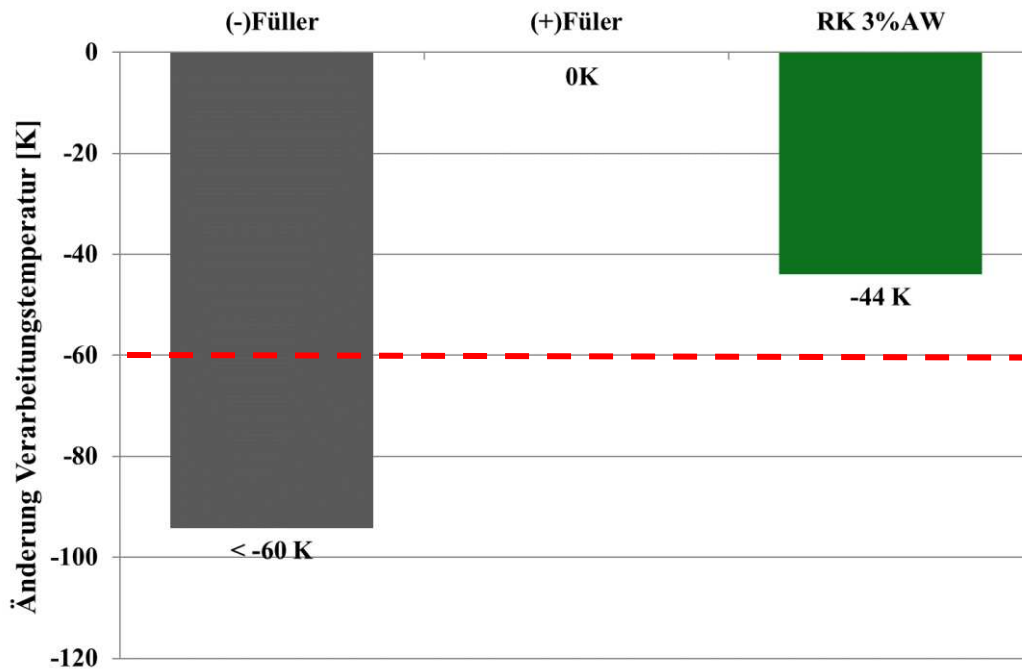


Abbildung 63: Ergebnisse Temperaturänderung MA 4 Gehsteigmischgut Mischgutuntersuchung – Labormischer

Gebrauchsverhalten

In Abbildung 64 sind die MA 4 (Gehsteigmischgut) Ergebnisse der Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen dargestellt. Die Bruchtemperatur liegt bei allen Mischgütern zwischen  $-26^{\circ}\text{C}$  und  $-27^{\circ}\text{C}$ . Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mischgütern zu beobachten. Alle haben eine hohe Beständigkeit gegen Rissbildung.

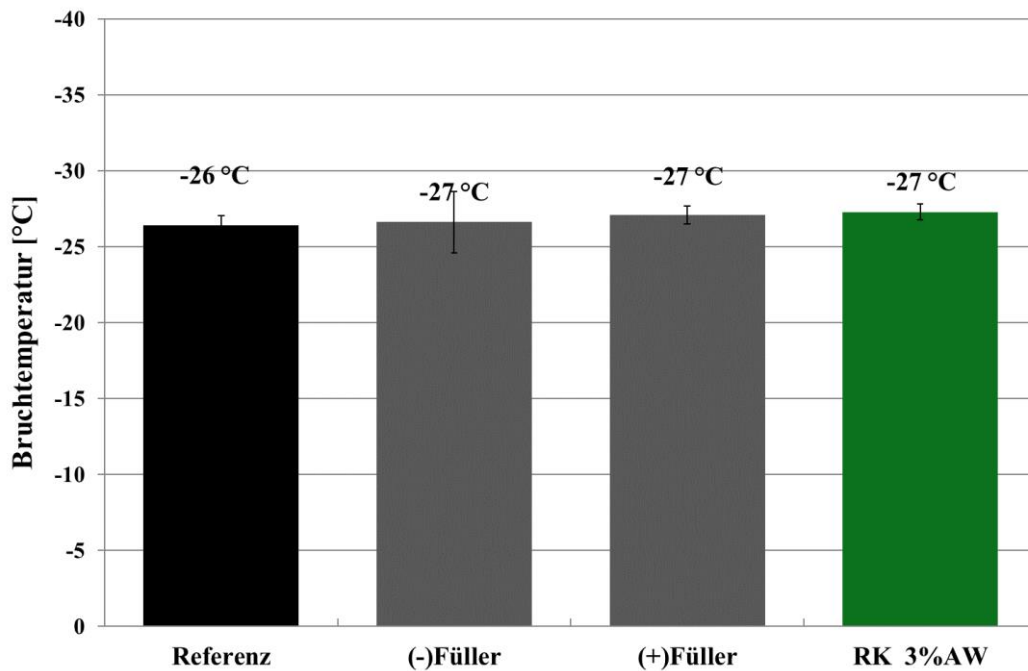


Abbildung 64: MA 4 Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen (TSRST)

In Abbildung 65 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT) dargestellt. Das Referenzmischgut weist eine Verformung von  $-7\%$  auf und dieser Wert wird als Benchmark aufgenommen. Die Verformung der Mischgüter mit RK und AW bleibt auf gleichem Niveau wie beim Referenzmischgut. Die Variante (-) Füller hat die höchste Verformung ( $-9\%$ ) und

(+) Füller die niedrigste Verformung (-4%). Die hohen Standardabweichungen bei der Referenz und RK 3%AW sind Folge der Wiederholungen mit unterschiedlichen Bitumenchargen.

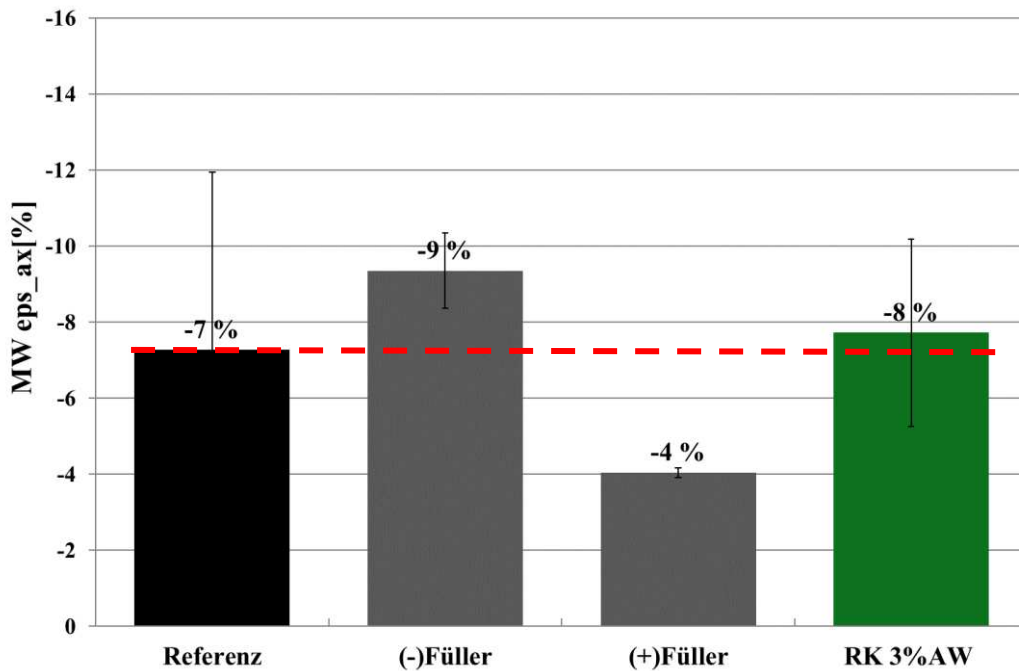


Abbildung 65: Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT)

### 5.7.5 Vergleich Gussasphaltarten

Um die Drehmomentverläufe von den verschiedenen Gussasphalten (MA 11, MA 8 und beide MA 4) zu vergleichen, wurden folgende Varianten ausgewählt:

- Referenz
- RK 4 %AW
- RK 3 %AW

Bei MA 11 und MA 8 wird die Variante RK + 4 %AW verglichen und bei MA 8 und beiden MA 4 die Variante RK + 3 %AW. Jedes Diagramm beinhaltet also die Referenz und die Variante mit dem höchsten Temperaturabsenkungspotential (RK + Wachs) für das jeweilige Mischgut.

Die Rezepturen von MA 4 Garage und Gehsteig unterscheiden sich nur mit ihrer Bitumenmischung (Kapitel 5.4.7). Das Bitumen von MA Gehsteig ist weicher als von MA Garage. MA 8 wurde mit einer noch weicheren Bitumenmischung hergestellt und unterscheidet sich von MA 4 zusätzlich durch Bindemittelgehalt und Sieblinie. MA 11 wurde im Gegensatz zu den anderen Gussasphalten mit polymermodifiziertem Bitumen hergestellt und hat wiederum einen anderen Bindemittelgehalt und Sieblinie. Wenn alle vier Diagramme in Abbildung 66 verglichen werden, dann kann leicht festgestellt werden, dass der MA 11 Gussasphalt die höchsten Drehmomente und die steilsten Geraden hat. Grund dafür ist sowohl die größte Sieblinie als auch das verwendete Bitumen. MA 8 und beide MA 4 haben dagegen eine ähnliche Temperaturanfälligkeit. Die niedrigsten Drehmomente bei Temperaturen zwischen 245 und 250 °C liegen bei allen Gussasphalten auf ca. 10 Nm.

Beide Diagramme von MA 4 unterscheiden sich kaum voneinander. Anders ist das bei dem MA 8 Gussasphalt, dessen Referenz größere Drehmomente als die MA 4 Mischgüter hat und dessen Varianten mit

Wachs nah an MA 4 Varianten mit Wachs liegen. Wiederum anders ist die Situation bei MA 11. Die MA 11 Referenz liegt höher als MA 8 Referenz und MA 11 RK 4%AW ebenso höher als MA 8 RK 4%AW. Die Unterschiede MA 11 zu MA 8 sind deutlicher als MA 8 zu MA 4 und Grund dafür sind sowohl die Binde-mittelarten als auch die Sieblinien. Klarer Tendenz ist, dass je feiner die Sieblinie desto kleiner die Drehmo-mente, obwohl ein härteres Bindemittel für die feinere Sieblinie verwendet wurde.

In den MA 11 und MA 8 Diagrammen ist ein klarer Sprung zwischen modifizierten und nicht modifi-zierten Varianten zu sehen. Grund dafür ist sowohl die Kornform als auch die Zugabe von Wachs, die offen-sichtlich bei größeren Sieblinien einen größeren Effekt hat. Wenn MA 8 und beide MA 4 Gussasphalten be-trachtet werden, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Unterschiede zwischen den Bitumen-kennwerten im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den Sieblinien einen kleineren Einfluss auf die Op-timierung der Verarbeitbarkeit haben. Diese Schlussfolgerung wird nochmals bestätigt, wenn die Drehmo-mente bei 245 °C von den Referenzen der verschiedenen Gussasphalte verglichen werden. Die Referenz von MA 11 hat das höchste Drehmoment, gefolgt von MA 8 und beide MA 4. Wenn die Bindemittelkennwerte in Hinsicht genommen werden, dann soll die Reihenfolge umgekehrt sein. Im Kapitel 4 wird ein Nachteil des Drehmomentversuchs beschrieben und der starke Einfluss des Größtkorns kann mit diesem Nachteil erklärt werden.

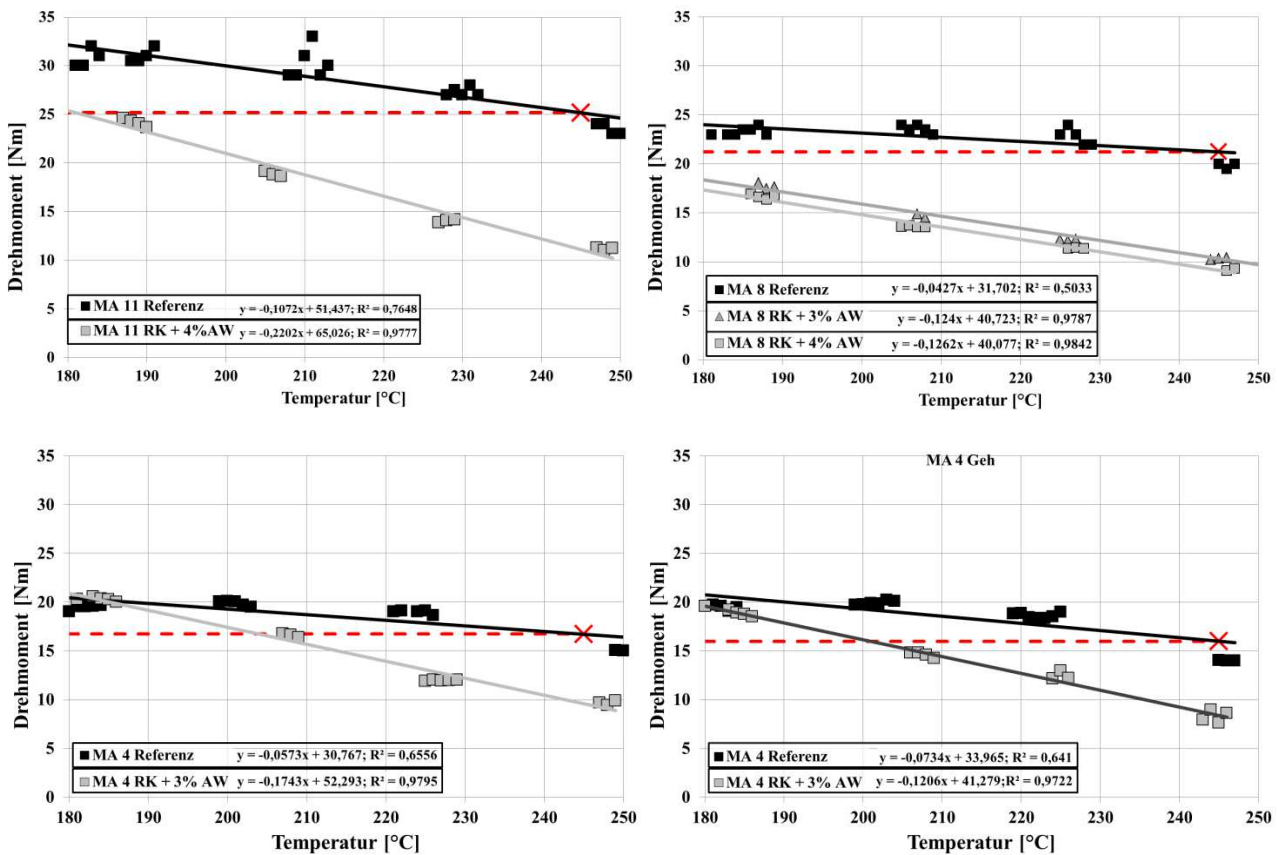


Abbildung 66: Drehmomentverläufe von MA 11 (oben links), MA 8 (oben rechts), MA 4 Garage (unten links) und MA 4 Gehsteig (unten rechts)

In Abbildung 67 ist die Änderung der Verarbeitungstemperatur der Kombination von Rundkorn und Wachs der verschiedenen Gussasphalte dargestellt. Die MA 11 und MA 8 Mischgüter liegen unter der Grenze von -60 K. Die MA 4 Gussasphalte haben die kleinste Temperaturabsenkung, was hauptsächlich von der feinen Sieblinie beeinflusst wird. MA 4 Gehsteig liegt etwas günstiger, weil das Bindemittel weicher ist.



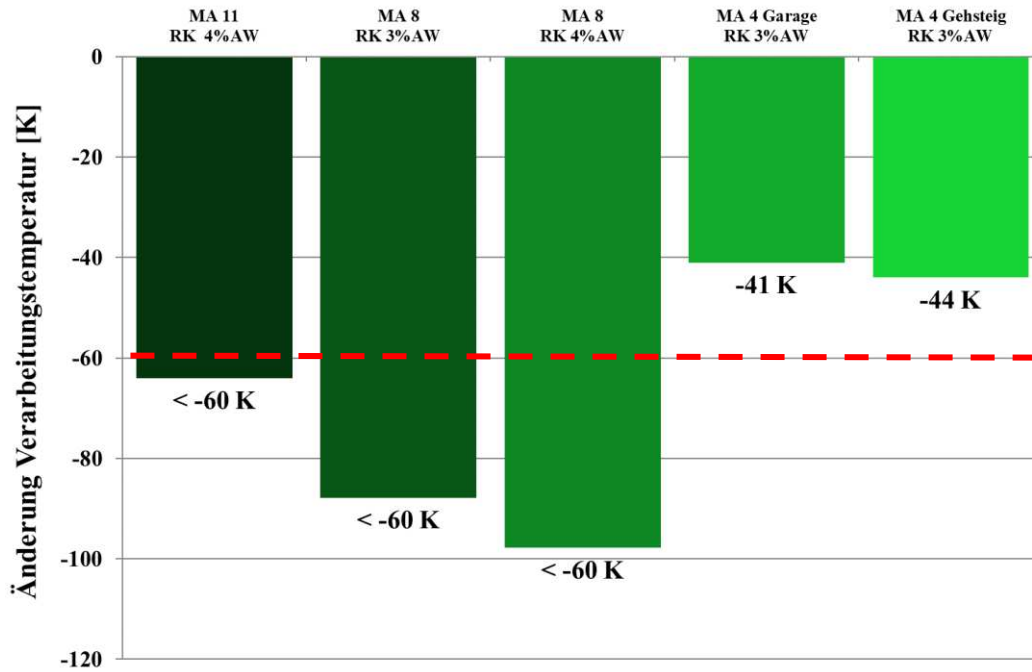


Abbildung 67: Vergleich Temperaturabsenkung

In Abbildung 68 sind die Bruchtemperaturen der Referenz und der Kombination von Rundkorn und Wachs der verschiedenen Gussasphalte dargestellt. Die niedrigsten Bruchtemperaturen haben die MA 11 Mischgüter. MA 11 ist auch der einzige Gussasphalt mit polymermodifiziertem Bindemittel, das bessere Gebrauchsspanne im unteren Temperaturbereich als das Destillations- und Oxidationsbitumen hat. Die MA 8 und MA 4 Mischgüter weisen eine ähnliche Beständigkeit gegen Rissbildung auf. Das einzige Mischgut über  $-25^{\circ}\text{C}$  ist MA 4 Garage RK 3%AW. MA 4 Garage ist auch der Gussasphalt mit dem härtesten Bindemittel. Dieselbe Variante aber mit weicherem Bindemittel MA 4 Gehsteig RK 3%AW liegt schon unter  $-25^{\circ}\text{C}$ . Das Auskristallisieren des Wachsanteils, das eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit hervorruft [22], zeigt einen negativen Effekt im Tieftemperaturbereich nur bei dem Gussasphalt mit dem härtesten Bindemittel.

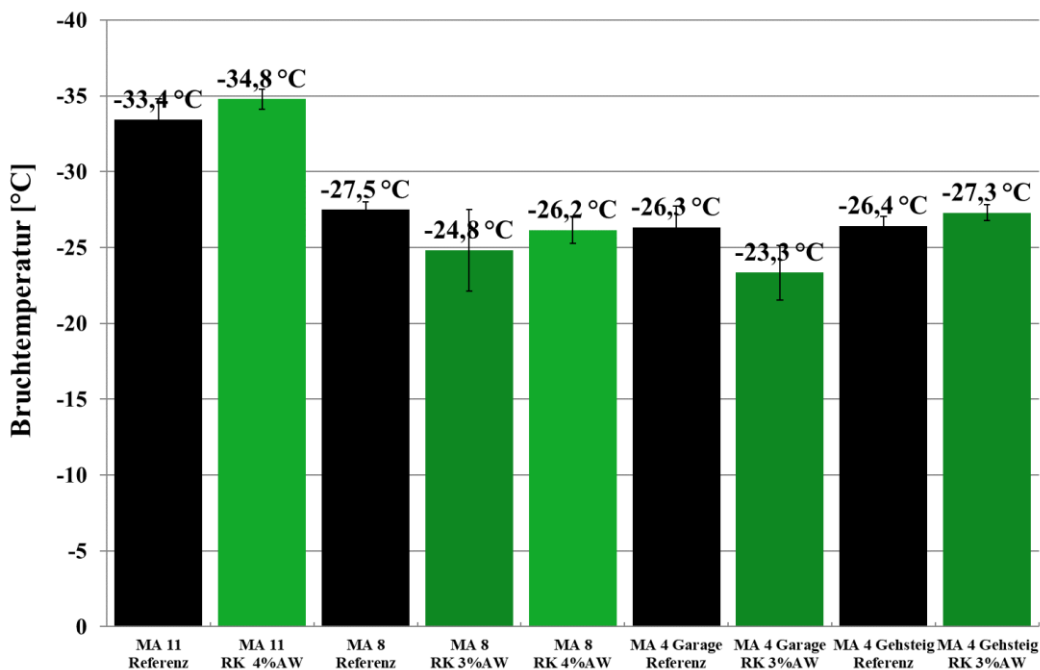


Abbildung 68: Vergleich Bruchtemperaturen

In Abbildung 69 sind die Ergebnisse aus der Prüfung zur Beständigkeit gegen Verformung bei 50 °C der Referenz und der Kombination von Rundkorn und Wachs der verschiedenen Gussasphalte dargestellt. MA 11 hat die größten Verformungen, gefolgt von MA 8, MA 4 Gehsteig und MA 4 Garage. Diese Reihenfolge entspricht der Bitumenhärte der Gussasphalte. Die Sieblinie in Bezug auf das Größtkorn spielt offensichtlich eine Nebenrolle im Vergleich zur Bindemittelart bei der Beständigkeit gegen Verformung bei 50°C. Umgekehrt war der Fall bei der Bestimmung der Verarbeitbarkeit mit den Drehmoment-Messungen. Das heißt, dass bei Temperaturen über 180°C (wenn das Mischgut „flüssig“ ist) die ganze Sieblinie entscheidend ist, und bei Temperaturen unter 50°C (wenn das Mischgut einen Festkörper ist) die Bindemittelart und die Sieblinie in ihrem feinen Bereich entscheidend sind.

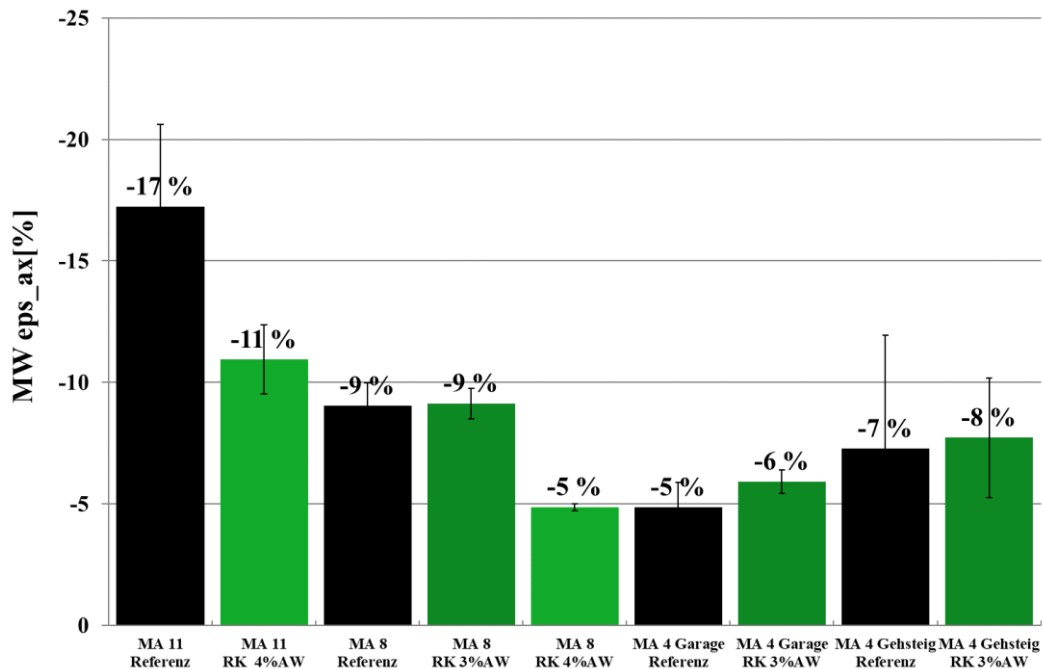


Abbildung 69: Vergleich Bleibende Verformungen

## 5.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Prüfprogramm im Kapitel 5 beinhaltet vier Gussasphaltarten. Es fängt mit dem Mischgut für das hochrangige Straßennetz an, das mit PmB 25/55-65 hergestellt wurde und endet mit dem Mischgut für Gehsteige, das mit einer Mischung aus Oxidations- und Destillationsbitumen hergestellt wurde.

Am Anfang des Prüfprogramms wurde das Temperaturabsenkungspotential der verschiedenen Bitumenadditiven geprüft. Sowohl auf Bitumen- als auch auf Asphalzebene hat das Amidwachs besser als die anderen Zusätze abgeschnitten. Mit der Kombination von Amidwachs und Rundkorn wurde die größte Temperaturabsenkung unter allen Varianten und allen Gussasphalten erreicht. Hinsichtlich der TSRST-Ergebnisse kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sowohl die Referenzen als auch die modifizierten Mischgüter eine sehr hohe Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse aufweisen. Nur bei dem Garagenmischgut hat die Wachszugabe einen negativen Effekt im Tieftemperaturbereich. Unter allen Rezepturen (MA 11, MA 8 und beide MA 4) hat das Garagenmischgut das härteste Bindemittel. Trotzdem liegen die Bruchtemperaturen auf einem hohen Niveau. Die UCCT-Ergebnisse zeigen, dass nur die Variante mit der höchsten Temperaturabsenkungspotential (RK 3%AW) niedrigere oder gleiche Verformung wie die Referenz erreicht.

Um die verschiedenen Gussasphalten (MA 11, MA 8 und beide MA 4) miteinander besser zu vergleichen, wurden drei Varianten (Referenz, RK 4%AW, RK 3%AW) betrachtet. Wenn die

Drehmomentmessungen verglichen werden, dann kann leicht festgestellt werden, dass die niedrigsten Drehmomente bei Temperaturen zwischen 245 und 250 °C bei allen Gussasphalten auf ca. 10 Nm liegen. Klare Tendenz (im Temperaturbereich 180 - 250 °C) ist das, dass je feiner die Sieblinie desto kleiner die Drehmomente und damit die Temperaturanfälligkeit, abgesehen davon, dass die feinere Sieblinie mit härterem Bindemittel verwendet wurde. Die modifizierten MA 4 Gussasphalten haben die kleinste Temperaturabsenkung, was hauptsächlich von der feinen Sieblinie beeinflusst wird. In den MA 11 und MA 8 Diagrammen ist ein klarer Sprung zwischen modifizierten und nicht modifizierten Varianten zu sehen. Grund dafür ist sowohl die Kornform als auch die Zugabe von Wachs, die offensichtlich bei größeren Sieblinien einen größeren Effekt hat. Wenn alle Gussasphalte verglichen werden, dann kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Unterschiede zwischen den Bindemittelkennwerten im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den Sieblinien einen kleineren Einfluss auf die Optimierung der Verarbeitbarkeit haben. Hinsichtlich der TSRST-Ergebnisse zeigt das Auskristallisieren des Wachsanteils, der eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit hervorruft [22], einen negativen Effekt im Tieftemperaturbereich nur bei dem Gussasphalt mit dem härtesten Bindemittel (MA 4 Garage). Die UCCT-Ergebnisse zeigen, dass MA 11 die größten Verformungen aufweist, gefolgt von MA 8, MA 4 Gehsteig und MA 4 Garage. Diese Reihenfolge entspricht der Bitumenhärte der Gussasphalte. Die Sieblinie spielt offensichtlich eine Nebenrolle im Vergleich zur Bindemittelart bei der Beständigkeit gegen Verformung bei 50°C. Umgekehrt war der Fall bei der Bestimmung der Verarbeitbarkeit mit den Drehmomentmessungen. Das heißt, dass bei Temperaturen über 180°C (wenn der Gussasphalt „flüssig“ ist) die ganze Sieblinie entscheidender ist, und bei Temperaturen unter 50°C (wenn der Gussasphalt ein Festkörper ist) die Bindemittelart und die Sieblinie in ihrem feinen Bereich entscheidender sind.

## 6 GROSSTECHNISCHE UMSETZUNG

Im Kapitel 5 wurden die Gussasphalte auf Laborebene entwickelt und untersucht. Nächster Schritt war die großtechnische Umsetzung von ausgewählten Mischgütern an der Mischanlage und deren Einbau auf einer Probestrecke. Im Rahmen des Kapitels 6 werden nur MA 8 Mischgütern berücksichtigt, weil MA 8 den Stand der Technik für Gussasphalte im Straßenbau in Österreich darstellt.

### 6.1 Ziele

Es war wichtig die großtechnische Umsetzung in zwei Schritte (Mischanlage und Probestrecke) zu unterteilen, weil zuerst die Praxistauglichkeit der Mischgüter an der Mischanlage geprüft werden sollte. Es wurde auch untersucht, ob die im Labor erreichten Temperaturabsenkungen bei der Verarbeitung von großen Mengen in der Praxis möglich sind. Zudem wurden über den Einbau von kleinen Probefeldern auf Flächen des Industriepartners die Bedingungen bei händischem Einbau analysiert. Daten zu tatsächlich möglicher Temperaturabsenkung und Energieverbrauch in der Mischanlage sind wiederum wichtige Eingangsparameter für realitätsnahe Emissions-, Energie- und Kostenanalysen. Um das Gebrauchsverhalten zu untersuchen und ggf. Unterschiede zu auf Labormaßstab produziertem Mischgut feststellen zu können, wurde auch Mischgut aus der Mischanlage entnommen und im Labor geprüft.

Als letzter Schritt vor einer routinemäßigen Übernahme der innovativen Gussasphalte in die Praxis war der Einbau einer Probestrecke mit Zustandserfassung auf dem öffentlichen Straßennetz der Stadt Wien vorgesehen. Durch den Einbau von konventionellen und innovativen Rezepturen und die nachfolgende Zustandserfassung wurden Erfahrungen zu Bedingungen bei realem Einbau gesammelt. Ebenso wurde durch die laufende Zustandserfassung (Griffigkeits-, Ebenheitsmessungen und visuelle Zustandserfassungen) erkennbar, wie konventionelle und innovative Mischungen sich unter Klima und Verkehrsbelastung verhalten. Dies sind wichtige Argumente für eine zukünftig routinemäßige Anwendung von innovativen Mischungen, vor allem auch für ausschreibende Stellen. Gleichzeitig dienen die Daten zu realitätsnahen Emissions-, Energie- und Kostenanalysen über den Lebenszyklus.

Ein weiteres Ziel war es die gesundheitsrelevanten Emissionen und ihre Veränderung durch Temperaturabsenkung zu untersuchen. Es wurden sowohl zwei Laborstudien als auch eine Feldstudie durchgeführt, um praxisnahe Daten zu erhalten, die die bisher dürftige Datenlage verbessern und als erweiterte Entscheidungsgrundlage für eine Temperaturabsenkung dienen können. Felddaten spielen bei der Einschätzung der Umweltverträglichkeit eine entscheidende Rolle, da die Laborbedingungen und Feldbedingungen vor allem auch in der technischen Umsetzung verschiedener Prozessschritte nur bedingt vergleichbar sind. Eine Erweiterung um Felddaten war unbedingt notwendig, um vor allem die Beeinträchtigung bei händischem Einbau zu bestimmen, die bezüglich der Arbeitssicherheit tatsächlich den kritischen Verarbeitungsschritt darstellt.

Energie- und Emissionseinsparungen während der Produktion sind wesentliche Vorteile von temperaturabgesenkten Gussasphalten. Aufgrund der niedrigeren Kurzzeitalterung durch verringerte Temperaturbeanspruchung wird außerdem erwartet, dass der Instandhaltungsaufwand einer Gussasphaltdecke während der Nutzungsphase verringert ist. Daraus folgt ein geringerer Material-, Energie- und Kostenaufwand nicht nur während der Produktion, sondern auch über die folgende Lebensdauer. Dies kann durch eine Lebenszyklusanalyse in Bezug auf Energie und Stoffflüsse ganzheitlich untersucht werden. Durch die Analysen über den Lebenszyklus konnten nicht nur die unmittelbaren Einsparungen während der Produktion ermittelt, sondern auch langfristige Potenziale zur Senkung von Energie und Kosten dargestellt werden.

## 6.2 Betrachtungsebenen

### 6.2.1 Labor

Im Kapitel 5 wurden die Gussasphalte im Labor optimiert. Für die großtechnische Umsetzung wurden dann von den optimierten Gussasphalten vier Rezepturen ausgewählt. Im Rahmen des Prüfprogramms im Kapitel 6 wurde nur Amidwachs (AW) unter den Wachsarten verwendet, deshalb ist die Abkürzung (W) ausreichend. Die ausgewählten Rezepturen sind:

- Referenz
- KKRK
- KKRK 2%W
- 3%W
- RK 3%W

Grund für die Auswahl von KKRK war, dass diese temperaturabgesenkte Variante ohne Wachs gleiches Gebrauchsverhalten wie die Referenz aufweist. Da das Wachs das Mischgut verteuert und den ökologischen Fußabdruck erhöht, war ein Ziel das Potential einer Variante ohne Wachs bei der großtechnischen Umsetzung zu testen. Das Mischgut 3%W ist in das Prüfprogramm aufgenommen worden, weil es den Stand der Technik für temperaturabgesenktes Mischgut darstellt. Das vierte Mischgut RK 3%W ist die modifizierte Variante mit der niedrigsten Einbautemperatur und gleichzeitig gleichbleibendem Gebrauchsverhalten. Es war besonders wichtig zu wissen, ob dieses Mischgut dasselbe Potential auch bei großtechnischer Umsetzung zeigen wird. KKRK 2%W ist eine Alternative zu RK 3%W und ermöglicht eine Absenkung der Wachszugabe, diese Variante wurde nur auf Labor- und Mischanlageebene untersucht. Auf der Probestrecke war der Einbau von nur vier Mischgütern möglich, weil das bei den ersten Besprechungen mit dem Industriepartner so festgelegt wurde. Für die Untersuchung an der Mischanlage wurde eine Ausnahme gemacht. Für die Probestrecke wurden die Varianten ausgewählt, die am besten das Potential der Optimierungsmethoden beschreiben können. Das waren die Referenz, die Variante ohne Wachs (KKRK), die Stand der Technik Variante zur Temperaturabsenkung (3%W) und die Variante mit dem höchsten Potential zur Temperaturabsenkung (RK 3%W). Das vorhandene Prüfprogramm beweist, dass alles dazwischen technisch möglich ist und Gegenstand einer zusätzlichen Probestrecke werden kann.

In Tabelle 41 sind die ausgewählten Labor-Rezepturen mit ihren Herstellungstemperaturen (im Labor) dargestellt. Als Herstellungstemperatur der Referenz wurde 230 °C festgelegt [86]. Bei den modifizierten Varianten wurden die Temperaturabsenkungen von Kapitel 5 berücksichtigt. Da die Laborebene zuerst im Prüfprogramm durchgeführt war, waren die tatsächlichen Einbautemperaturen der Mischgutvarianten noch nicht bekannt.

Tabelle 41: Herstellungstemperaturen

LABOR					
Mischgut	KK	KKRK	KKRK 2%W	3%W	RK 3%W
PK	T598	T639	T658	T664	T669
Temperatur [°C]	230	210	190	190	190

## 6.2.2 Mischanlage

Die MA 8 Gussasphalt-Mischungen von Kapitel 6.2.1 wurden nach den Untersuchungen auf Laborebene erstmals großtechnisch auf der Mischanlage umgesetzt. Dazu wurden die entsprechenden Rezepturen in der Größenordnung einiger Tonnen hergestellt (zum Vergleich wurden im Labor pro Mischung ca. 20kg hergestellt). Dieser Schritt war wichtig, damit das Mischanlagenpersonal die Rezepturen für den nächsten Schritt – Probestrecke – vorbereiten kann, die tatsächliche Einbautemperatur der Rezepturen bestimmen kann und um festzustellen, ob die Temperaturabsenkungsmethoden den gleichen Effekt bei großtechnische Produktion wie im Labor haben. Mit den innovativen Mischungen wurden auf den Flächen des Industriepartners Probefelder hergestellt, um den händischen Einbau bei niedrigen Temperaturen zu überprüfen. Zudem wurde Mischgut aus der Mischanlage entnommen und im Labor auf das Gebrauchsverhalten hin untersucht, um ggf. Unterschiede zu im Labormaßstab produziertem Mischgut feststellen zu können. Die großtechnische Umsetzung in der Mischanlage von MA 8 Mischgütern fand im Juli 2016 statt.

Auf dem Gelände der Asphaltmischanlage Simmering wurde im Juli 2016 ein Probefeld mit den Abmessungen von 8 x 2 m<sup>2</sup> bestimmt. Die vier modifizierten Gussasphaltemischgüter wurden in 4 Gussasphaltkochen vorbereitet. Die Verarbeitbarkeit von allen Mischgütern wurde in drei Schritten geprüft. Pro Schritt wurde die Temperatur um 10 °C erhöht und pro Schritt und Mischgut wurden ca. 1,3m<sup>2</sup> händisch von der Einbaupartie des Industriepartners eingebaut. Es wurde laufend notiert, bei welcher Temperatur die Mischgüter streichbar waren. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Streichversuche dargestellt. RK 3%W konnte bei der niedrigsten Temperatur (190°C) eingebaut werden. Das Mischgut 3%W war bei 220°C streichbar und KKRK konnte zwischen 220 und 225°C eingebaut werden. Die zusätzliche Variante KKRK 2%W hatte eine Einbautemperatur zwischen 210 – 215 °C.

Tabelle 42: Ergebnisse Streichversuch

Mischgut	Einbautemperatur [°C]	Streichbar
KKRK	190	Nein
KKRK 2%W	180	Nein
RK 3%W	180	Nein
3%W	195	Nein
KKRK	210	Nein
KKRK 2%W	195	Nein
RK 3%W	190	Ja
3%W	200	Nein
KKRK	220 - 225	Ja
KKRK 2%W	210 - 215	Ja
RK 3%W	206	Ja
3%W	220	Ja

Das Prüfprogramm in diesem Kapitel zeigt, dass alle Mischgutvarianten großtechnisch an einer konventionellen Mischanlage hergestellt werden können.

### 6.2.3 Baustelle/Probestrecke

Das nächste Ziel nach der Umsetzung der Mischgüter an der Mischanlage war der Einbau einer Probestrecke im August 2016 im öffentlichen Straßennetz der Stadt Wien. Die Probestrecke wurde in der Oberdorfstraße, 22. Bezirk festgelegt. Zwei Fahrstreifen mit einer Länge von ca. 168m waren vorhanden und es gibt Busverkehr, aber keine Haltestellen im Bereich der Probestrecke. Die vier Rezepturen (Referenz, KKRK, 3%W und RK 3%W) wurden unter gleichen Klima- und Verkehrsbedingungen eingebaut. Die ganze Asphaltkonstruktion der Probestrecke wurde komplett abgefräst. Danach wurden neue Trag- und Binderschicht eingebaut und zum Schluss wurde Gussasphalt als Deckschicht appliziert.

Der Einbau erfolgte durch den Industriepartner. Während der Bauarbeiten wurde laufend Mischgut entnommen, das im Labor auf das Gebrauchsverhalten hin untersucht wurde. Begleitend wurde eine regelmäßige Zustandserfassung durchgeführt. Dabei wurde bis Frühjahr 2019 untersucht, wie sich die vier Abschnitte in Bezug auf Verformungen, Risse und Griffigkeit darstellen.

Der Einbau der vier Gussasphaltmischgüter fand in Kalenderwochen 32 und 33 im Jahr 2016 statt. In Abbildung 70 ist ein Schema der Probestrecke dargestellt. Es sind die einzelnen Probefelder mit deren Einbaudatum, Länge und Einbautemperatur zu sehen. Zwei Probefelder haben eine Länge von 74m und zwei von 95m. Es wurde ein Mischgut pro Tag eingebaut. Die Soll-Einbautemperaturen wurden bei den Streichversuchen an der Mischanlage festgelegt. Das sind die niedrigsten Temperaturen, bei denen das jeweilige Mischgut händisch streichbar war. Auf der Baustelle wurde eine maximale Abweichung von den festgelegten Einbautemperaturen von  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  angestrebt und erreicht.

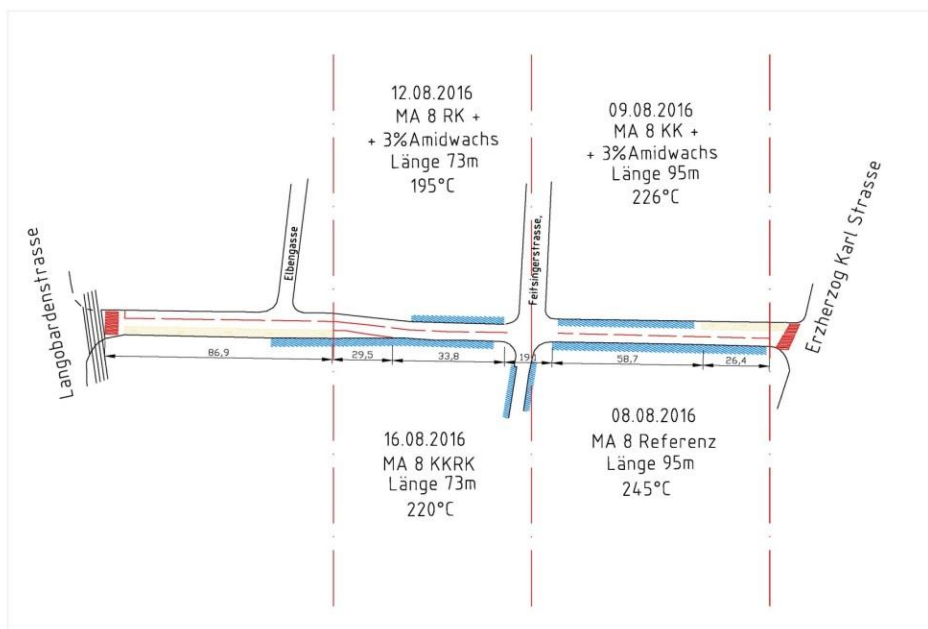


Abbildung 70: Schema Probestrecke

In Abbildung 71 ist ein Foto vom letzten Einbautag, an dem KKRK eingebaut wurde, dargestellt. Links auf dem Foto von den Einbauarbeiten ist die schon fertige und abgesplittete Deckschicht RK 3%W zu sehen. Im Hintergrund rechts ist die fertige Referenz und links die Variante mit 3% Wachs.



Abbildung 71: Letzter Einbautag

Während der Einbauarbeiten wurde auch kontinuierlich die Mischguttemperatur im Anlieferzustand gemessen. In Tabelle 43 sind die gemessenen Temperaturen der vier Mischgüter zu sehen und in der rechten Spalte sind die Mittelwerte angegeben. Diese Mittelwerte sind als die Einbautemperatur des jeweiligen Mischguts angenommen.

Tabelle 43: Temperaturmessung Baustelle

KK								
Uhrzeit	08:00	09:30	10:50	11:00	11:30	12:12	12:40	MW
Temperatur [°C]	250	239	248	241,5	246	246	247	245
KKRK								
Uhrzeit	06:00	07:00	07:20	07:34	07:52	08:00	08:45	MW
Temperatur [°C]	220	210	225	220	220	220	222	220
3%W								
Uhrzeit	07:20	7:42	08:15	08:44	09:23	10:25	11:09	MW
Temperatur [°C]	225,5	225	229,5	227	225,5	229	220,5	226
RK 3%W								
Uhrzeit	07:30	07:50	09:00	10:00	10:15	10:35	11:00	MW
Temperatur [°C]	190	195	200	190	196	196	196	195

Die Asphaltproben wurden so entnommen, dass es einen Unterschied zwischen der Verweildauer der Proben im Kocher gibt, um dann zu untersuchen, ob Änderung im Mischgut stattfindet. An der Mischanlage wurde das Mischgut gleich nach der Herstellung in die mobilen Kocher eingefüllt und zur Baustelle geschickt und diesbezüglich kann angenommen werden, dass das Mischgut in allen Kochern die gleiche Qualität hat. In Tabelle 44 sind die entnommenen Proben mit ihrer Verweildauer in den jeweiligen Kochern aufgelistet.



Tabelle 44: Probeentnahme Baustelle

BAUSTELLE									
Rezeptur	KK			KKRK		3%W		RK 3%W	
PK Code	T714	T718	T716	T726	T728	T719	T720	T722	T725
Kocher	1	2	3	1	2	1	2	1	2
Verweildauer [min]	30	60	210	80	240	102	180	120	300

### 6.3 Prüfmethode und Prüfprogramm

#### 6.3.1 Prüfmethode

- Asphaltanalyse zur Bestimmung des Bindemittelgehalts und der Sieblinie [99]
- Nadelpenetration [37]
- Erweichungspunkt Ring & Kugel [38]
- Dynamisches Scherrheometer DSR [51]. Damit einerseits ein größerer Temperatur-, als auch Frequenzbereich abgedeckt wird und andererseits eine größere Datenbasis geschaffen wird, wurde ein Versuchsprogramm mit folgenden Parametern realisiert:
  - Temperatursweep: -8 °C bis +82 °C in 6 K Schritten
  - Frequenzsweep: 0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 1,592 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz und 40 Hz
- Abkühlprüfungen (TSRST) nach [58]
- Einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT) nach [95]

#### 6.3.2 Prüfprogramm

In Tabelle 45 ist das Prüfprogramm für Kapitel 6 dargestellt. Für alle Betrachtungsebenen und Mischgüter (außer KKRK 2%W) wurde Asphaltanalyse (Bindemittelgehalt und Sieblinie) durchgeführt. Für die Asphaltanalyse und die Rückgewinnung vom Bindemittel wurden die UCCT Probekörper mit Ausnahme von KK (Labor) und KKRK (Labor) verwendet. Im Fall KK (Labor) und KKRK (Labor) wurden die TSRST PK verwendet.

Tabelle 45: Prüfprogramm

		PK	Analyse	Pen	Ruk	DSR	PK	TSRST	PK	UCCT
LABOR	KK	K543	X	X	X	X	K543	X	T598	X
	KKRK	K666	X	X	X	X	K666	X	T639	X
	KKRK 2%W	-	-	-	-	-	-	-	T658	X
	3%W	T664	X	X	X	X	K584	X	T664	X
	RK 3%W	T669	X	X	X	X	K583	X	T669	X
MISCH-ANLAGE	KK	T678	X	X	X	X	K673	X	T678	X
	KKRK	T676	X	X	X	X	K674	X	T676	X
	KKRK 2%W	-	-	-	-	-	-	-	T647	X
	3%W	T673	X	X	X	X	K675	X	T673	X
	RK 3%W	T675	X	X	X	X	K676	X	T675	X
	RK 3%W	-	-	-	-	-	K703	X	T821	X
BAUSTELLE	KK	T714	X	X	X	X	K623	X	T714	X
		T718	X	X	X	X	-	-	T718	X
		T716	X	X	X	X	-	-	T716	X
	KKRK	T726	X	X	X	X	K636	X	T726	X
		T728	X	X	X	X	-	-	T728	X
	3%W	T719	X	X	X	X	K629	X	T719	X
		T720	X	X	X	X	-	-	T720	X
	RK 3%W	T722	X	X	X	X	K632	X	T722	X
		T725	X	X	X	X	-	-	T725	X

## 6.4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse des Prüfprogramms in Tabelle 45 zusammengefasst. In Abbildung 72, Abbildung 73, Abbildung 74, Abbildung 76 und Abbildung 77 sind in Schwarz und Dunkelgrau die Proben ohne Wachs und in Hellgrau die Proben mit Wachs zu sehen.

### 6.4.1 Asphaltanalyse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Asphaltanalyse von allen Mischgütern dargestellt. Es sind Daten zu den Bindemittelgehalte, Füllergehalten, Füller/Bitumen-Verhältnissen und Sieblinien zusammengefasst. In Abbildung 72 sind die Bindemittelgehalte von den analysierten Mischgütern in M% zu sehen. Es sind alle drei Ebenen (Labor, Mischanlage und Baustelle) berücksichtigt. Jede Ebene umfasst die Varianten KK, KKRK, 3%W und RK 3%W. Mit einer roten Linie sind die Mittelwerte für die jeweilige Ebene dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Mittelwert im Labor (8,8 M%) der höchste ist. Der durchschnittliche Bindemittelgehalt bei der Mischanlage ist 8,6 M% und auf der Baustelle 8,3 M%.

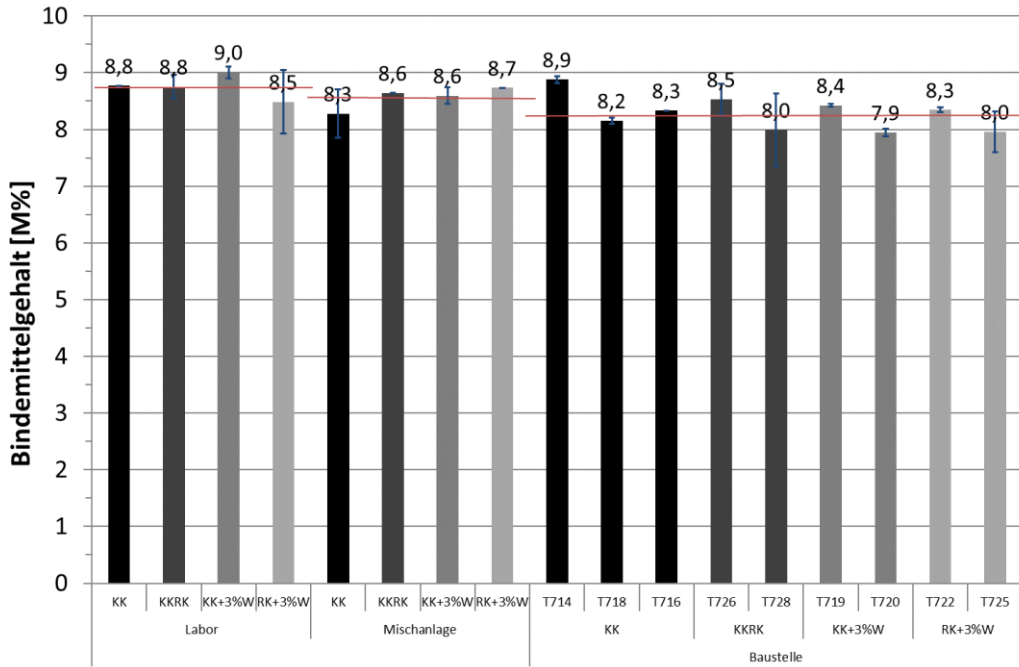


Abbildung 72: Bindemittelgehalt

In Abbildung 73 sind die Füllergehalte in M% dargestellt. In diesem Fall unterscheiden sich die Mittelwerte zwischen Labor, Mischanlage und Baustelle weniger voneinander. Es ist aber trotzdem eine aufsteigende Tendenz (Labor 23,5 M%, Mischanlage 23,7 M%, Baustelle 24,5 M%) zu erkennen.

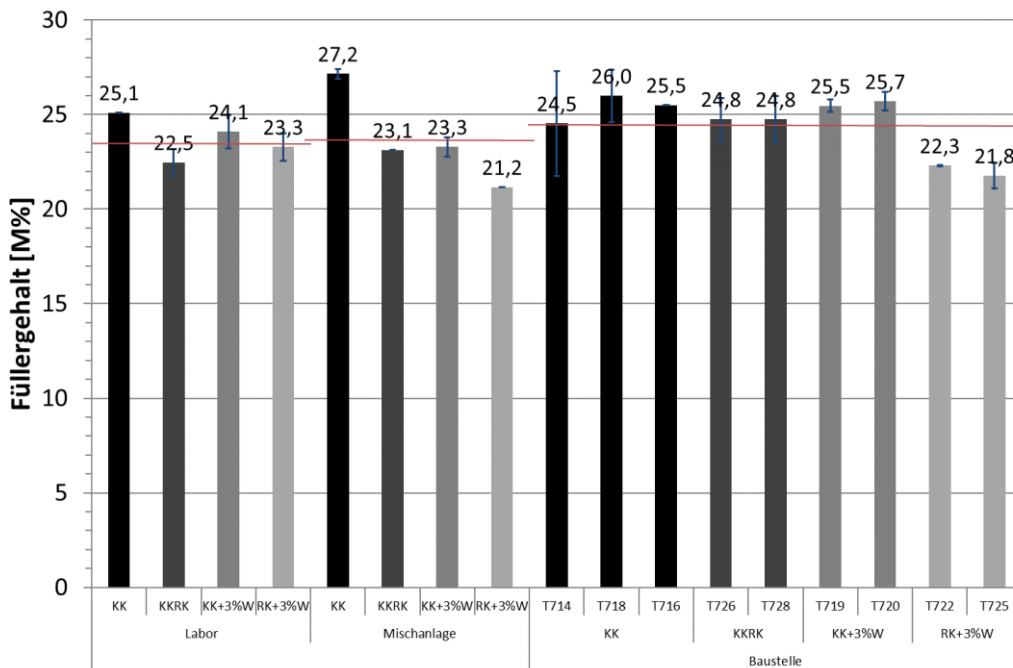


Abbildung 73: Füllergehalt

In Abbildung 74 sind die Füller/Bitumen-Verhältnisse zu sehen. Die Ergebnisse unterstreichen die Unterschiede bei den Bindemittelgehalten zwischen den Betrachtungsebenen (Labor, Mischanlage und Baustelle). Mittelwert des Füller/Bitumen-Verhältnis vom Labor ist 2,69, von der Mischanlage 2,77 und von der Baustelle 2,96. Das Füller/Bitumen Verhältnis von der Baustelle ist um 10 % höher als vom Labor. Diese Unterschiede haben einen Einfluss auf das Gebrauchsverhalten der Asphaltmischgüter (Kapitel 6.4.3). Im

konkreten Fall führt ein höheres Füller/Bitumen Verhältnis zu einer höheren Beständigkeit gegen bleibende Verformungen [95]. Die Unterschiede zwischen den Füller/Bitumen-Verhältnissen werden bei der Berechnung der Korrelationen (zwischen den Parametern  $|G^*|$  und  $\epsilon_{s,ax}$ , und  $\Phi$  und  $\epsilon_{s,ax}$ ) im Kapitel 6.5 berücksichtigt.

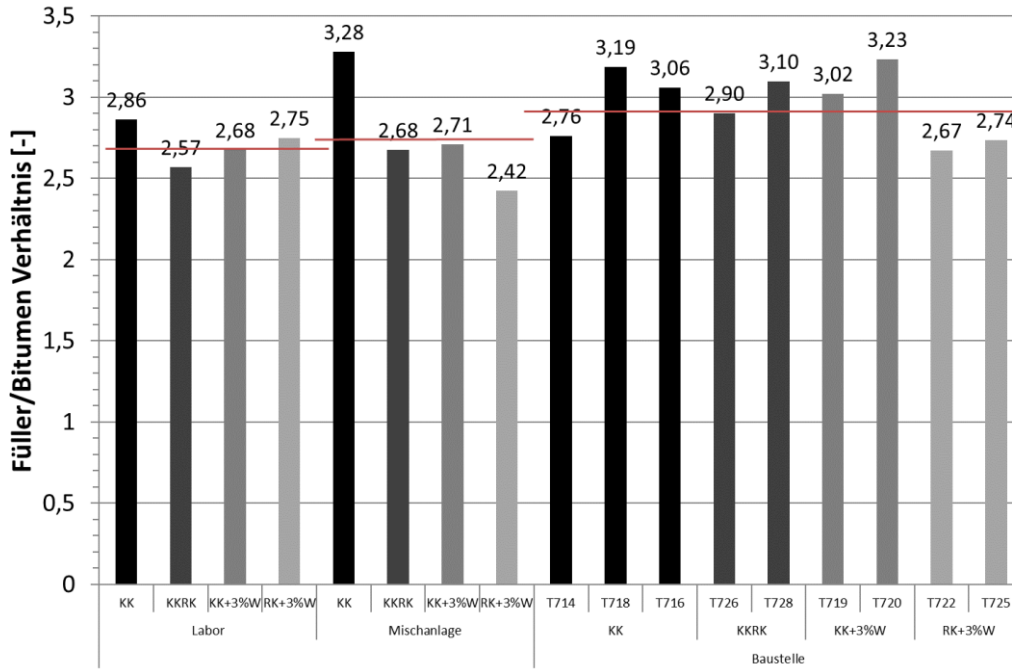


Abbildung 74: Füller/Bitumen Verhältnis

In Abbildung 75 sind die Sieblinien der analysierten Mischgüter zu sehen. Es sind die Mittelwerte aller Varianten jeder Betrachtungsebene dargestellt. Zwischen den drei Sieblinien sind kaum Unterschiede festzustellen.

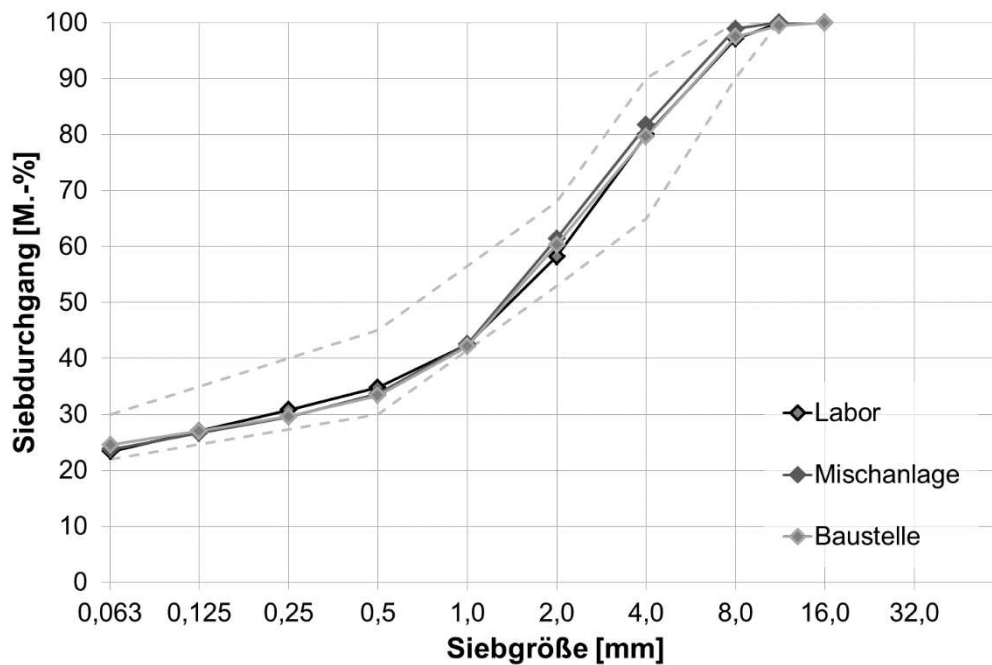


Abbildung 75: Sieblinien

## 6.4.2 Bitumenebene

### 6.4.2.1 Konventionelle Bindemittelprüfmethoden

#### Bestimmung der Nadelpenetration

In Abbildung 76 sind die Ergebnisse vom Penetrationsversuch in 0,1mm von allen rückgewonnen Bitumenproben zu sehen. Es sind alle drei Ebenen (Labor, Mischanlage und Baustelle) berücksichtigt. Jede Ebene umfasst die Varianten KK, KKRK, 3%W und RK 3%W. Zusätzlich ist auch das frische Bitumen als Referenz geprüft und dessen Ergebnis steht ganz links im Diagramm. Die Variante KK von der Laborebene konnte nicht mittels der Nadelpenetration geprüft werden, weil keine ausreichende Menge Bitumen zur Verfügung stand. Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen zeigen, dass es sich um ein hartes Bitumen handelt und dass die Betrachtungsebenen gut vergleichbar sind. Die maximalen Unterschiede zwischen den Proben im Rahmen einer Betrachtungsebene liegen bei ca. 2 [1/10mm]. Es kann trotzdem die Tendenz erkannt werden, dass die Proben mit Wachs härter sind. Im Durchschnitt sind die Werte der Baustelle etwas höher als von dem Labor und der Mischanlage.

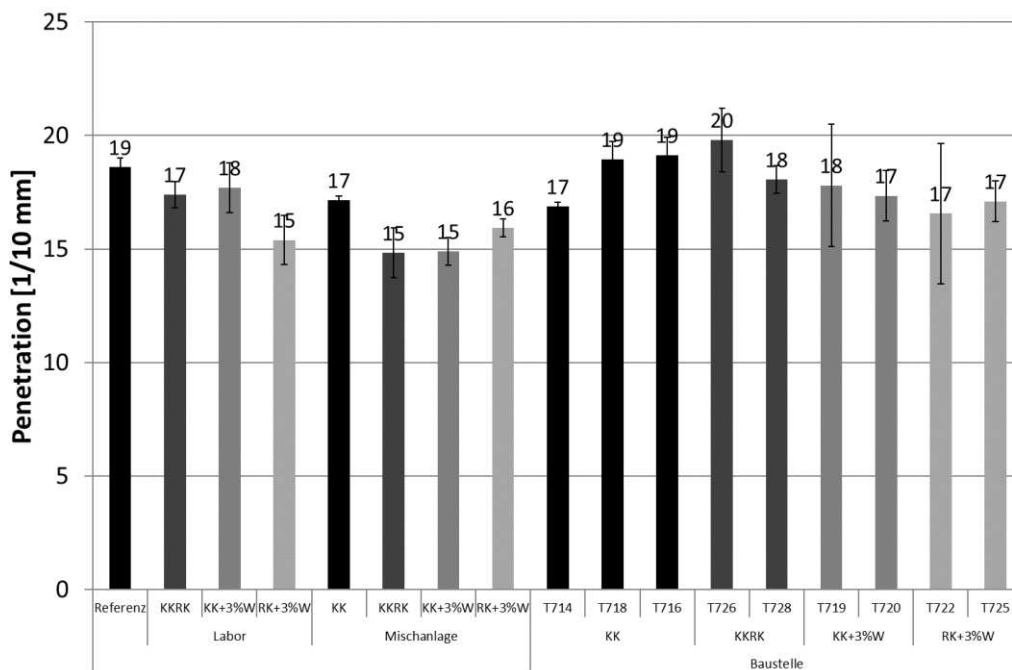


Abbildung 76: Bestimmung der Penetration [0,1mm]

#### Ring- und Kugel-Verfahren

In Abbildung 77 sind die Ergebnisse des Ring- und Kugel-Verfahrens zusammengefasst. Der niedrigste Erweichungspunkt von 82 °C liegt beim frischen Bitumen (Referenz). Wenn alle Proben verglichen werden, dann ist ein klarer Unterschied zwischen diesen mit Wachs und ohne Wachs zu sehen. Das Wachs führt zu einer Erhöhung der oberen Gebrauchsspanne [38] bei allen Betrachtungsebenen [100, 101]. Auf der Betrachtungsebene der Baustelle zeigen sowohl die Proben ohne Wachs als auch die Proben mit Wachs eine sehr gute Wiederholbarkeit. Die Ergebnisse der Proben vom Labor und von der Mischanlage streuen mehr. Diese Erkenntnis wird auch im weiteren Prüfprogramm bestätigt und bedeutet tatsächlich größere Unterschiede zwischen den Bitumeneigenschaften dieser Mischgüter.

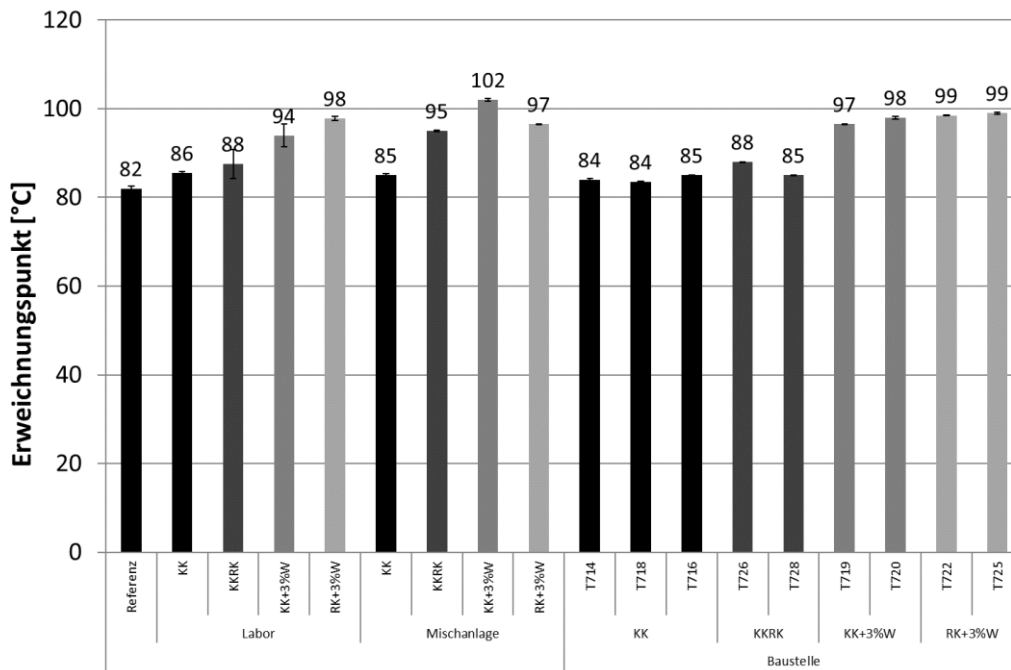


Abbildung 77: Bestimmung des Erweichungspunktes RuK [°C]

#### 6.4.2.2 Dynamischer Scherrheometer (DSR)

##### Betrachtungsebene Labor

In Abbildung 78 sind die DSR Ergebnisse vom Bitumen der im Labor hergestellten Asphaltproben dargestellt. Auf der y-Achse (links) ist der komplexe Schubmodul  $|G^*|$  [Pa] in logarithmischer Skalierung und auf der y-Achse (rechts) ist der Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  [°] dargestellt. Der komplexe Schubmodul beschreibt den Widerstand gegen Verformung des Bitumens und der Phasenwinkel die Größe des elastischen bzw. viskosen Anteils. Je größer der Phasenwinkel desto viskoser reagiert das Bitumen. In den beiden Diagrammen sind die Ergebnisse bei der Prüffrequenz 1,592 [Hz] dargestellt. Im linken Diagramm sind die Ergebnisse im unteren Temperaturbereich (-8 °C bis +40 °C) und im rechten Diagramm im höheren Temperaturbereich (+40 °C bis +82 °C) zu sehen.

Alle Bitumenproben haben eine sehr hohe Steifigkeit. Das Bitumen vom KK Mischgut hat zum Beispiel einen komplexen Schubmodul bei 52 °C und 1,592 Hz von 443 800 Pa und ein ungealtertes Destillationsbitumen 70/100 einen komplexen Schubmodul von 11 300 Pa bei derselben Temperatur und Prüffrequenz, was einen 40-fachen Unterschied ist. Da die niedrigeren Temperaturen die Proben noch steifer machen, wird im unteren Temperaturbereich der versteifende Einfluss des Wachses schwieriger zu erkennen und deswegen liegen die Ergebnisse der vier Proben (Abbildung 78 links) sehr nah aneinander. Im höheren Temperaturbereich (Abbildung 78 rechts) kann ein Unterschied zwischen den Proben mit Wachs und ohne Wachs gefunden werden, der dennoch verhältnismäßig klein ist.

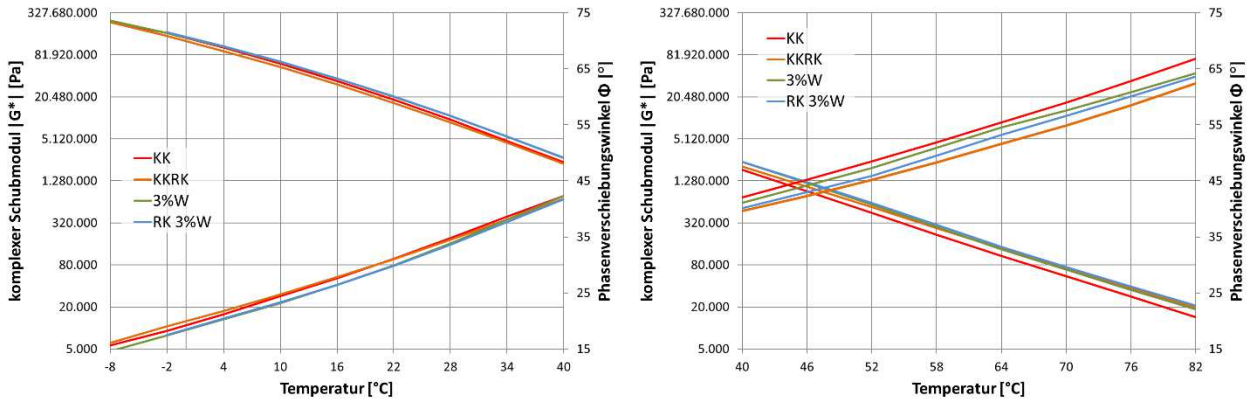


Abbildung 78: DSR Labor

In Abbildung 79 sind der komplexe Schubmodul und der Phasenverschiebungswinkel bei 4 °C (1,592 Hz) und 52 °C (1,592 Hz) dargestellt, um die Unterschiede zwischen den Varianten erkennbar zu machen. Beide Temperaturen sind so ausgewählt, dass ein Überblick im tieferen und höheren Temperaturbereich gemacht werden kann. Die Temperatur von 52 °C ist am nächsten zum Temperaturbereich für die Korrelationen im Kapitel 6.5. Im linken Diagramm liegen die komplexen Schubmoduln bei den Varianten mit Wachs (106.000 KPa und 109.000 KPa) etwas höher als die Referenz (104.000 KPa) und der komplexe Schubmodul von KKRK (93.000 KPa) bleibt darunter. Beim Phasenverschiebungswinkel haben die Varianten mit Wachs die niedrigsten Werte (20,3 und 20,4) und die Variante KKRK den höchsten (21,8). In der folgenden Reihenfolge der Mischgüter – KK, KKRK, 3%W, RK 3%W – reduziert sich der Phasenverschiebungswinkel und der komplexen Schubmoduln steigt an. Bei 52 °C (rechtes Diagramm) liegen die komplexen Schubmoduln von den Proben mit Wachs (586.000 Pa und 616.000 Pa) etwas höher als die Proben ohne Wachs (444.000 Pa und 537.000 Pa). Die niedrigsten Werte des komplexen Schubmoduls hat diesmal aber die Referenz und sie steigen in der folgenden Reihenfolge an: KKRK, 3%W und RK 3%W. Bei dem Phasenwinkel liegt der höchste Wert bei der Referenz (48,5) und der niedrigste bei KKRK (45,2). Sowohl auf dem linken als auch Im rechten Diagramm zeigen  $|G^*|$  und  $\Phi$  im Zusammenhang mit den Mischgutvarianten den gleichen Trend.

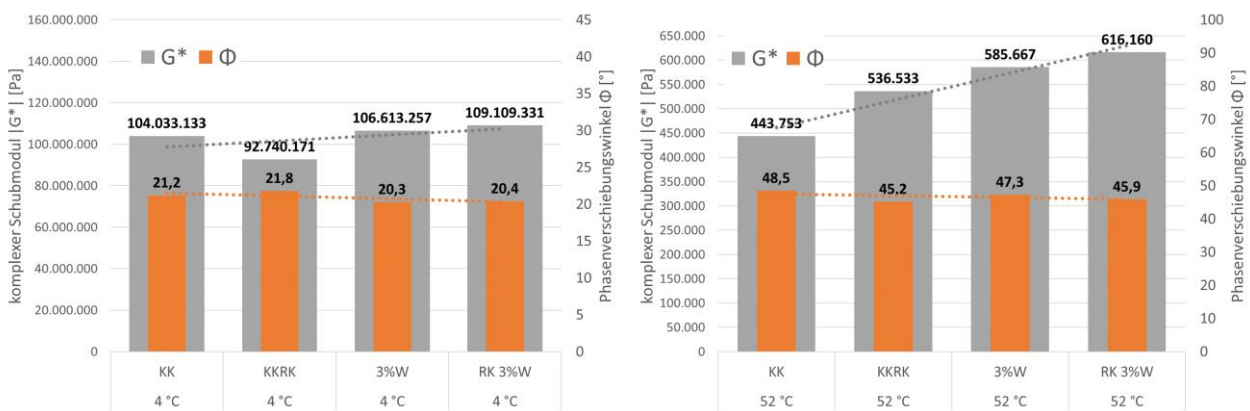


Abbildung 79: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  bei 4 °C und 1,592 Hz (links), und 52 °C und 1,592 Hz (rechts)

In Abbildung 80 werden zusätzlich frische Proben von der gleichen Bitumenmischung wie bei den hergestellten Gussasphalten ausgewertet. Mit der schwarzen Volllinie ist das frische Bitumen ohne Wachs und in der schwarzen Strichlinie das Bitumen mit Wachs eingezeichnet. Die komplexen Schubmoduln von beiden frischen Proben sind niedriger als von den extrahierten Proben und die Probe ohne Wachs liegt unter der Probe

mit Wachs. Wenn die Phasenverschiebungswinkel betrachtet werden, dann reagiert die frische Probe ohne Wachs viskoser als diese mit Wachs und beide sind viskoser als die extrahierten Proben.

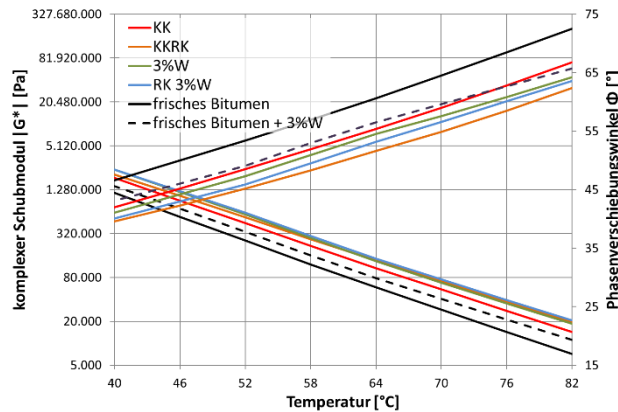


Abbildung 80: Vergleich frisches Bitumen vs. Extrahiertes Bitumen

### Betrachtungsebene Mischanlage

In Abbildung 81 ist die Auswertung der DSR Ergebnisse vom extrahierten Bitumen der aus der Mischanlage entnommenen Mischgüter. In beiden Diagrammen sind der komplexe Schubmodul und der Phasenwinkel im Temperaturbereich zwischen -8 °C und 82 °C bei einer Prüffrequenz von 1,592 Hz dargestellt. Im linken Diagramm sind die Ergebnisse im unteren Temperaturbereich (-8 °C bis +40 °C) und im rechten Diagramm im oberen Temperaturbereich (+40 °C bis +82 °C) dargestellt. In beiden Diagrammen sind zur Orientierung auch die Werte der KK vom Labor hinzugefügt. Im Vergleich zu den Ergebnissen vom Labor unterscheiden sich hier die Werte stärker voneinander.

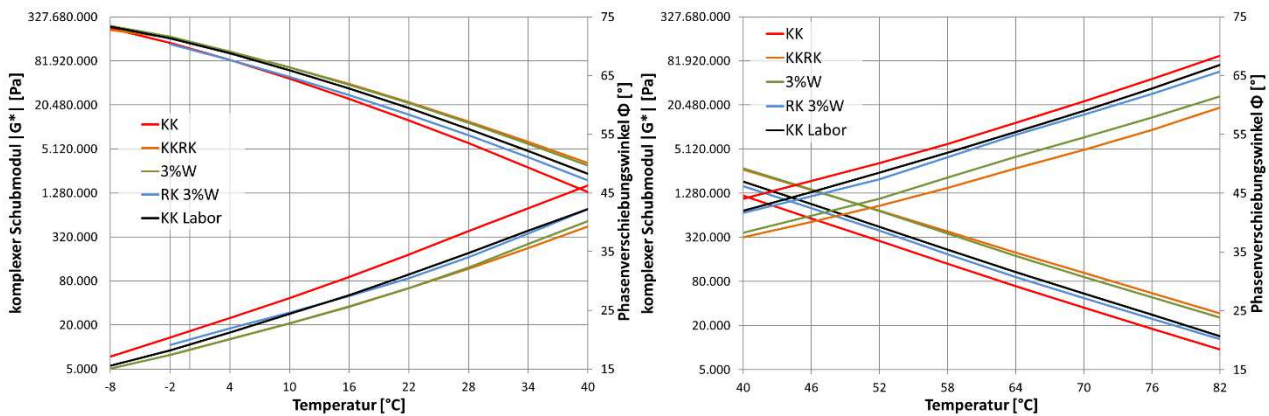


Abbildung 81: DSR Mischanlage

Um die Unterschiede zwischen den Varianten leichter zu erkennen, sind in Abbildung 82 die komplexen Schubmoduln und die Phasenverschiebungswinkel bei 4°C (1,592 Hz) und 52 °C (1,592 Hz) dargestellt. Sowohl bei 4 °C als auch bei 52 °C haben die Varianten KK und RK 3%W niedrigere komplexe Schubmoduln und höhere Phasenverschiebungswinkel als KKRK und 3%W. Einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Proben mit Wachs und ohne Wachs sieht man nicht. Es wurden trotzdem wesentliche Unterschiede gemessen. Obwohl auf dem ersten Blick eine Erklärung zu den DSR Ergebnissen nicht klar erkennbar ist, sieht man später in den Korrelationen zwischen den Prüfmethode DSR und UCCT in Kapitel 6.5 dass es einen guten Zusammenhang zwischen Bitumen und Asphaltresultate gibt.



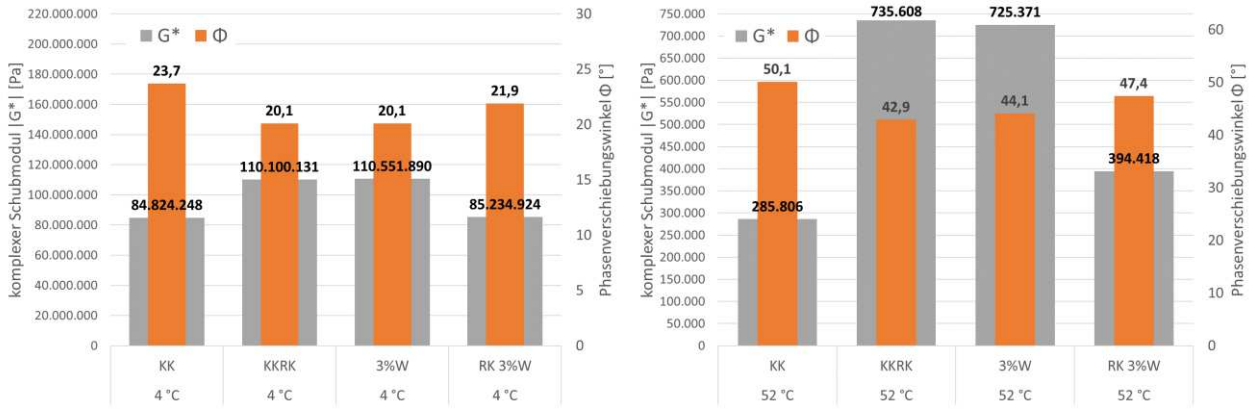


Abbildung 82: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  bei 4 °C und 1,592 Hz (links), und 52 °C und 1,592 Hz (rechts)

### Betrachtungsebene Baustelle/Probestrecke

In Abbildung 83 ist die Auswertung der DSR Ergebnisse von den extrahierten Bitumenproben aus den von der Baustelle entnommenen Mischgütern zu sehen. Analog zu den anderen zwei Betrachtungsebenen sind in beiden Diagrammen der komplexe Schubmodul und der Phasenwinkel im Temperaturbereich zwischen -8 °C und 82 °C bei einer Prüffrequenz von 1,592 Hz dargestellt. Im Gegensatz zu den Labor- und Mischanlagenproben gibt es bei den Baustellenproben einen klaren Unterschied zwischen Bitumen mit Wachs und ohne Wachs. Beim Vergleich der komplexen Schubmoduln aller Proben bestätigt sich, wie auch bei den vorher beschriebenen Versuchen, dass jene Proben, die einen Wachsanteil im Bindemittel aufweisen insgesamt härter sind als jene Proben, die kein Wachs enthalten [100, 101].

Für die durchgeführten Versuche wurden Proben verwendet, die sich hinsichtlich Mischgutes, Temperatur und Verweildauer im Kocher unterscheiden. In Bezug auf die gewonnenen Ergebnisse haben die unterschiedliche Temperatur und Verweildauer im mobilen Kocher keinen Einfluss auf die Bitumeneigenschaften.

Die Gegenüberstellung der einzelnen Phasenwinkel für die betrachtete Prüffrequenz sowie den betrachteten Temperaturbereich zeigt auf, dass Bindemittel mit einem Wachsanteil elastischer reagieren als Bindemittel, die nicht mit Wachs modifiziert wurden.

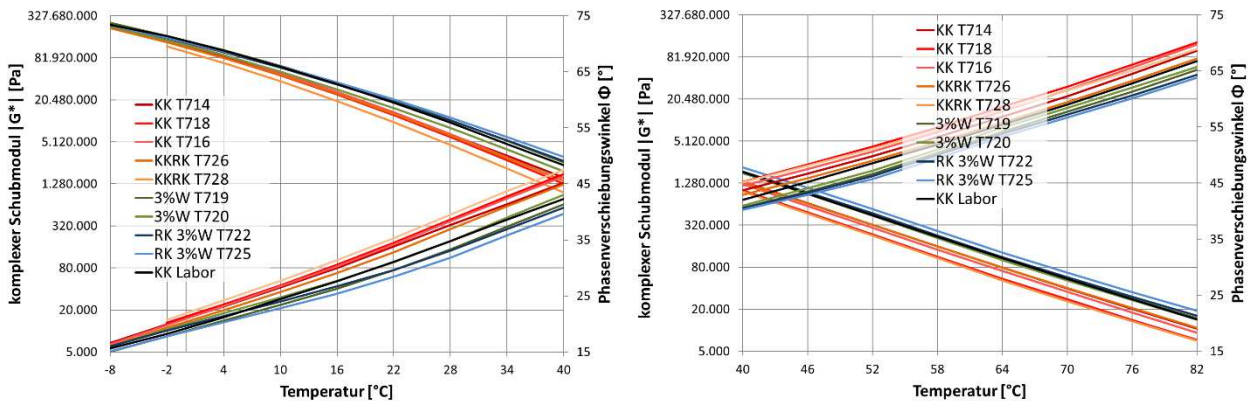


Abbildung 83: DSR Baustelle

In Abbildung 84 sind die komplexen Schubmodul und die Phasenverschiebungswinkel bei 4 °C (1,592 Hz) und 52 °C (1,592 Hz) dargestellt. Hier wird noch einmal deutlich, dass sich die Proben mit Wachs von diesen ohne Wachs klar unterscheiden. In Abbildung 84 sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen für alle Varianten dargestellt.

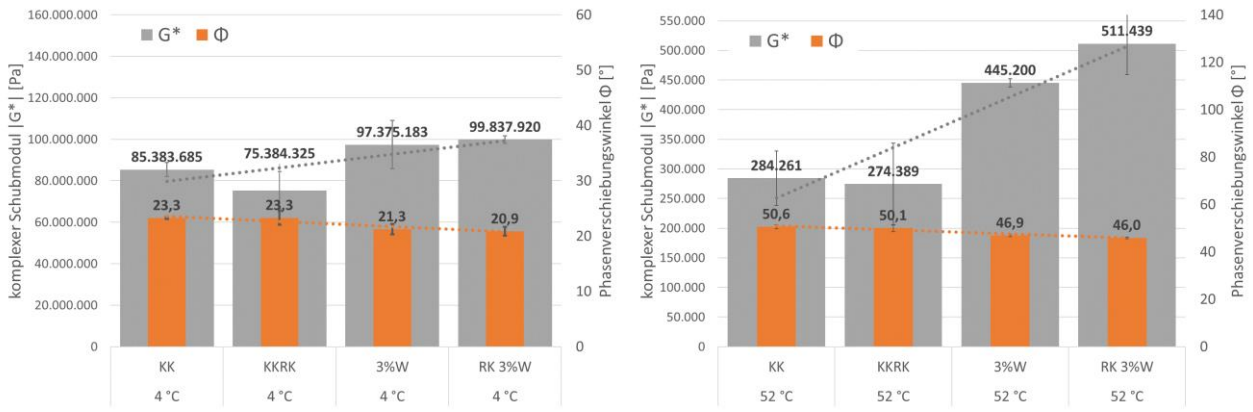


Abbildung 84: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  bei 4 °C und 1,592 Hz (links), und 52 °C und 1,592 Hz (rechts)

### 6.4.3 Mischgutebene

#### 6.4.3.1 TSRST

##### Betrachtungsebene Labor

In Abbildung 85 sind die Ergebnisse der Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen dargestellt. Die Bruchtemperatur liegt bei allen Mischgütern zwischen -25°C und -28°C. Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mischgütern zu beobachten. Um einen Überblick zu bekommen, ob diese Ergebnisse befriedigend sind, ist zu erwähnen, dass die Anforderungen für die Bruchtemperatur einer Deckschicht laut ÖNORM B3580-2 (Asphaltbeton) zwischen -30°C und -25°C liegen. Alle geprüften Mischgüter erfüllen die Anforderung  $TSRST_{max-25}$  und das beim Einsatz von einem harten Oxidationsbitumen (90/10) und Wachs. Als Schlussfolgerung kann man zusammenfassen, dass sowohl das Referenzmischgut als auch die modifizierten Mischgüter eine sehr gute Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse aufweisen.

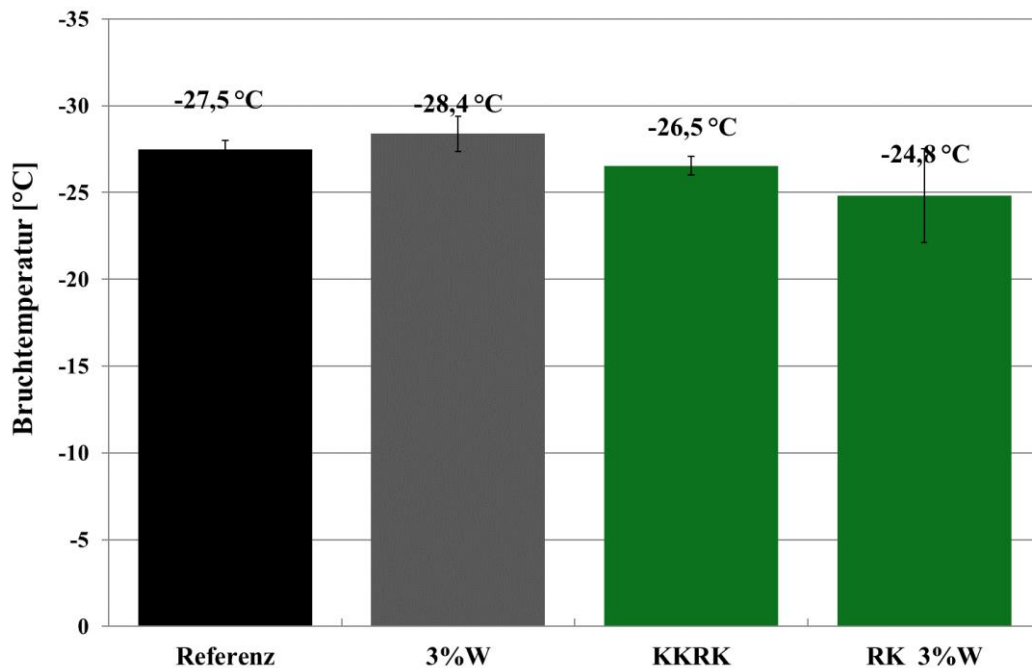


Abbildung 85: Ergebnisse – TSRST; MA 8 Labor

### Betrachtungsebene Mischanlage

In Abbildung 86 sind die Ergebnisse der Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen dargestellt. In diesem Fall gibt es größere Streuungen zwischen den Ergebnissen als im Labor. Die Referenz und KKRK liegen auf dem gleichen Niveau wie im Labor und 3%W mit 4 °C darüber. In Abbildung 86 sind Bruchtemperaturen an zwei gleichen Mischgütern (RK 3%W) mit unterschiedlichem Entnahmedatum zu sehen. Es wurden zwei Mischungen notwendig, um die Rezeptur an der Mischanlage anzupassen, weil die runde Gesteinskörnung zum ersten Mal dort eingesetzt wurde. Die Ergebnisse zeigen, wie entscheidend war es, die Umsetzung von neuen Rezepturen an der Mischanlage zu begleiten. Der erste Versuch führt zu einer Bruchtemperatur von -21,9 °C und der zweite zu -27,7 °C. Dieser Unterschied spiegelt sich in den Ergebnissen des UCCT wider.

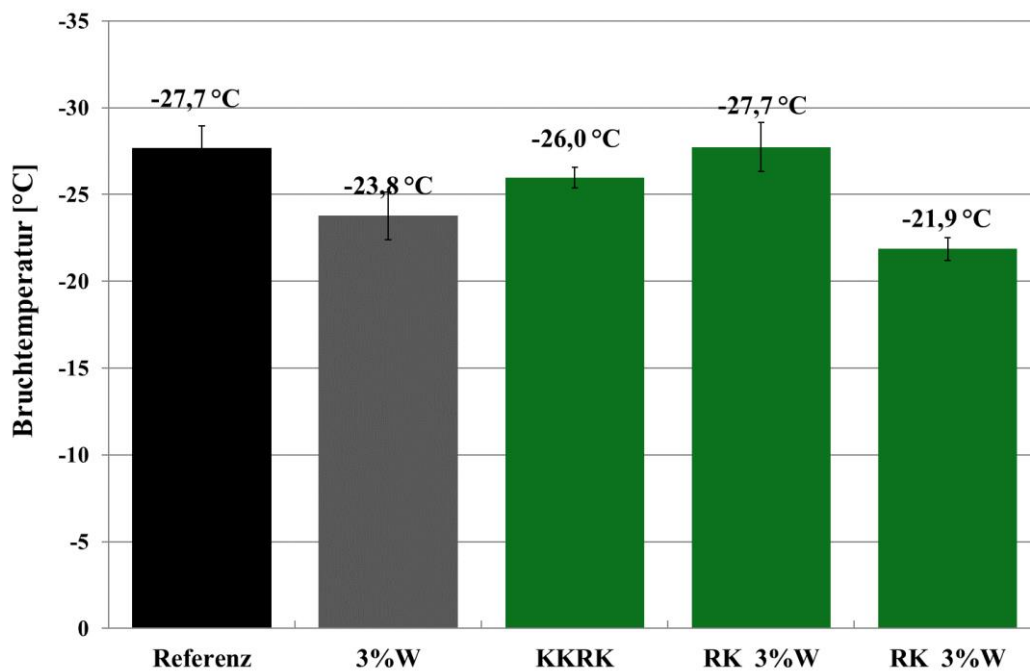


Abbildung 86: Ergebnisse – TSRST; MA 8 Mischanlage

### Betrachtungsebene Probestrecke

In Abbildung 87 sind die Ergebnisse der Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen dargestellt. Die Bruchtemperaturen außer von 3%W liegen zwischen -26°C und -27°C und unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Die Optimierungsvariante 3%W weist die niedrigste Rissbeständigkeit auf. Die Variante 3%W schneidet schlechter als RK 3%W aus, weil bei 3%W die Kombination von Wachszugabe, höherem Füllergehalt (Abbildung 73) und höherer Einbautemperatur negative Effekte auf das Tieftemperaturverhalten hat. Von dem Vergleich der beiden Diagramme in Abbildung 85 und Abbildung 87 ist eine sehr gute Vergleichbarkeit zwischen Labor und Baustelle zu erkennen.

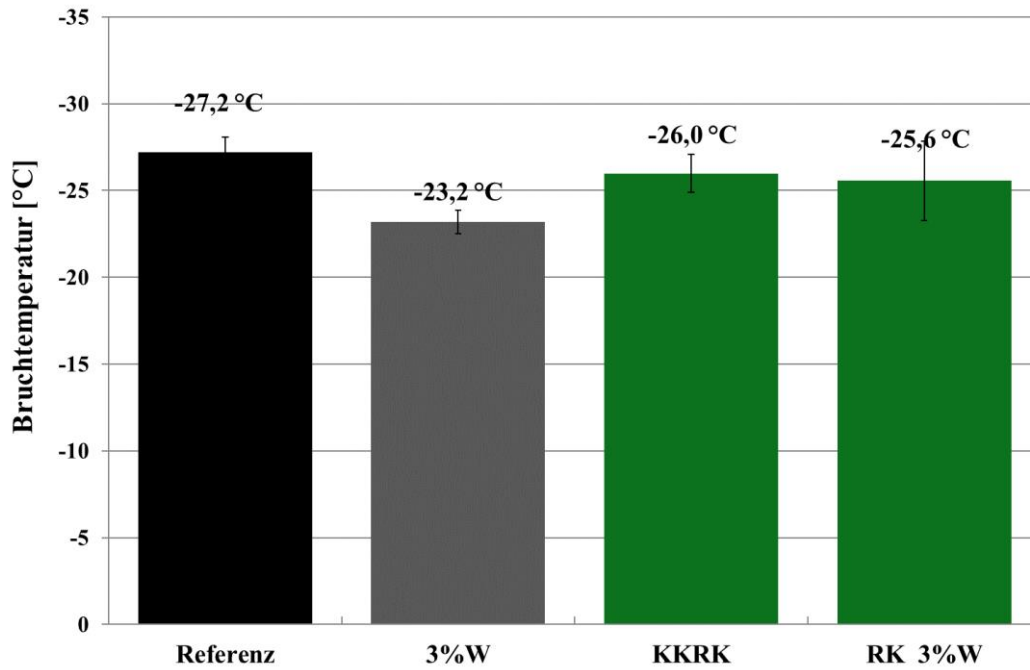


Abbildung 87: Ergebnisse – TSRST; MA 8 Baustelle

### 6.4.3.2 UCCT

#### Betrachtungsebene Labor

In Abbildung 88 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen [95] dargestellt. Es sind die bleibenden, axialen Verformungen nach 3.600 Lastwechsel in % aufgetragen. Das Referenzmischgut weist eine Verformung von -9% auf. Dieser Wert wird als Benchmark aufgenommen. Die modifizierten Varianten liegen auf gleichem Niveau oder schneiden besser ab. Bei der Variante 3%W wird die kleinste Verformung erreicht. In diesem Kapitel wurde noch die Variante KKRK 2%W zusätzlich geprüft, die eine ähnliche Verformung wie die Referenz hat.

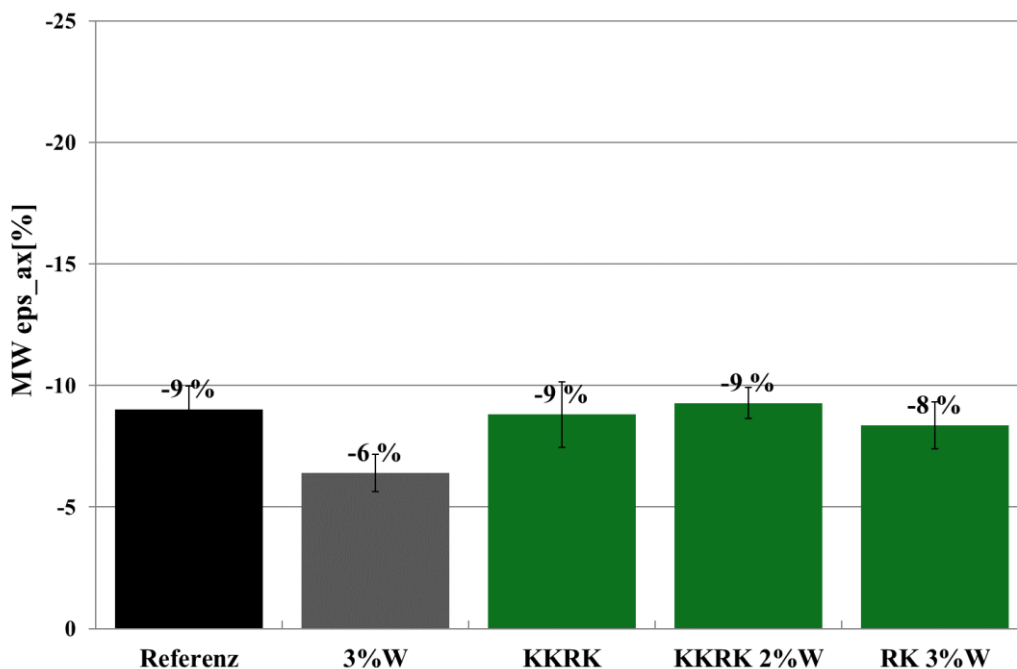


Abbildung 88: Ergebnisse – UCCT; MA 8 Labor

### Betrachtungsebene Mischanlage

In Abbildung 89 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT) der Proben aus dem Labor (links) und aus der Mischanlage (rechts) dargestellt. Im rechten Diagramm sind die Prüfergebnisse von der Referenz und vier modifizierten Varianten zu sehen. Ähnlich wie in Abbildung 81 und Abbildung 82 kann eine beachtliche Streuung der Prüfergebnisse festgestellt werden. Von der Variante RK 3%W wurden Proben von zwei unterschiedlichen Mischungen entnommen. Die Referenz weist eine Verformung von -11% und die erste (linke) Mischung RK 3%W liegt auch auf dem gleichen Niveau. Alle anderen Varianten haben viel kleinere Verformungen zwischen -3% und -5%. Grund dafür ist das harte Bindemittel (Kapitel 6.4.2). Sehr ähnliche Unterschiede wie bei den Bruchtemperaturen sind auch hier bei den bleibenden Verformungen zu erkennen.

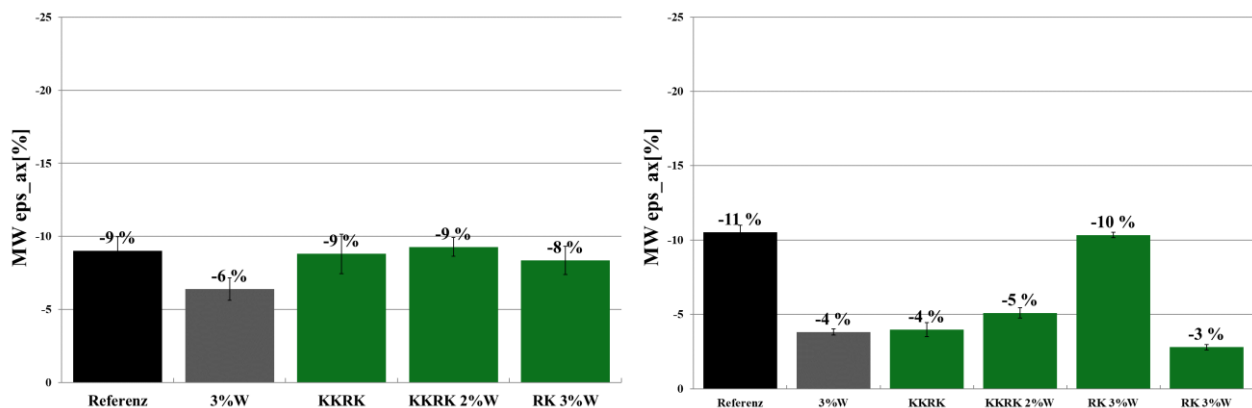


Abbildung 89: Ergebnisse – UCCT; Vergleich MA 8 Labor - Mischanlage

### Betrachtungsebene Probestrecke

In Abbildung 89 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen (UCCT) der Proben von der Baustelle dargestellt. Es wurden zwei Proben pro Mischgut entnommen. Beide Proben unterscheiden sich nach Verweildauer im mobilen Kocher. Es sind praktisch keine Unterschiede zwischen den Proben pro Mischgut zu sehen und somit konnte kein Einfluss der Verweildauer im Kocher auf die Mischguteigenschaften festgestellt werden. Die Beständigkeit gegen Verformung von KKRK und RK 3%W liegt auf dem gleichen Niveau wie die Referenz und die modifizierte Variante 3%W führt zu den niedrigsten bleibenden Verformungen.

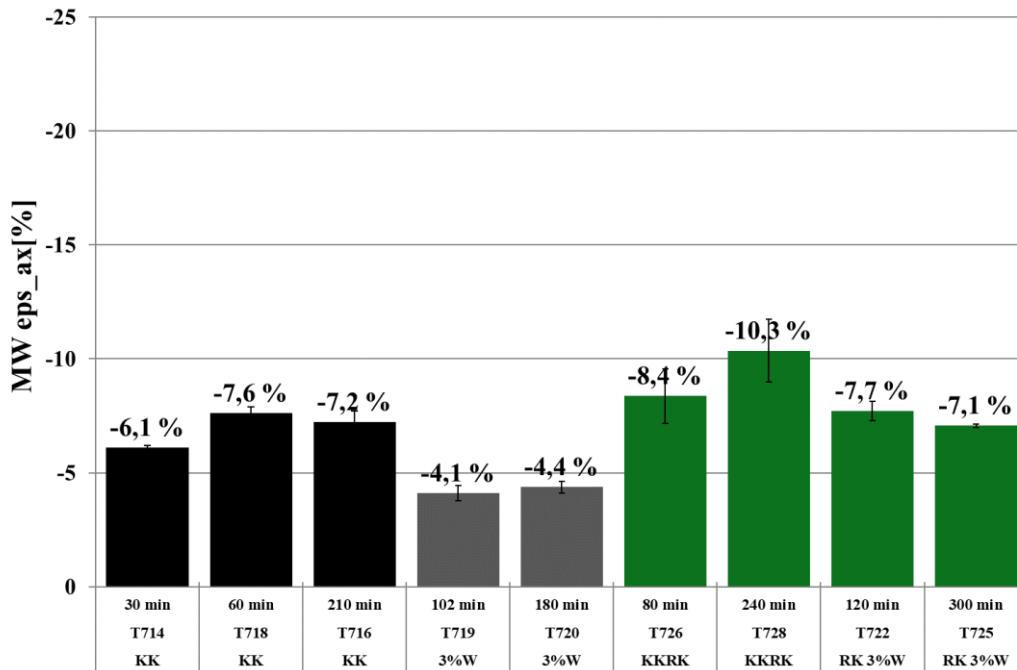


Abbildung 90: Ergebnisse – UCCT; MA 8 Baustelle

In Abbildung 91 sind die Ergebnisse vom Labor (links) und der Baustelle (rechts) zu finden. Im rechten Diagramm sind jeweils die Mittelwerte pro Mischgut aufgezeichnet. Wenn die Ergebnisse vom Labor und von der Probestrecke verglichen werden, dann ist eine sehr gute Vergleichbarkeit festzustellen. Die Probestrecke liegt etwas günstiger. Allen Mischgütern kann eine gute Verformungsbeständigkeit zugeschrieben werden.

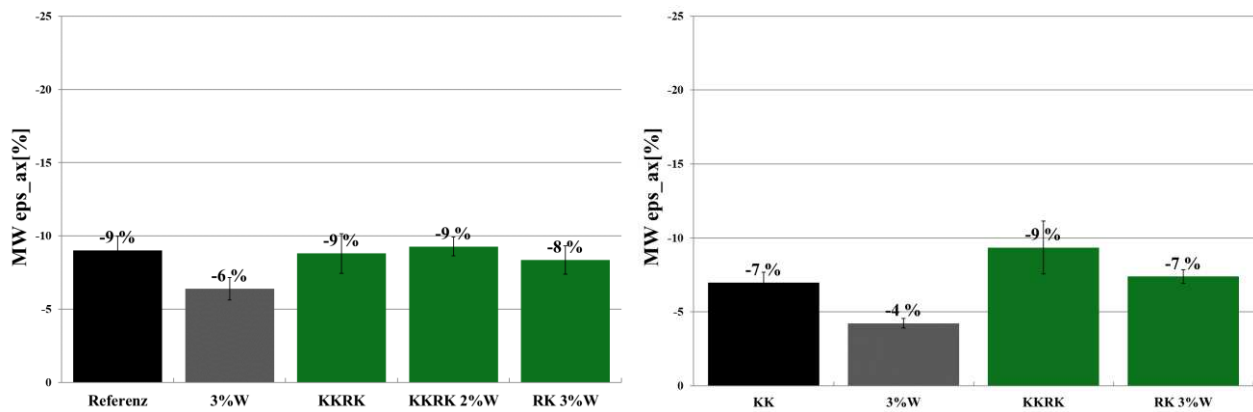


Abbildung 91: Ergebnisse – UCCT; MA 8 Vergleich Labor - Baustelle

### 6.5 Korrelation DSR – UCCT

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen den Bitumen- und Asphaltkennwerten der Varianten KK und 3%W untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse aus der DSR- und UCCT-Prüfmethode verwendet. Die Asphaltprüfungen sind aufwendiger als die Bitumenprüfungen und eine gute Korrelation zwischen DSR und UCCT hätte den Vorteil, bleibende axiale Verformungen auf Mischgutebene vorherzusagen.

In Tabelle 46 sind die Korrekturfaktoren für die Betrachtungsebenen Mischanlage und Baustelle aufgelistet. Als Korrekturfaktor  $k$  ist die Differenz des Füller/Bitumen Verhältnis  $c$  zwischen den Betrachtungsebenen (Mischanlage und Baustelle) und der Betrachtungsebene Labor in % festgelegt. Es wurde mit dem

Mittelwert des Füller/Bitumen Verhältnis innerhalb einer Betrachtungsebene gearbeitet, um so den Einfluss von eventuellen Ausreißern zu minimieren. Für jede Betrachtungsebene wurde zuerst getrennt der Zusammenhang zwischen Asphalt- und Bitumenebene analysiert. Es wurden für jede Betrachtungsebene linearen Regressionen erstellt und dann mit den Korrekturfaktoren aus Tabelle 46 gewichtet. Nur so konnten die Unterschiede in Abbildung 74 berücksichtigt werden. Als nächster Schritt wurden dann die gewichteten Ergebnisse der Asphalteneben verwendet (Abbildung 92).

Tabelle 46: Korrekturfaktoren  $k$  für die verschiedenen Betrachtungsebenen

Betrachtungsebene	Füller/Bitumen Verhältnis $c$	Korrekturfaktor $k$ in [%]
Labor	2,452	0
Mischanlage	2,521	2,813
Baustelle	2,703	10,233

Mittels Formel (8) wurde der Korrekturfaktor  $k$  berechnet:

$$k(\text{Baustelle}) = |c(\text{Baustelle}) - c(\text{Labor})| * 100 \quad (8)$$

Je größer der Wert des Füller/Bitumen Verhältnis, desto härter ist das Mischgut und desto niedriger die bleibenden Verformungen (UCCT). Zuerst wurden die Daten innerhalb der verschiedenen Betrachtungsebene gewichtet und dann in den Diagrammen in Abbildung 92 zusammengefasst. In Abbildung 92 sind die Korrelationen  $\text{eps\_ax}$  vs.  $G^*$ ,  $\text{eps\_ax}$  vs.  $G'$ ,  $\text{eps\_ax}$  vs.  $G''$  und  $\text{eps\_ax}$  vs.  $\Phi$  dargestellt. Es wurden die Werte von den Mischgutvarianten Referenz, KK und 3%W verwendet, weil sie sich in der Kornform und in der Sieblinie nicht unterscheiden. Im Diagramm (links) sind die Werte ohne Korrekturfaktor von dem Bitumen/Füller Verhältnis und im rechten Diagramm mit dem Korrekturfaktor dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Einführung vom Korrekturfaktor bei allen Varianten zu einer besseren Korrelation führt. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen von  $|G^*|$ ,  $G''$ ,  $G'$  und  $\Phi$  mit  $\text{eps\_ax}$  (gewichtet) sind jeweils 0,663, 0,664, 0,658 und 0,870. Die Korrelation von  $\text{eps\_ax}$  (gewichtet) und  $\Phi$  hat das höchste Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,870$  und es kann aus diesem Grund die Schlussfolgerung gezogen werden, dass  $\text{eps\_ax}$  und  $\Phi$  gut korrelieren. Das heißt, dass wenn die Gussasphaltrezepturen sich nur in ihrer Bindemittelhärte unterscheiden, dann kann die bleibende axiale Verformung auf Mischgutebene mittels DSR mit einer guten Genauigkeit vorhergesagt werden.

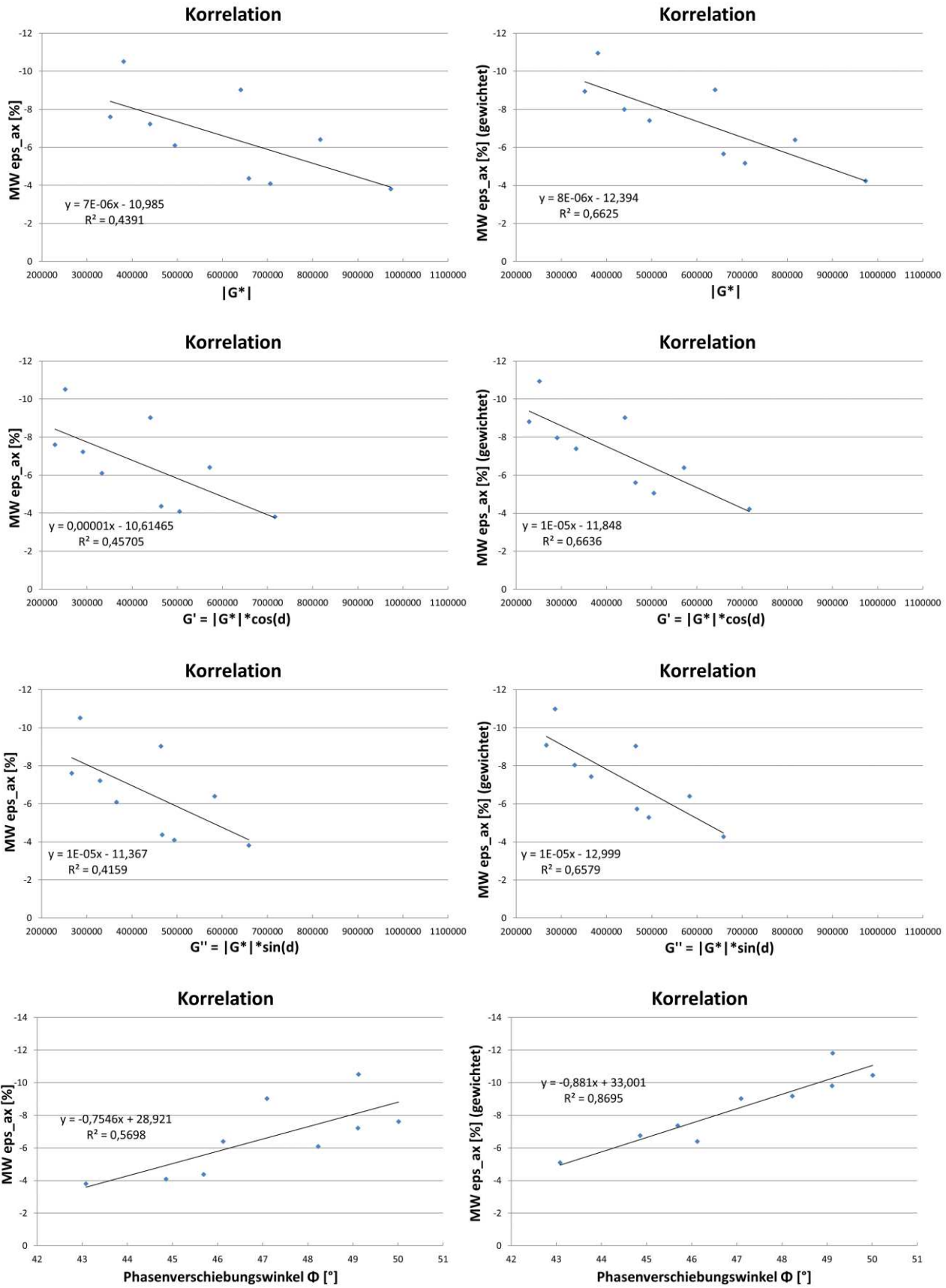


Abbildung 92: Korrelation



## 6.6 Zustandserfassung der Probestrecke

### Verkehrszählung

Wichtig für die Auswertung der Zustandserfassungen ist die tatsächliche Verkehrsbelastung. Am 23.05.2016 wurde eine Verkehrszählung nach RVS 02.01.12 [102] für Oberdorfstraße durchgeführt. Sie wurde in 3 Bereiche zu je 2 Stunden unterteilt:

- Morgenbereich: von 08:00 bis 10:00 (2 St.)
- Mittagsbereich: von 11:00 bis 13:00 (2 St.)
- Abendbereich: von 16:00 bis 18:00 (2 St.)

In Abbildung 93 sind die Daten der Verkehrszählung nach Mischgutvarianten eingetragen. Im linken Diagramm ist die Verkehrszählung für Personenkraftwagen (PKW) und Lieferwagen (Lfw) und im rechten Diagramm für Lastkraftwagen (LKW) und Bus. Im linken Diagramm haben der Morgen- und Mittagsbereich sehr ähnliche Verkehrsstärken. Im Abendbereich sind die Verkehrsstärken besonders bei den Abschnitten KK und KKRK höher. Wenn das rechte Diagramm betrachtet wird, dann sind kaum signifikante Unterschiede im Tagesverlauf festzustellen. In allen Tagesabschnitten werden aber KK und KKRK stärker als 3%W und RK 3%W befahren.

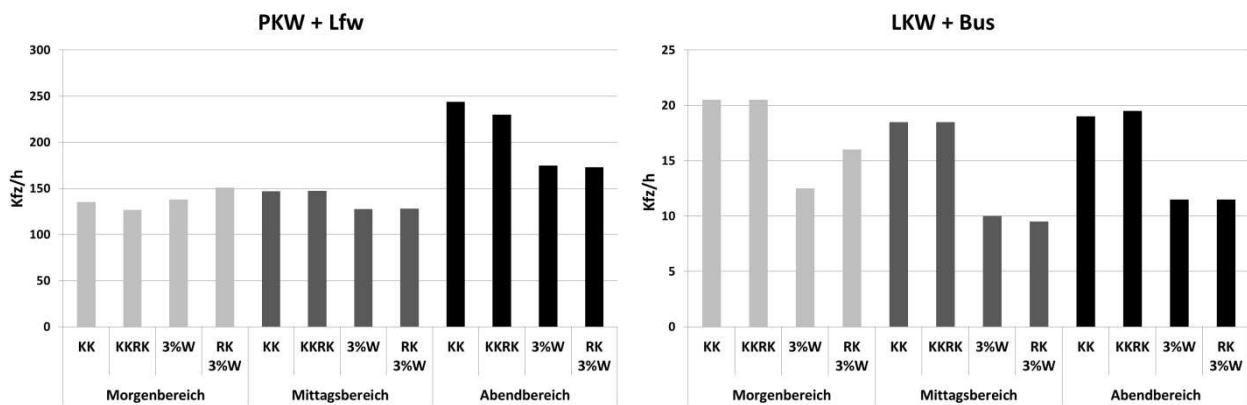


Abbildung 93: Verkehrszählung

### Querebenheit

Um die Entwicklung der Ebenheit und in weiterer Folge die Spurrinnenbildung zu verfolgen, wurden Querebenheitsmessungen mit dem Planum im November 2016 (Nullmessung) und November 2017 durchgeführt. Durch das Planum wird der gesamte Verlauf der Unebenheit relativ zu dem 4m langen Messbalken aufgezeichnet (Abbildung 94).



Abbildung 94: Querebenheitsmessung mit dem Planum

Abbildung 95 zeigt den Übersichtsplan und die Rastereinteilung für die Messungen mit dem Planum. Dabei erfolgten jeweils 4 Querebenheitsaufnahmen auf den Probefeldern RK 3%W und KKRK und jeweils 5 Querebenheitsaufnahmen auf den Probefeldern 3% Wachs und Referenz.

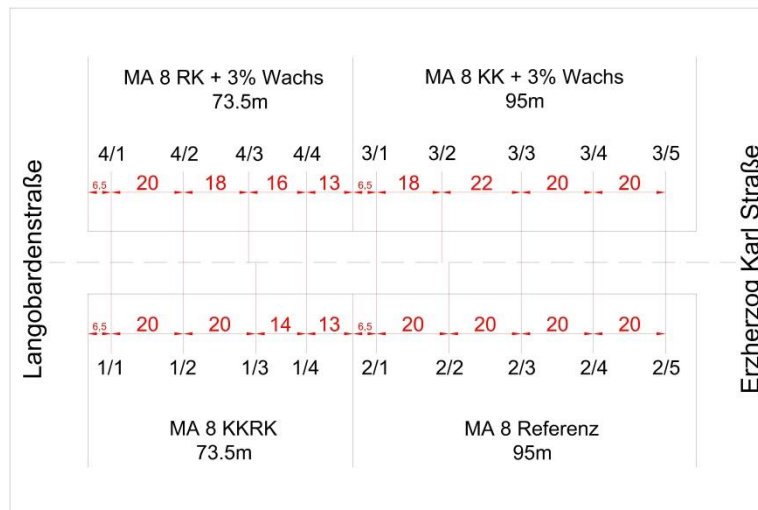


Abbildung 95: Übersichtsplan der Messungen mit dem Planum

In Abbildung 96 sind die kennzeichnenden Größen für die Querebenheit der Fahrbahn dargestellt. Diese sind die Spurrinntiefe  $S$ , die Profiltiefe  $P$  sowie die theoretische Wasserfilmdicke  $W$  für die jeweils linke und rechte Radspur eines Fahrstreifens.

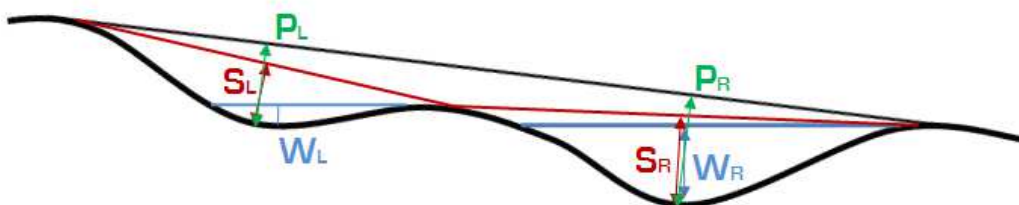


Abbildung 96: Definition der Querebenheitswerte

In Tabelle 47 sind die Spurrinntiefen  $S$  (in RVS 13.01.15 [103] als „ts“ bezeichnet) beider Messungen für alle Probefelder aufgelistet.

Tabelle 47: Ergebnisse der Messungen mit dem Planum im November 2016 und 2017

Profil	November 2016 (Null)		November 2017		Differenz	
	SL	SR	SL	SR	SL	SR
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1/1	0	0	0	0	0	0
1/2	0	3	0	3,5	0	0,5
1/3	0	0	0	0,5	0	0,5
1/4	0	0	0	0	0	0
2/1	0	4	0	4	0	0
2/2	0	0	0	3,5	0	3,5
2/3	0	2	0	2	0	0
2/4	0	0	0	1	0	1
2/5	0	2	1,5	3,5	1,5	1,5
3/1	0	0	0	0	0	0
3/2	0	2	0	2	0	0
3/3	0	4	0	4	0	0
3/4	0	3	0	3	0	0
3/5	0	0	0	0	0	0
4/1	2,5	0	2,5	0	0	0
4/2	0	3	0	3	0	0
4/3	0	1	0	1	0	0
4/4	0	3	0	3	0	0

Zieht man den Bewertungshintergrund der RVS 13.01.15 [103] „Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung“ heran, ergibt sich für alle Bereiche der Probestrecke nach 1-jähriger Beanspruchung im Hinblick auf die Querebenheit die Zustandsnote „sehr gut“ ( $t_s < 5$  mm).

#### Griffigkeitsmessungen mit dem GripTester

Zur Beurteilung der Griffigkeit wurden im November 2016 (Nullmessung) und November 2017 mit dem GripTester MK II (Abbildung 97) an der Probestrecke Griffigkeitsmessungen in Anlehnung an RVS 11.06.71:2009 [104] durchgeführt. Die Ermittlung des Reibungsbeiwertes  $\mu_{GT}$  beruht dabei auf dem Prinzip des konstant gebremsten Rades (15% Schlupf) auf einer mit Wasser benetzten Oberfläche. Im Zuge der Messungen mit dem GripTester wurden die Reibungsbeiwerte  $\mu_{GT}$  im Schiebetrieb ermittelt.



Abbildung 97: GripTester MK II (Labor TU Wien)

Die Witterungsbedingungen an beiden Messtagen entsprachen den in der RVS 11.06.71:2009 [104] standardisierten Messbedingungen, siehe Tabelle 48.

Tabelle 48: Messbedingungen - Übersicht

Charakteristik	Messbedingungen 16.11.2016	Messbedingungen 16.11.2017	Messbedingungen SOLL
Lufttemperatur	ca. 5-10 °C	ca. 5-10 °C	5 bis 40 °C
Fahrbahntemperatur	ca. 5-10°C	ca. 5-10°C	5 bis 40 °C
Wassertemperatur	ca. 5-10 °C	ca. 5-10 °C	5 bis 25 °C
Fahrbahnzustand	trocken	trocken	trocken, nicht verschmutzt
Wetter	kein Regen	kein Regen	kein Regen

Die Griffigkeitsmessungen wurden mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 km/h und einer theoretisch rechnerischen Wasserfilmdicke von 0,5 mm gefahren. Um eine detaillierte Erfassung der Griffigkeitsverhältnisse zu ermöglichen, wurde ein Aufzeichnungsintervall in 1 m Abschnitten gewählt. Für die Messungen wurde der Messreifen mit der Seriennummer A69-150405 eingesetzt.

Auf jedem Probefeld wurde eine Messfahrt durchgeführt. In Abbildung 98 sind die Messergebnisse dargestellt. Sowohl bei der Nullmessung in 2017 als auch ein Jahr danach sind keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Probefeldern zu sehen.

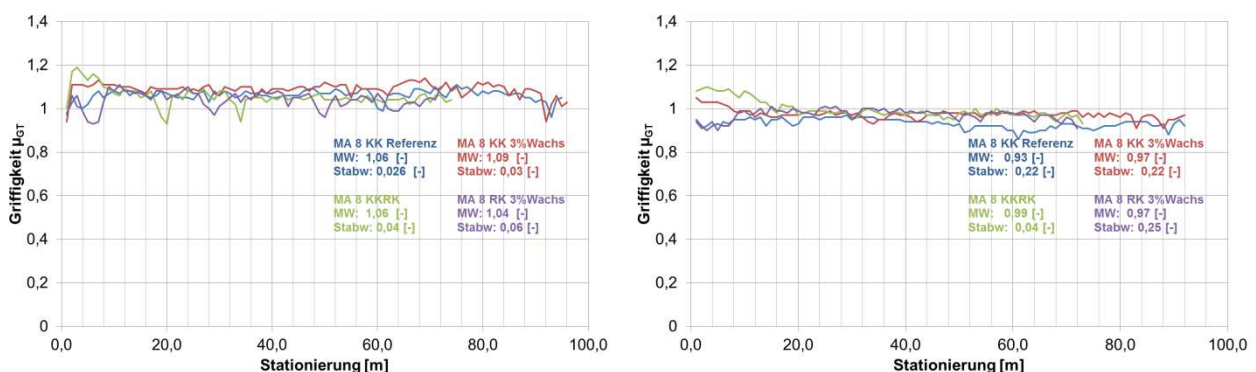


Abbildung 98: Messergebnisse Grip Tester 2016 (links) und 2017 (rechts)

In Abbildung 99 ist der Vergleich zwischen den 2016 und 2017 Messergebnissen dargestellt. Im linken Diagramm sind die Mittelwerte von allen vier Probefeldern für 2016 und 2017 über die Länge und im rechten Diagramm ist der Mittelwert aller Messergebnisse für 2016 und 2017 dargestellt. Es wurde eine Absenkung der Griffigkeit von 9% nach einem Jahr festgestellt.

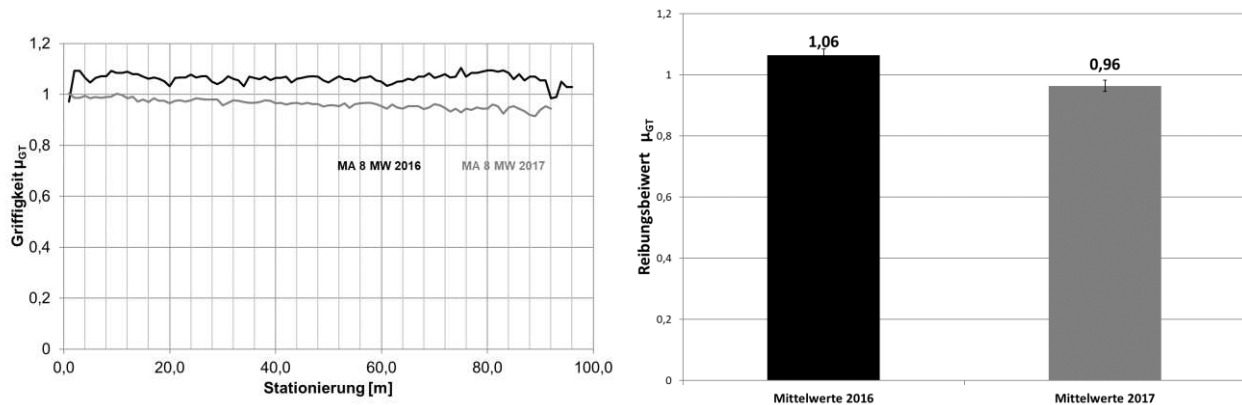


Abbildung 99: Vergleich zwischen den 2016 und 2017 Messergebnissen

Das Phänomen, dass die Messwerte der Nullmessung größer als 1,0 sind, ist ein messtechnisches Phänomen. Die Ermittlung des Reibungsbeiwertes  $\mu_{GT}$  beruht dabei auf dem Prinzip des konstant gebremsten Rades (15% Schlupf) auf einer mit Wasser benetzten Oberfläche und wird aus dem Quotienten der Horizontalkraft (die Widerstandskraft zum 15%-en Schlupf) und der Vertikalkraft (Radauflast) berechnet. Wegen der sehr hohen Griffigkeit und dem viskoelastischen Charakter des Rades wird das Rad in Zusammenwirken mit der viskoelastischen Asphaltoberfläche zusätzlich gebremst und höhere Reibungsbeiwerte als 1,0 gemessen.

Es wurden drei visuelle Zustandserfassungen (am 16.11.2016, 12.04.2017, 07.12.2017 und 16.04.2018) durchgeführt. Bei der ersten Zustandserfassung wurden keine Oberflächenschäden oder Risse festgestellt, bei den restlichen ein Querriss in der Fuge zwischen den Probefeldern im Bereich Feitsingerstraße.

Zusammenfassend wurden Querebenheit-, Griffigkeitsmessungen und visuelle Zustandserfassung an der Probestrecke „Oberdorfstraße“ durchgeführt. Es wurden keine Änderungen oder Oberflächenschäden festgestellt. Es ist zu empfehlen, weitere Zustandserfassungen über mehrere Jahre durchzuführen, um ein vollständiges Bild während der Lebensdauer von der Fahrbahn zu bekommen.

## 6.7 Emissionsanalyse [105]

Im Rahmen der Emissionsanalyse wurden zwei Laborstudien und eine Feldstudie durchgeführt. Die Emissionsanalyse wurde vom Institut für Materialchemie durchgeführt und ist in diesem Kapitel zusammengefasst.

### Laborstudie 1

Das Ziel der ersten Laborstudie war der Nachweis, positiv oder negativ, des Wachses (Additiv im Gussasphalt) in der partikulären Asphaltmission.

Der experimentelle Aufbau bestand im Wesentlichen aus einer Heizplatte, einem Rührer, einem Temperaturfühler und einem LAAPTOF-MS (Laser Ablation of Aerosol Particles Time Of Flight - Mass Spectrometer). Es wurden folgende Proben analysiert:

- konventionelles Bitumen, bestehend aus einer Mischung von 82 M% 90/10 und 18 M% 70/100 Bitumen
- dieselbe Bitumenmischung mit 3 M% Wachs als Additiv
- das reine Wachs

Für die Messungen wurde die Heizplatte mit einer Heizrate von ca. 10 °C/min auf 140 °C erhitzt und dann mit einer Heizrate von 1 °C/min auf 235 °C gebracht. Während dem Aufwärmprozess wurde durchgehend mit dem LAAPTOF-MS (AeroMegt GmbH) gemessen. Ein Spektrum aller drei gemessenen Proben ist in Abbildung 100 dargestellt.

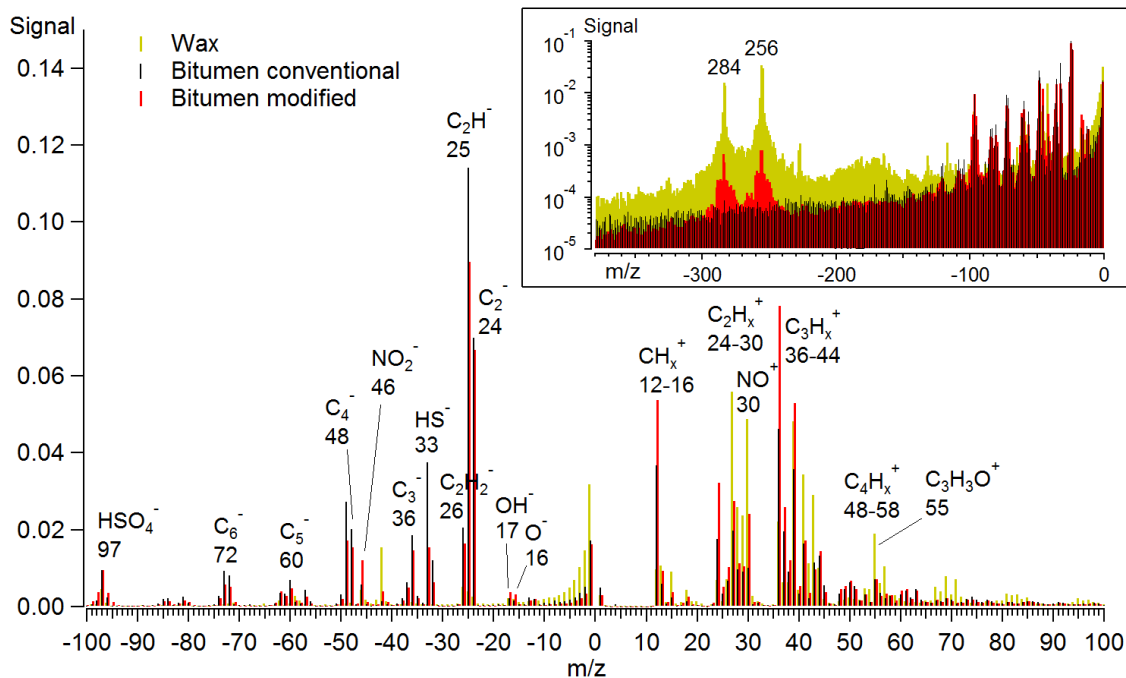


Abbildung 100: Spektrum von Wachs, konventionellem und modifiziertem Bitumen; Einsatz rechts oben ist fokussiert auf die für das Wachs relevanten Peaks

Beim direkten Vergleich des modifizierten und konventionellen Bitumens im kleinen Ausschnitt in Abbildung 100 sind die Peaks des reinen Waxes (Gelb) deutlich in den Messwerten des modifizierten Bitumens (Rot) wiederzufinden. Das Additiv ist also in der partikulären Emission von Bitumen zu finden.

### Laborstudie 2

Laborstudie 2 hatte das Ziel, die absolute Emission (in Masse PM<sub>10</sub> a.d. Emission pro Masse Asphalt) von MA 8 Gussasphalt zu erhalten.

Hierfür wurden die vier Gussasphaltemischungen in einem Labormischer hergestellt:

- Referenz - Verarbeitungstemperatur: 245°C
- 3%W - Verarbeitungstemperatur: 230°C
- KKRK - Verarbeitungstemperatur: 220°C
- RK 3%W - Verarbeitungstemperatur: 195°C

Pro Messtag wurde nur eine einzelne Mischung vermessen. Ziel-Temperaturen waren wie in Kapitel 0 festgelegt. Die aufgelisteten Temperaturen sind die bei der Messung tatsächlich gemessenen Temperaturen. Für die Messung wurde die Mischung direkt vom Mischer in einen Holzkübel überführt, daraufhin abgewogen und in einen 20 m entfernten Raum getragen. Dort wurde die Temperatur der Probe genommen und der Kübel mit Gussasphalt auf eine dafür vorgesehene Platte gekippt. Eine eigens dafür konstruierte Abdeckung, versehen mit einem Partikelfilter und einer Vakuumpumpe, wurde über die Probe gestülpt, sodass jegliche Emission durch den Filter gesaugt wird. Die Proben wurden 30 Minuten lang gemessen und danach ihre Temperatur aufgezeichnet (alle Proben waren nach 30 Minuten auf unter 80°C abgekühlt – damit gab es keine nennenswerte Emission mehr). Der Fluss der Pumpe betrug 37,7 l/min, damit wurde das Volumen der Abdeckung 9,4-mal pro Messung gespült. Als Basis für die Auswertung wurde während jeder Messung eine Hintergrundmessung durchgeführt. So wurde die Emissionsbelastung der Hintergrundluft im Messraum bestimmt, die dann von der Probenmessung subtrahiert wurde. Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Tabelle 49 dargestellt.

**Tabelle 49: Absolute Emission von 4 Gussasphalten in Laborstudie 2**

Gussasphaltnischung	PM10 [mg/kg]	[%]
Referenz 245 °C	5,52	100
3%W 230 °C	4,47	81
KKRK 220 °C	3,97	72
RK 3%W 195 °C	1,61	29

Beim Vergleich dieser im Labor ermittelten Werte ist eine Reduktion der Emission um ca. 70% bei einer Temperaturreduzierung von 50°C zu erkennen.

#### Feldstudie

Die Feldmessungen wurden während der Bauarbeiten an der Probetrecke in der Oberdorfstraße durchgeführt. Die Probetrecke war unterteilt in vier Teile, die jeweils an unterschiedlichen Tagen mit unterschiedlichen Mischungen (gleich zu Laborstudie 2) eingebaut wurden. Zwei PM10 Filtersamplern (ein 2 mal 1 h Messzeit; ein 2 h Messzeit) und ein Kaskadenimpaktor (2 h Messzeit) zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wurden an jedem Messtag in der Mitte des jeweiligen Probefelds am Rand (ca. 0,5 m von der Straße entfernt) platziert, sodass die Bauarbeiten eine Stunde in Richtung Messstelle und eine Stunde von der Messstelle weg stattfinden. Zusätzlich wurden noch zwei Arbeiter (ein Arbeiter, der den Asphalt direkt auf der Straße glattstreicht und ein Arbeiter, der die Kübel mit Gussasphalt am Asphaltkocher füllt; Arbeitsbezeichnungen: Streicher und Zapfer) mit persönlichen PM10 Samplern ausgestattet. Um den Hintergrund zu bestimmen wurde ein automatisierter PM10 Sampler für eine Periode von zwei Wochen, etwa 100 m von der Baustelle entfernt, aufgestellt.

Die Werte der Hintergrundmessstation wurden in Abbildung 101 mit Werten einer Messstation der Stadt Wien in Stadlau verglichen. Die Einbautage sind jeweils durch rote Rahmen gekennzeichnet. Die

Übereinstimmung zwischen den beiden Messstationen deutet darauf hin, dass die Bauarbeiten keinen signifikanten Einfluss auf die Immissionsituation der näheren Umgebung (Abstand 100 m) hatten.

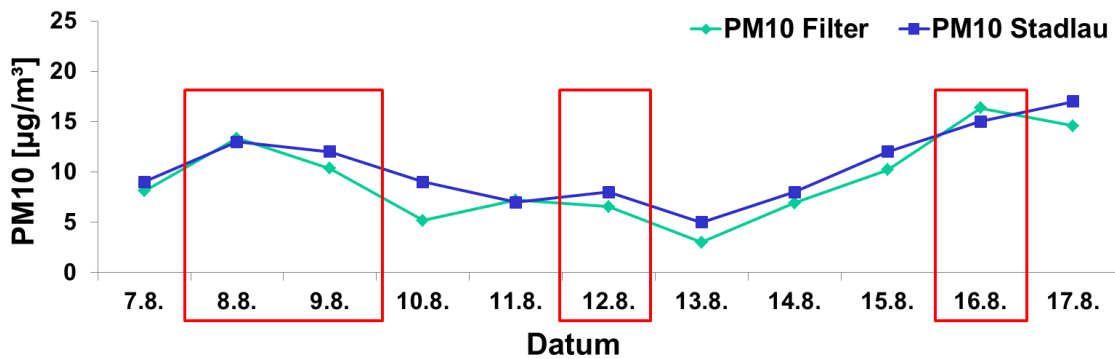


Abbildung 101: Hintergrundmessungen während der Bauarbeiten an der Oberdorfstraße; Grün: automatischer PM10 Sampler; Blau: Messstelle der Stadt Wien in Stadlau

Die Partikelgrößenverteilung des Kaskadenimpaktors, zu sehen in Abbildung 102, zeigt, dass die Partikelgrößen durch die unterschiedlichen Mischungen/Temperaturen nicht signifikant beeinflusst werden. Ein Großteil der Emission (etwa 80%) liegt im Bereich PM1, zählt damit als aveolengängig und ist als besonders gesundheitsrelevant einzustufen.

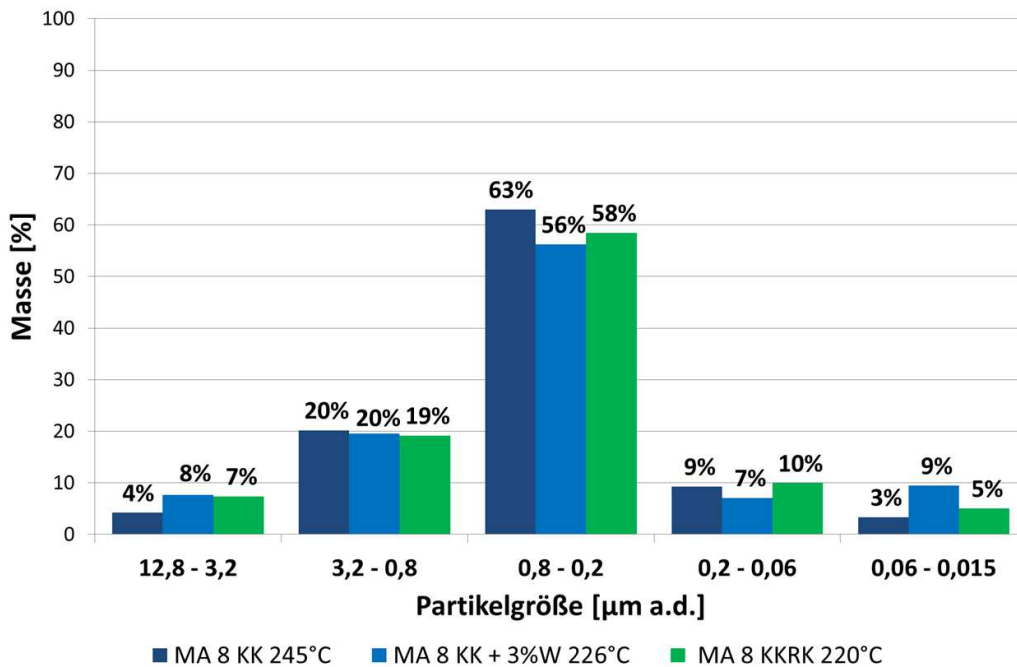


Abbildung 102: Partikelgrößenverteilung während der Bauarbeiten an der Oberdorfstraße; Die niedrigste Temperatur konnte aufgrund der zu niedrigen gesammelten Masse in den einzelnen Stufen nicht ausgewertet werden.

In Tabelle 50 sind die in den Feldmessungen ermittelten Werte für die Messstelle direkt neben der Baustelle und für die persönlichen PM10 Sampler aufgelistet. Die Prozentzahl bezieht sich immer auf die Emission des Referenzmischgutes. Beim Vergleich der Werte mit Laborstudie 2 fällt auf, dass der Trend sich im Feld bestätigt und Emissionsreduzierung von über 80% möglich ist.



Tabelle 50: Partikelemissionsdaten der Feldmessung an der Oberdorfstraße; prozentuale Werte immer bezogen auf die Referenzmischung

	Direkte Nähe				Arbeitermessungen			
	PM10		Total Carbon		Streicher		Zapfer	
	[µg/m³]	[%]	[µg/m³]	[%]	[µg/m³]	[%]	[µg/m³]	[%]
Referenz 245°C	379	100	321	100	3725,3	100	3762,5	100
3%W 230°C	182	48	95,3	30	2176,0	58	3953,6	105
KKRK 220°C	131	35	83,2	26	2120,3	57	1137,8	30
RK 3%W 195°C	60,5	16	15,6	5	283,0	8	485,6	13

In Abbildung 103 ist noch einmal das Ergebnis von den PM10 Messungen dargestellt. Es fällt hier noch deutlicher auf, dass eine Emissionsreduzierung von über 80% möglich ist, wenn die Einbautemperatur um 50°C abgesenkt wird. Schon eine Absenkung der Einbautemperatur um 20°C ermöglicht eine Emissionsreduktion von mehr als 50%.

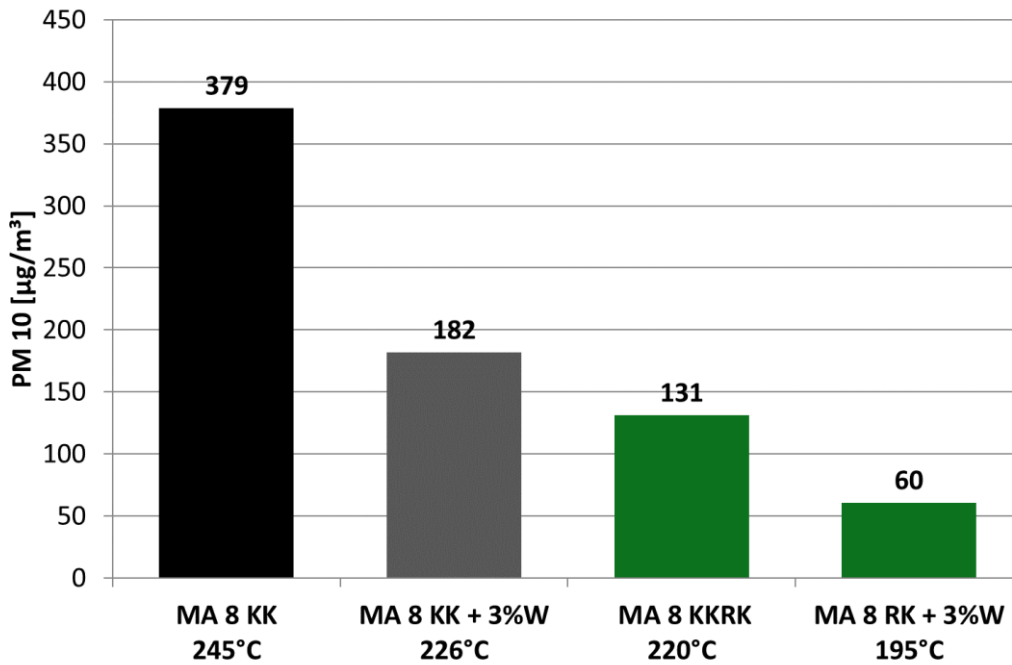


Abbildung 103: Ergebnisse PM10 Filtersamplers

### 6.8 Lebenszyklusanalysen [106]

Die Lebenszyklusanalysen wurden vom Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement durchgeführt und sind in diesem Kapitel zusammengefasst. Neben der Ausarbeitung von unterschiedlichen Szenarien, bestand der Hauptfokus auf der Erhebung von neuen Inputdaten. Insbesondere wurden durch Experteninterviews die Energiebilanz sowie Emissionsdaten der Mischanlage erhoben. Dies führte zu einer deutlich genaueren Modellauflösung. Die Datenlage der Mischanlage stellte sich als ausreichend differenziert heraus, um den jeweiligen Einzelprozessen, deren Anteil am Gesamtenergieverbrauch zuordnen zu können. Insgesamt wurden vier verschiedene Varianten erstellt:

- Variante 0 - Referenzmischgut
- Variante 1 - RK 3%W
- Variante 2 - KKRK
- Variante 3 - 3%W

Durch mögliche Temperatur-Absenkungspotentiale bei der innovativen Gussasphaltproduktion ergeben sich Energie- und Emissionsreduktionen. Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen temperaturabgesenkter Gussasphalte werden anhand von Emissions-, Energie- und Kostenanalysen untersucht und über den gesamten Lebenszyklus (Abbildung 104) bilanziert.

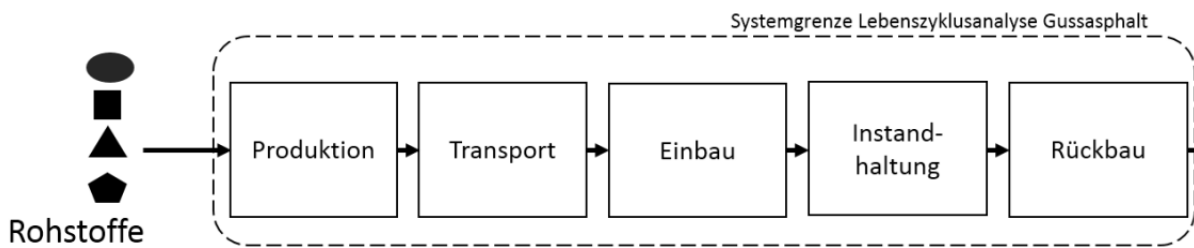


Abbildung 104: Struktur des Lebenszyklus von Gussasphalt; Insgesamt umfasst der Zyklus fünf verschiedene Phasen

Alle erhobenen Daten werden auf eine speziell definierte Funktionelle Einheit (FU) bezogen, die ein Streckenabschnitt mit den Dimensionen 1000 m x 3,75 m x 0,05 m und eine Menge von 460 t Gussasphalt mit einer Lebensdauer von 20 Jahren entspricht.

Messdaten aus der ersten beziehungsweise zweiten Zustandserfassung zeigten keine modellrelevanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Abschnitten der Probestrecke (Variante 0 – 3). Eine genauere Beurteilung der Lebensdauer beziehungsweise des Instandhaltungsaufwandes kann vermutlich erst in mehreren Jahren getroffen werden.

Energieebene

Tabelle 51 gibt eine Übersicht über die Gesamtenergieaufwände für die verschiedenen Szenarien, berechnet über den gesamten Lebenszyklus für eine FU Gussasphalt. Der Gesamtenergiebedarf liegt zwischen 450 GJ/FU und 530 GJ/FU. Durch Substitution von Kantkorn durch Rundkorn in den Varianten 1 und 2 wird eine Temperaturabsenkung des Mischguts erreicht. Dies kann zu deutlichen Energieeinsparungen führen. Zusätzlich wird Rundkorn hinsichtlich der grauen Energie deutlich energieschonender bewertet als Kantkorn. Die graue Energie ist dabei der „Energierucksack“, den die Rohstoffe selbst beinhalten aufgrund von Herstellung und Aufarbeitung der Rohstoffe. Die Substitution von Kantkorn durch Rundkorn führt somit zu einer deutlichen Absenkung des Energieaufwandes.

Tabelle 51: Zusammenfassung der berechneten Gesamtenergieverbräuche inklusive Einsparungspotential

Varianten	Energieaufwand [GJ/FU]	Unsicherheit +/- [GJ/FU]	Einsparungspotential [%]
Referenz	528	29	-
RK 3%W	454	28	14
KKRK	485	28	8
3%W	517	29	2

Vergleicht man Variante 0 mit Variante 1 sind insgesamt Energieeinsparungen von 14 % möglich. Hauptanteile, bezogen auf den Gesamtenergieaufwand (Referenz), haben die drei Phasen Graue Energie bzw. ökologischer Rucksack (33 %), Produktion (43 %) und Transport (22 %). Einbau, Instandhaltungsaufwand und Rückbau tragen hingegen deutlich geringer zum Gesamtergebnis bei (Abbildung 105).

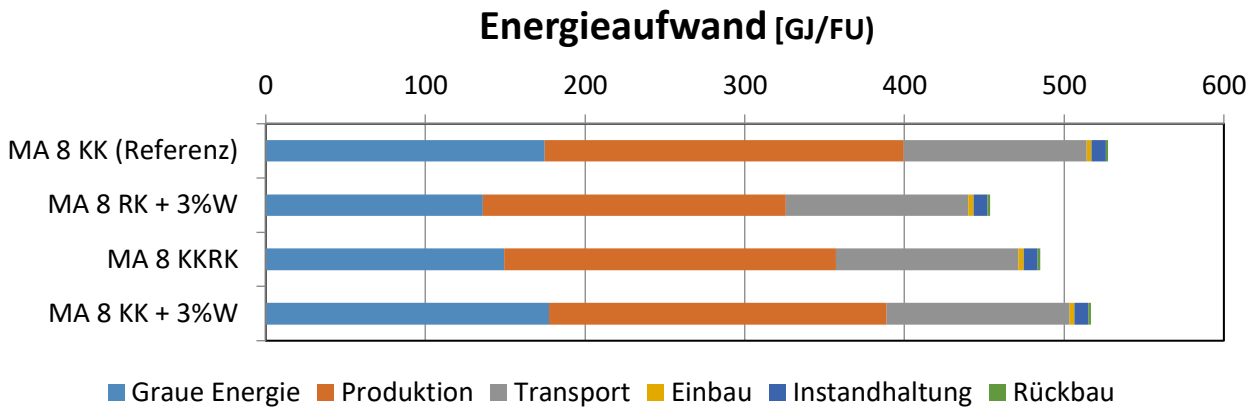


Abbildung 105: Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen am Gesamtenergieverbrauch

Kostenebene

Tabelle 52 gibt eine Übersicht über die Gesamtkosten für die verschiedenen Szenarien, berechnet über den gesamten Lebenszyklus für eine FU Gussasphalt.

**Tabelle 52: Gegenüberstellung der ermittelten Gesamtkosten**

Varianten	Gesamtkosten [€/FU]	Unsicherheit +/- [€/FU]
Referenz	25.405	476
RK 3%W	27.656	772
KKRK	24.237	485
3%W	30.042	472

Variante 1 und 3 wurden teurer bewertet als die Referenz. Das eingesetzte Wachs ist verhältnismäßig hochpreisig und überlagert damit die Einsparungen, welche durch geringere Prozessenergiekosten anfallen. Einzig Variante 2 ist aus monetärer Sicht günstiger. Gründe hierfür sind der etwas geringere Preis von Rundkorn im Vergleich zu Kantkorn und die niedrigeren Prozessenergiekosten. Abbildung 28 zeigt deutlich, welchen hohen Einfluss (89 %) der Einkauf von Rohstoffen und hier insbesondere der hohe Kostenanteil von Bitumen (66%), auf die Gesamtkosten hat. Produktion und Transport tragen zu jeweils ungefähr 5 % zu den Kosten bei. Wie auch bei der Energieebene ist der Einfluss der restlichen Lebenszyklusphasen auf die Gesamtkosten gering.

### Gesamtkosten [€/FU]

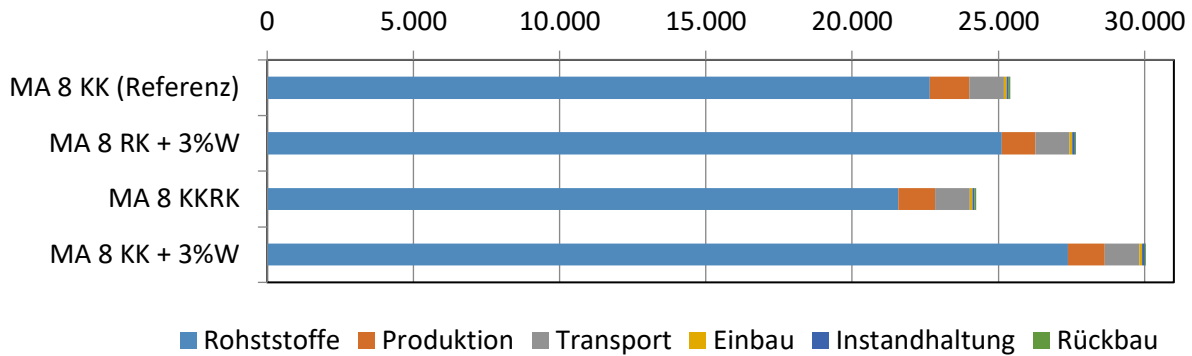


Abbildung 106: Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen an den Gesamtkosten

#### Emissionsebene (PM10)

Das Einsparungspotential von gesundheitsrelevanten Partikelemissionen ist ein wichtiger Aspekt für die Produktion von Gussasphalt mit innovativen Rezepturmischungen. Die durchgeführten Emissionsmessungen lieferten die Grundlage für die Bewertung der PM10- Emissionen. Die Datenlage bezüglich der Auswirkung von Temperaturabsenkungen auf potentielle Emissionseinsparungen konnte daher deutlich verbessert werden. Die Gesamtemissionen der jeweiligen Szenarien sind in Tabelle 10 aufgelistet. Neu gewonnene Erkenntnisse aus den Emissionsmessungen für den Einbau, wurden für die Produktionsphase entsprechend adaptiert. Weiterführende Untersuchungen mit einem Hauptaugenmerk auf das Emissionseinsparungspotential in der Mischanlage würde die Datenlage jedoch weiter verbessern.

Tabelle 53: Gegenüberstellung der ermittelten Partikelemissionen (PM-10) inklusive Einsparungspotential

Varianten	Gesamtemissionen [kg/FU]	Unsicherheit +/- [kg/FU]	Einsparungspotential [%]
Referenz	21,6	2,9	-
RK 3%W	14,4	1,5	33
KKRK	16,6	1,8	23
3%W	17,4	1,7	19

Die hohen Partikelemissionswerte für die Produktion der Rohstoffe (35 %) liegen hauptsächlich an der Bereitstellung von Bitumen. Während von Seiten der Asphalthersteller auf die eingesetzte Menge sowie Produktionsbedingungen von Bitumen wenig Einfluss genommen werden kann, besteht während der Produktionsphase deutliches Einsparungspotential (Abbildung 29). Diese Lebenszyklusphase sollte daher in Zukunft weiterhin kritisch betrachtet werden. Innerhalb der Referenz fallen 41 % der Gesamtemissionen während der Produktion an. In Variante 1 beträgt der Anteil nur 26 %. Der Transport trägt zu 8 % und der Einbau zu 12 % zu den Gesamtemissionen bei (jeweils in Bezug auf die Referenz).

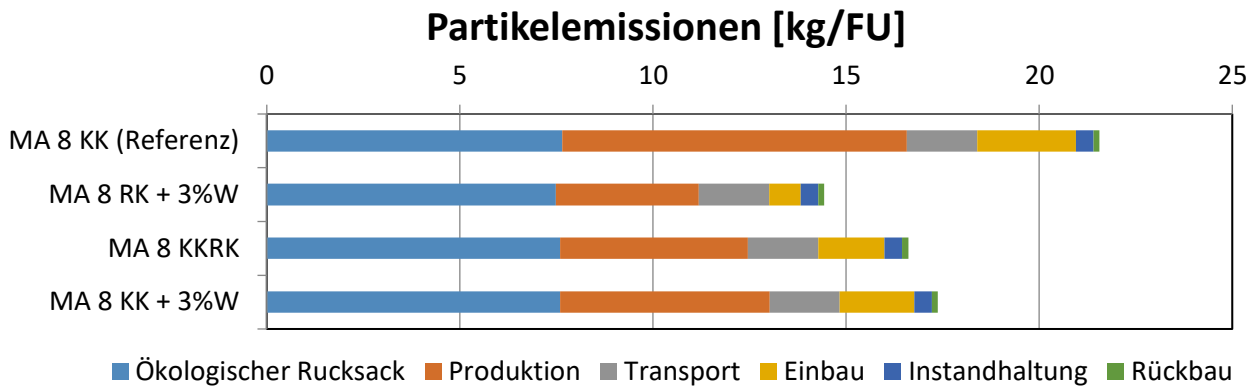


Abbildung 107: Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen an den Gesamtemissionen (PM10)

#### Graphische Aufbereitung und Auswertung mittels STAN

Um die Komplexität der Stoffströme übersichtlich darstellen zu können, wurden alle erhobenen Inputdaten in Form von Sankey-Diagramm mittels der Software STAN graphisch dargestellt (Abbildung 108). Eine STAN-Grafik zeigt alle definierten Lebensphasen einer bestimmten Ebene mit den jeweiligen Inputströmen. Die aufsummierten Werte werden am Ende der Grafik inklusive der berechneten Gesamtunsicherheit dargestellt.

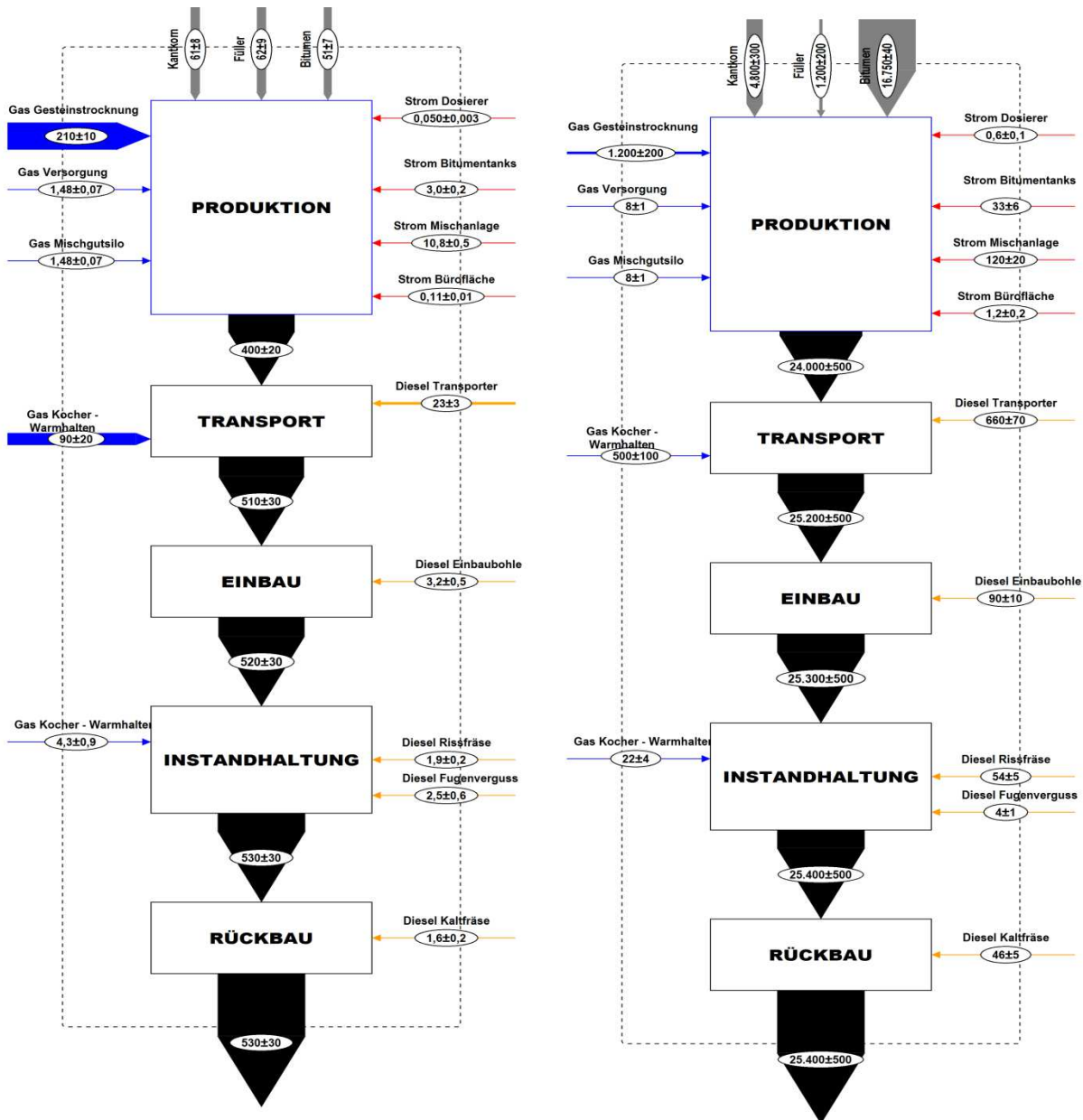


Abbildung 108: Graphische Aufbereitung der Inputgrößen für eine bestimmte Ebene mithilfe der Software STAN. Links: Energieflussanalyse für die Referenz (GJ/FU); Rechts: Die Kostenebene der Referenz (€/FU)

Im Rahmen der Lebenszyklusanalyse wurde die Temperaturabsenkung der Mischgüter bei der Produktion (an der Mischanlage) berücksichtigt. In der Mischanlagentechnik ist es im Moment nicht üblich die Temperatur während der Produktion anzupassen. In Abbildung 108 ist aber leicht zu erkennen, dass die Produktionsphase eine Hauptrolle bei der Energieflussanalyse hat. Damit wesentliche Vorteile für den gesamten Lebenszyklus erreicht werden können, sollen Temperaturabsenkungen hauptsächlich in der Produktionsphase passieren.

### 6.9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Kapitels 6 wurden die Betrachtungsebenen Labor, Mischanlage und Baustelle berücksichtigt. Das Prüfprogramm wurde für alle Betrachtungsebene wiederholt, damit es eine ausreichende Grundlage zum Vergleich gibt.

Als Ergebnis der Asphaltanalyse wurden die Füller/Bitumen-Verhältnisse berechnet. Mittelwert des Füller/Bitumen-Verhältnis vom Labor ist 2,45, von der Mischanlage 2,51 und von der Baustelle 2,70. Das Füller/Bitumen Verhältnis von der Baustelle ist mit 10 % höher als vom Labor. Ein höheres Füller/Bitumen Verhältnis führt zu einer höheren Beständigkeit gegen bleibende Verformungen (UCCT) des Asphaltmischgutes.

Von den durchgeführten konventionellen Bitumenprüfungen konnte die Tendenz erkannt werden, dass die Proben mit Wachs niedrigere Nadelpenetrationswerte und höhere Erweichungspunkte haben. Zusätzlich zu den konventionellen Bitumenprüfungen wurde das Dynamic Shear Rheometer (DSR) verwendet, um die visko-elastischen Eigenschaften des extrahierten Bitumens zu prüfen. Bei allen Betrachtungsebenen waren die Unterschiede im unteren Temperaturbereich kleiner als im oberen, deswegen werden die Ergebnisse vom oberen Temperaturbereich näher betrachtet. In der Betrachtungsebene Labor hat die Referenz den kleinsten Widerstand gegen Verformung und reagiert viskoser als die anderen Proben. Die Proben mit Wachs haben einen höheren Widerstand gegen Verformung als die Referenz bis 64 °C und ab 64 °C einen gleichen wie KKRK. Die kleine Erhöhung des komplexen Moduls von KKRK mag als Folge von Ungenauigkeiten im gelieferten Bitumen oder in der Bitumenmischung sein. Im Allgemeinen liegen die Werte der verschiedenen Proben sehr nah beieinander. Die DSR Ergebnisse auf Betrachtungsebene Mischanlage zeigen, dass die Referenz den niedrigsten Schubmodul gefolgt von RK 3%W, 3%W und KKRK hat. Beim Phasenverschiebungswinkel ist die gleiche Reihenfolge zu erkennen. Dort hat die Referenz den größten Phasenwinkel und KKRK den kleinsten. Einen Zusammenhang zwischen dem Bitumen mit Wachs und ohne Wachs sieht man nicht. Es wurden trotzdem wesentliche Unterschiede zwischen den Proben gemessen. Im Gegenteil zu den Labor- und Mischanlagenproben gibt es bei den Baustellenproben einen klaren Unterschied zwischen Wachs und ohne Wachs. Beim Vergleich aller Bitumenproben bestätigt sich, wie auch bei den vorher beschriebenen Versuchen, dass die Proben, die einen Wachsanteil im Bindemittel aufweisen insgesamt steifer sind als die Proben, die kein Wachs enthalten.

Zusätzlich zu den Bitumenversuchen wurde auch das Gebrauchsverhalten von den verschiedenen Mischgütern untersucht. Es konnte eine sehr hohe Beständigkeit gegen Rissbildung bei niedrigen Temperaturen für alle Proben festgestellt werden. Bei der Beständigkeit gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen ist die Verformung der modifizierten Varianten gleich oder kleiner als der Referenz. Die Proben mit Wachs führen zu den niedrigsten Werten. Im Rahmen der Asphaltversuche konnte ein sehr guter Zusammenhang zwischen Labor und Baustelle gefunden werden.

Am Ende wurden die Ergebnisse von DSR und UCCT verglichen und es konnte ein direkter Zusammenhang festgestellt werden. Niedrigere komplexe Schubmoduln  $|G^*|$  führen zu größeren axialen Verformungen  $eps_{ax}$  und umgekehrt. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen von  $G^*$ ,  $G''$ ,  $G'$  und  $\Phi$  mit  $eps_{ax}$  (*gewichtet*) sind jeweils 0,663, 0,664, 0,658 und 0,870. Die Korrelation von  $eps_{ax}$  (*gewichtet*) und  $\Phi$  hat den höchsten Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,870$  und es kann aus diesem Grund die Schlussfolgerung gezogen werden, dass  $eps_{ax}$  und  $\Phi$  sehr gut korrelieren. Das heißt, dass wenn die Gussasphaltrezepturen sich nur in ihrer Bindemittelhärte unterscheiden, dann kann mittels DSR die bleibende axiale Verformung auf Mischgutebene mit einer guten Genauigkeit vorhergesagt werden.

Im Rahmen der Baustelle wurden gesundheitsrelevante Emissionen und die Veränderung durch Temperaturabsenkung untersucht. Bei der umfassenden Emissionsanalyse von Gussasphaltarbeiten hat sich gezeigt, dass deutliche Unterschiede in der Emission zwischen den untersuchten

Mischungen/Einbautemperaturen bestehen und eine Emissionsreduktion von ca. 80% durch eine Temperaturabsenkung von 50°C möglich ist.

Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen temperaturabgesenkter Gussasphalte wurden anhand von Emissions-, Energie- und Kostenanalysen untersucht und über den Lebenszyklus bilanziert. Auf der Emissionsebene konnten Einsparungen von 33% der Gesamtemissionen berechnet werden, wenn die Produktionstemperatur um 50°C abgesenkt wird.

Insgesamt zeigt sich also durch den kombinierten Einsatz von Rundkorn und Wachs ein sehr gutes Temperaturabsenkpotehtial für Gussasphalt. Das Gebrauchsverhalten wird dadurch nicht beeinflusst und die Partikelemissionen auf der Baustelle verringern sich deutlich durch die Temperaturabsenkung. Auch die Gesamtemissionen über den Lebenszyklus können reduziert werden.



## 7 MACHBARKEITSSTUDIE ZUM RECYCLING POTENTIAL VON GUSS- ASPHALT

### 7.1 Stand der Technik

Die Wiederverwendung von Asphaltmischgüter ist zu einer bedeutenden Aufgabe der Asphaltindustrie in den letzten Jahren geworden. Der Gussasphalt ist trotz seines großen Potentials zur Wiederverwendung aber bisher wenig beachtet worden. Das bestätigt die ÖNORM B3585-1 für die Asphaltmischgutanforderungen für Gussasphalt (Regeln zur Umsetzung der EN 13108-6; Ausgabe 2012) [86]. Dort steht: „Die Verwendung von Ausbauasphalt ist nicht zulässig“.

In RVS 08.97.05, RVS 11.03.22 und im Merkblatt für Verwertung von Ausbauasphalt des Österreichischen Baustoff-Recycling Verbands wird die ÖNORM B3585-1 zitiert, dass bei Gussasphalt die Verwendung von Ausbauasphalt nicht zulässig ist [107-109].

In den deutschen Regelwerke wird in dem „Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt“ der FGSV und im Leitfaden „Wiederverwenden von Asphalt“ des Deutschen Asphaltverbands DAV darauf hingewiesen, dass die höchste Wertschöpfungsstufe von Asphaltgranulat aus Gussasphalt bei dessen Zugabe in ausschließlich Gussasphaltmischgüter liegt [110, 111].

Die Internationale Gussasphalt Vereinigung IGV schreibt im Bericht „The Mastic Asphalt Industrie – A Global Perspective“, dass es einen Trend in der Erhöhung der Mengen bei der Wiederverwendung von Gussasphalt gibt [112]. Mehr Auskunft wird aber nicht gegeben.

„The Mastic Asphalt Council“ MAC schreibt, dass Gussasphalt bis zu 100% rezyklierbar ist. Damit wird jedoch eine Verwendung als Granulat oder in der Form von Estrichen angesprochen [113].

### 7.2 Ziele

Hauptprobleme bei der Wiederverwendung von Asphaltmischgütern sind das harte (gealterte) Bindemittel und die Änderungen (Verfeinerung) in der Sieblinie in Folge der Fräsarbeiten [26]. Diese Nachteile für die Walzasphalte sind aber Vorteile für den Gussasphalt. Gussasphalte werden in der Regel mit einem künstlich oxidierten Bitumen hergestellt und nicht wie bei den Walzasphalten mit Destillationsbitumen. Die Sieblinie ist von der Angabe her fein und je feiner desto besser.

Ziel dieser Machbarkeitsstudie zum Recyclingpotential von Gussasphalt ist die Wiederverwendung von Gussasphalt bei einem RAP Anteil von über **98 M%** und gleichzeitig die höchsten Anforderungen für die Beständigkeit bei tiefen und hohen Temperaturen zu gewährleisten. Für die restlichen 2 M% wird frisches Bitumen als Verjüngungsmittel für das gealterte Ausgangsbitumen eingesetzt. So wird auch der Gesamtbindemittelgehalt erhöht, was Vorteile für die Verarbeitbarkeit und die Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse hat. Zum Erfüllen des Hauptziels wurden Asphaltanalysen durchgeführt, Bindemittelkennwerte bestimmt und das Gebrauchsverhalten auf Asphalteebene untersucht.

### 7.3 Materialien

Im Rahmen des Prüfprogramms wurden gefrästes Ausbaugussasphaltgranulat (RAP) und Destillationsbitumen 70/100 und 160/220 verwendet. Der Ausbauasphalt (RAP) wird im Kapitel 7.5 analysiert und Kennwerte von beiden Destillationsbitumenarten sind in Tabelle 54 zu finden.

Tabelle 54: Bindemittelkennwerte 70/100 und 160/220

70/100		160/220	
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Nadelpenetration bei 25 °C	88 dmm	Nadelpenetration bei 25 °C	165 dmm
Erweichungspunkt Ring und Kugel	45,0 °C	Erweichungspunkt Ring und Kugel	42,0 °C

Die Wiederverwendung vom Ausbauasphalt erfolgte durch Zugabe von frischem Bitumen. Die Berechnung der Bindemittelzugabe erfolgt nach Formel (9):

$$x = b \left( 1 - \frac{1-c}{1-a} \right) \quad (9)$$

$a$  Bindemittelgehalt in RAP M [%]

$c$  Ziel Bindemittelgehalt M [%]

$x$  frisches Bitumen [g]

$b$  Gesamtmasse Einwaage [g]

In Tabelle 55 sind die Zugabemengen von frischem Bitumen aufgelistet. Es sind alle Mischgutvarianten im Rahmen des Prüfprogramms mit deren Soll- und Ist-Bindemittelgehalt in M% zu sehen. Die Ist-Bindemittelkennwerte wurden im Rahmen der Asphaltanalyse (Asphaltextraktion und Bindemittelrückgewinnung) untersucht. Die Soll- und Ist-Bindemittelgehalte unterscheiden sich voneinander. Grund dafür sind die Unterschiede in den Soll- und Ist-Bitumenzugabemengen, die als Resultat der kleinen Mengen, mit denen im Labor gearbeitet wird, und der händischen Zugabe des frischen Bitumens zustande kommen. Bei allen Mischgütern mit der Ausnahme von T687 wurde lediglich frisches Bitumen dazugegeben. Im Fall T687 wurde zusätzlich der Füller mit 3 M% erhöht. In Tabelle 55 sind noch die RAP-Anteile in M [%] für alle Varianten aufgelistet.

Tabelle 55: Tabelle Soll - und Ist – Bindemittelgehalt und RAP-Anteil in M [%]

Probenbezeichnung	70/100			Probenbezeichnung	160/220		
	Bindemittelgehalt M [%]		RAP-Anteil M [%]		Bindemittelgehalt M [%]		RAP-Anteil M [%]
	Soll	Ist			Soll	Ist	
T748	8,3	8,4	99,4	T833	9,3	9,5	98,2
T754	8,3	8,4	99,4	T691	9,3	9,7	98,0
T832	9,3	8,6	99,1	T835	9,3	9,8	97,8
T834	9,3	8,8	98,9	T690	11,3	11,2	96,3
T692	9,3	9,6	98,0	T687	11,3	11,6	95,9
T689	11,3	11,8	95,7				

## 7.4 Prüfmethode und Prüfprogramm

### 7.4.1 Prüfmethode

In diesem Kapitel wurden folgende Prüfmethode verwendet:

- Asphaltanalyse [99]
- Nadelpenetration [37]
- Erweichungspunkt Ring & Kugel (ERK) [38]
- Dynamischer Scherrheometer (DSR) [51]
  - Temperatursweep: -8 °C bis +82 °C in 6 K Schritten
  - Frequenzsweep: 0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 1,592 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz und 40 Hz
- Ausbreitmaß für Gussasphalt (Kapitel 4)
- Abkühlprüfungen (TSRST) nach [58]
- Einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT) nach [95]

### 7.4.2 Prüfprogramm

In Tabelle 56 ist das Prüfprogramm für die Asphaltanalyse und die Bitumenprüfungen dargestellt. Von allen Mischgütern wurden Bindemittelgehalt- und Füllergehaltbestimmung durchgeführt und die Sieblinie wurde bei allen Proben außer für T832, T834 und T835 untersucht. Da die Sieblinien sehr gut vergleichbar sind (Abbildung 112) entfiel die Sieblinienbestimmung von diesen drei Proben. Innerhalb des Prüfprogramms der Bitumenprüfungen wurden alle extrahierten Proben untersucht. Vom Ausbauasphalt RAP wurden drei Proben untersucht, damit die Homogenität des Ausgangsmaterial geprüft werden kann.

Tabelle 56: Prüfprogramm Asphaltanalyse und Bitumenebene

	Probenbezeichnung	Ist-Bindemittelgehalt	Asphaltanalyse			Bitumenprüfungen		
			Bindemittelgehalt	Füllergehalt	Sieblinie	RuK	Pen	DSR
RAP	RAP 1		X	X	X	X	X	X
	RAP 2		X	X	X	X	X	X
	RAP 3		X	X	X	X	X	X
RAP + 70/100	T748	8,4 M%	X	X	X	X	X	X
	T754	8,4 M%	X	X	X	X	X	X
	T832	8,6 M%	X	X	-	X	X	X
	T834	8,8 M%	X	X	-	X	X	X
	T692	9,6 M%	X	X	X	X	X	X
	T689	11,8 M%	X	X	X	X	X	X
RAP + 160/220	T833	9,5 M%	X	X	-	X	X	X
	T691	9,7 M%	X	X	X	X	X	X
	T835	9,8 M%	X	X	X	X	X	X
	T690	11,2 M%	X	X	X	X	X	X
	T687	11,6 M%	X	X	X	X	X	X

In Tabelle 57 ist das Prüfprogramm auf Asphaltenebene zu sehen. Es wurden die Beständigkeit bei tiefen und hohen Temperaturen geprüft. Das TSRST-Prüfprogramm wurde so aufgebaut, damit die höchste Optimierungsgrenze erreicht wurde (7.5.3.3). Bei der Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung wurden alle Mischgüter außer T687 geprüft. Von der Variante T687 wurden nur die Bindemittelkennwerte wegen Unterschieden in der Sieblinie bestimmt.

Tabelle 57: Prüfprogramm Asphaltenebene

	Probebezeichnung		Ist-Bindemittel- gehalt	TSRST	UCCT
RAP + 70/100	T748	K653	8,4 M%	X	X
	T754	K650	8,4 M%	X	X
	T832	K715	8,6 M%	X	X
	T834	K717	8,8 M%	X	X
	T692	-	9,6 M%	-	X
	T689	K607	11,8 M%	X	X
RAP + 160/220	T833	K716	9,5 M%	X	X
	T691	-	9,7 M%	-	X
	T835	K718	9,8 M%	X	X
	T690	-	11,2 M%	-	X
	T687		11,6 M%	-	-

## 7.5 Ergebnisse und Diskussion

### 7.5.1 Asphaltanalyse

Am Anfang des Prüfprogramms wurden drei Proben mit unterschiedlichen Entnahmestellen des Ausgangsmaterials (RAP) analysiert, um seine Homogenität festzustellen. In Abbildung 109 und Abbildung 110 sind die Bindemittel- und Füllergehalte der drei Proben (RAP 1, RAP 2 und RAP 3) und in Abbildung 112 (links) ihre Sieblinienverläufe zu sehen. Der Mittelwert der Bindemittelgehalte ist 7,8 M% mit einer Standardabweichung von 0,2 M% und der Mittelwert der Füllergehalte 24,6 M% mit einer Standardabweichung von 1,6 M%. Zwischen den drei Sieblinien gibt es kleine Unterschiede. Sie sind trotzdem gut vergleichbar. Aufgrund des Vergleichs der drei Proben (RAP 1, RAP 2 und RAP 3) kann zusammengefasst werden, dass das Ausgangsmaterial eine gute Homogenität aufweist.

In Abbildung 109 und Abbildung 110 sind zusätzlich zu den RAP Proben auch Kennwerte für die restlichen rückgewonnen Proben zu finden. Die Reihenfolge in beiden Diagrammen ist nach aufsteigendem Bindemittelgehalt. In Dunkelgrau sind die Proben mit Zugabe von 70/100 und in hellgrau von 160/220. So unterteilen sich die Werte in drei Ebenen (RAP, RAP + 70/100 und RAP + 160/200). In Abbildung 109 links sind die, mittels Asphaltextraktion, bestimmten Bindemittelgehalte und in Abbildung 110 die Füllergehalte. Beim letzten Mischgut wurde zusätzlich zum frischen Bitumen auch Füller hinzugefügt und das führt diesbezüglich zu einem höheren Füllergehalt von 28 M%.

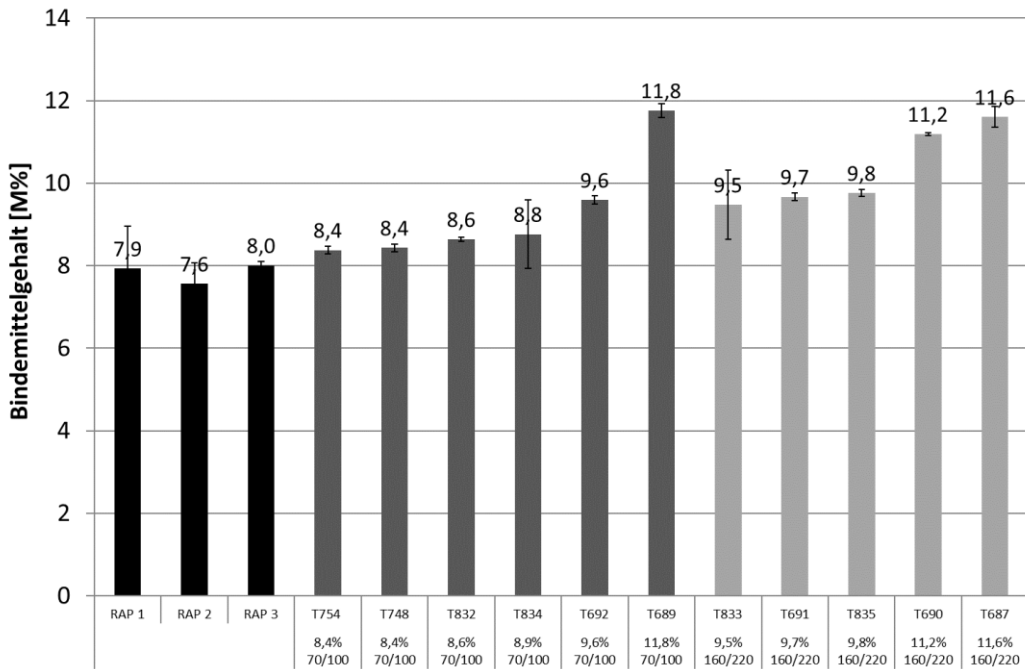


Abbildung 109: Asphaltanalyse; Bindemittelgehalt

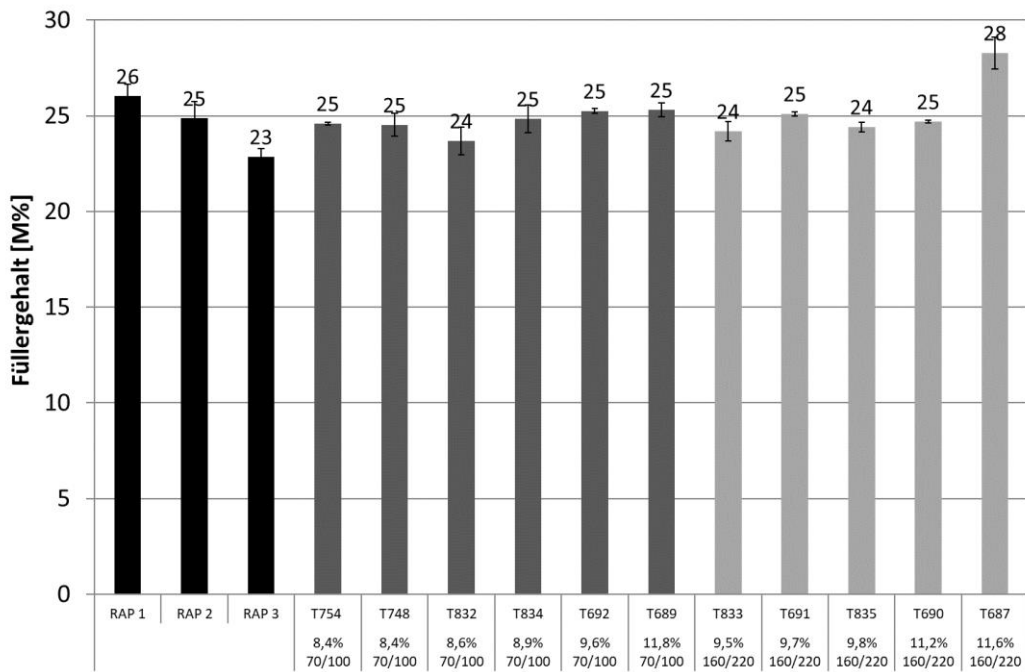


Abbildung 110: Asphaltanalyse; Füllergehalt

In Abbildung 111 sind die Füller/Bitumen Verhältnisse zu sehen. Sie werden dann bei der Berechnung der Korrelationen im Kapitel 7.6 verwendet.

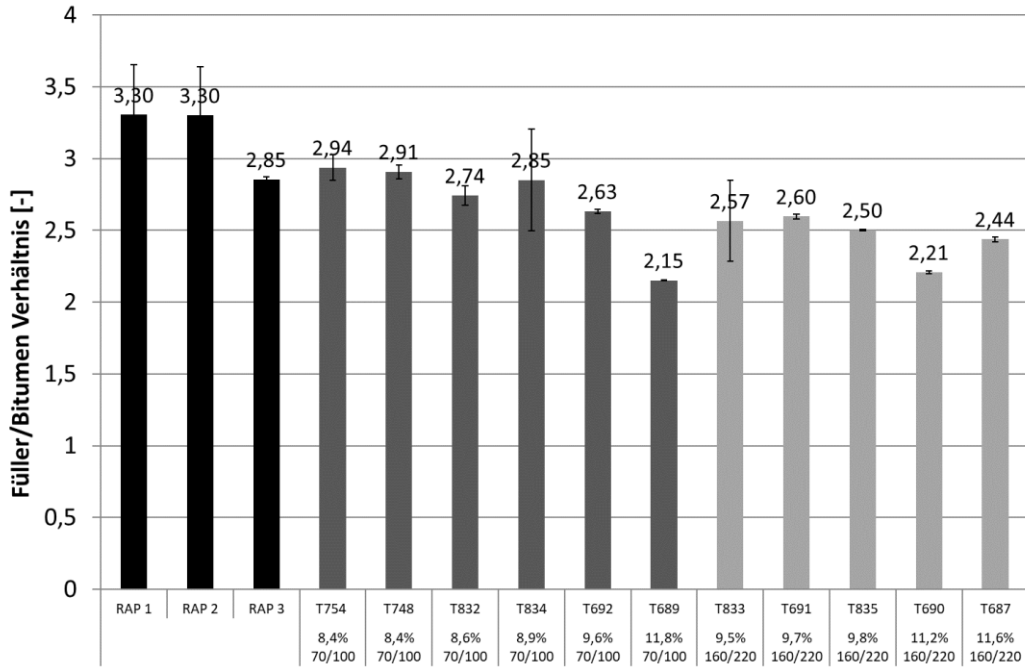


Abbildung 111: Füller/Bitumen Verhältnis [-]

In Abbildung 112 rechts sind Sieblinien von ausgewählten Mischgütern zusammengestellt. Sie liegen noch näher als die Sieblinien von den RAP Proben und sprechen wieder für ein homogenes Mischgut in Bezug auf die Gesteinssieblinie.

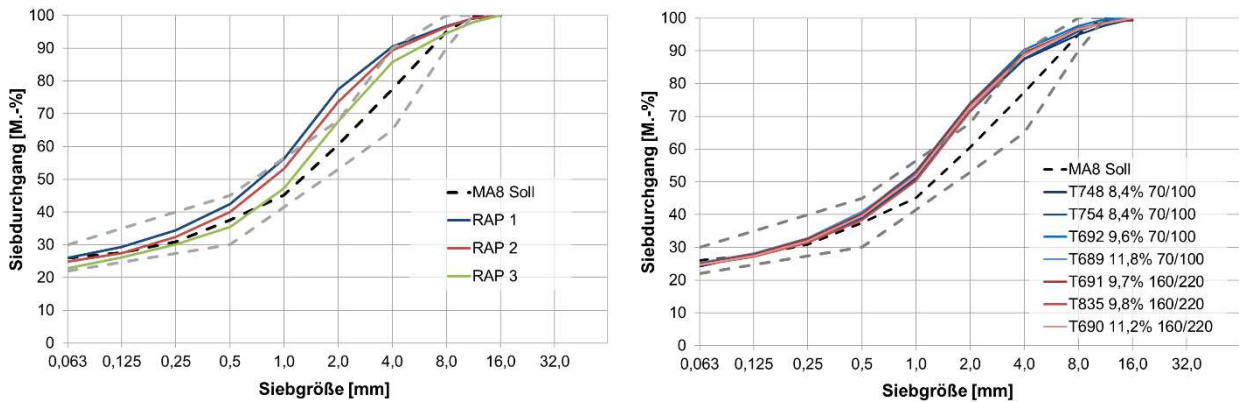


Abbildung 112: Sieblinien; RAP (links) und RAP + frisches Bitumen (rechts)

## 7.5.2 Bitumenebene

### 7.5.2.1 Konventionelle Bitumenprüfungen

In Abbildung 113 sind die Ergebnisse vom Penetrationsversuch in 0,1mm von allen rückgewonnen Bitumenproben zu sehen. Die gemessenen Penetrationswerte zeigen, dass es sich um ein hartes Bitumen handelt. Die maximalen Unterschiede zwischen den Proben im Rahmen einer Betrachtungsebene liegen bei ca. 10 [1/10mm]. Es kann trotzdem keine Tendenz erkannt werden, dass die Proben mit höherer Zugabe an frischem Bitumen weicher sind. Mit roten Linien sind die Mittelwerte innerhalb der Betrachtungsebene dargestellt. Im Durchschnitt sind die Werte mit 160/220 etwas höher als 70/100 und RAP.

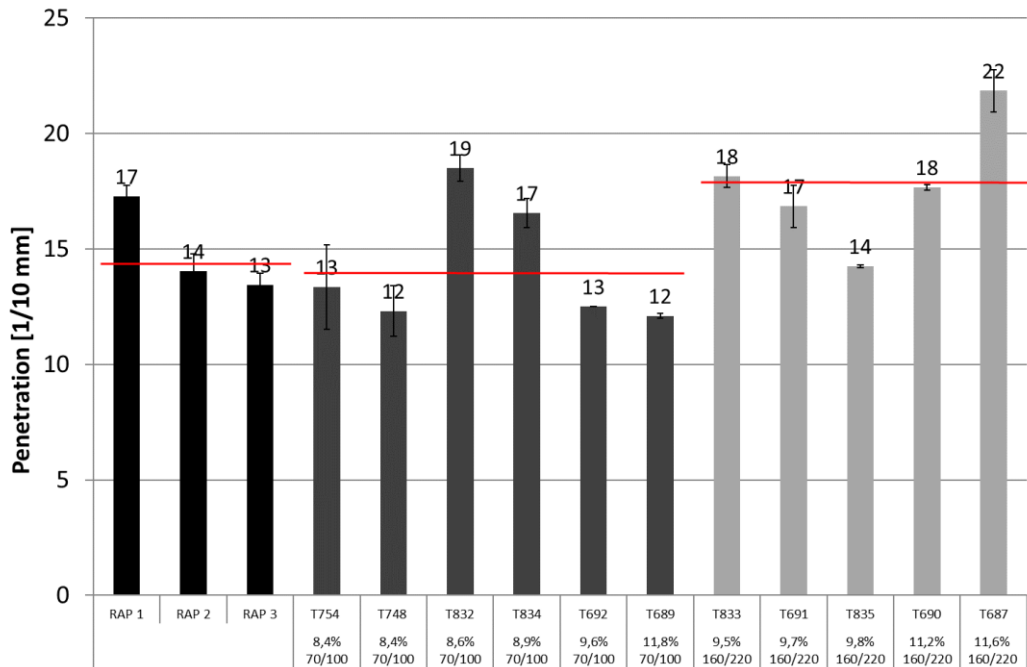


Abbildung 113: Bestimmung der Penetration [1/10 mm]

In Abbildung 114 sind die Ergebnisse vom Ring- und Kugel-Verfahren zusammengefasst. Die extrahierten Bitumenproben von Varianten T754 und T748 haben die höchsten Erweichungspunkten (97,0 °C und 99,5 °C). Von beiden Asphaltproben wurde mehrmals Bitumen rückgewonnen und geprüft, was zu den großen Standardabweichungen führt. Im Vergleich zu den anderen Proben mit 70/100 haben die beiden den niedrigsten Bindemittelgehalt. Das erklärt aber nicht, wieso ihre Werte höher als RAP sind. Im Kapitel 7.5 wurde darauf hingewiesen, dass das Ausgangsmaterial anscheinend homogen ist. Die Proben T754 und T748 widersprechen das hier. Die Asphaltanalyse zeigt Homogenität hinsichtlich Bindemittelgehalt und Sieblinie, und die Bitumenergebnisse führen aber zu der Schlussfolgerung, dass es Unterschied bei der Bindemittelhärte des Ausgangsmaterials gibt.

Die Mittelwerte (rote Linien) in Abbildung 114 zeigen, dass die Proben mit 160/200 niedrigere Erweichungspunkten haben. Wenn die Proben (T754 und T748) ausgeschlossen werden, dann liegen die Mittelwerte von RAP und 70/100 ziemlich nah (88,9 °C und 89,4 °C) beieinander, diejenigen von 160/220 darunter.

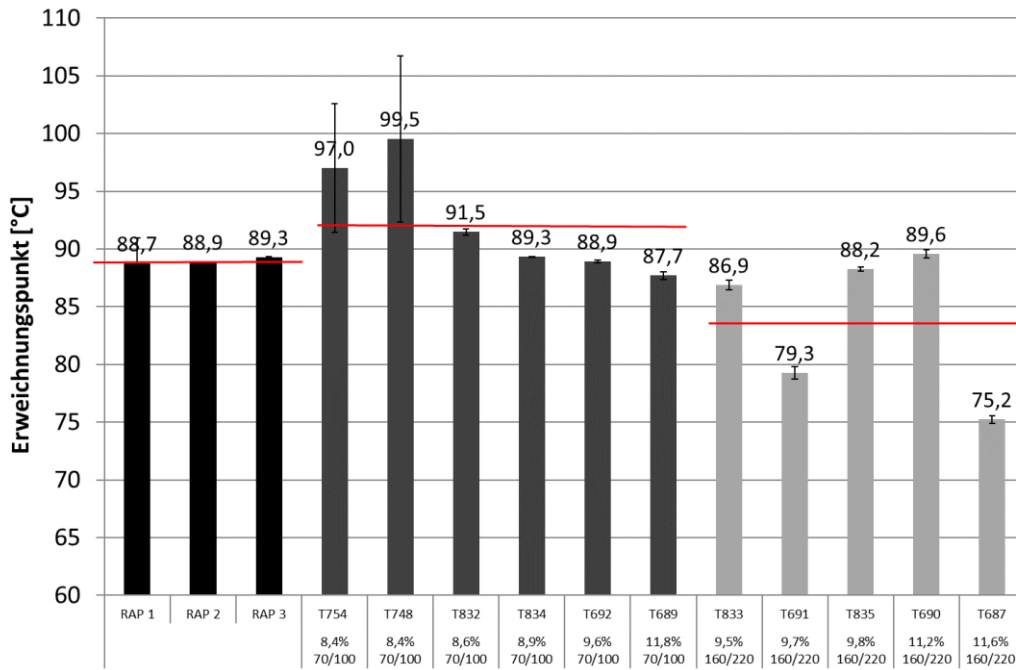


Abbildung 114: Bestimmung des Erweichungspunktes RuK [°C]

### 7.5.2.2 DSR

In Abbildung 115 sind die DSR Ergebnisse von den Bitumenproben des Ausgangsmaterial zu sehen. Die Daten von der drei Proben liegen sehr nah aneinander und sind somit gut vergleichbar.

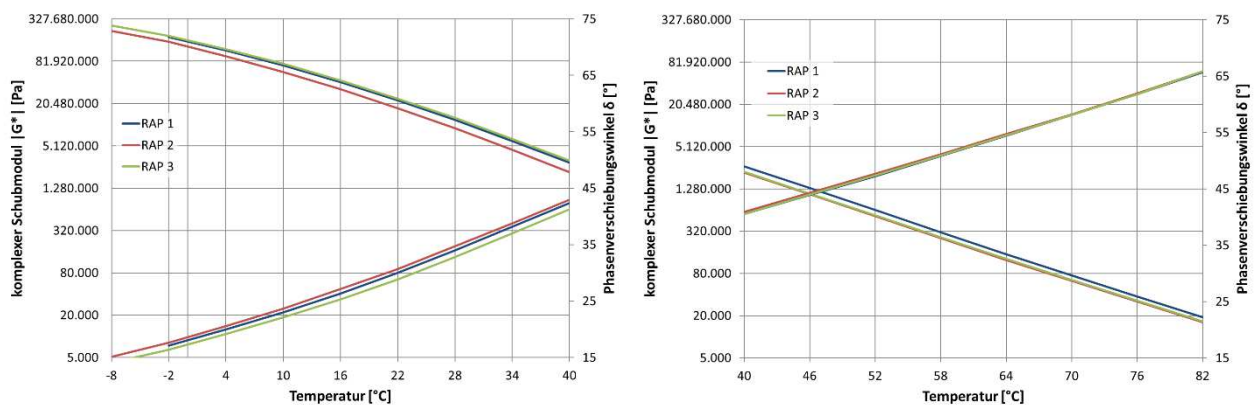


Abbildung 115: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  bei 1,592 Hz für die RAP Proben

In Abbildung 116 sind die DSR Ergebnisse der Proben mit Zugabe an Bitumen 70/100. In Rot ist die Referenz (Mittelwert von RAP 1, RAP 2 und RAP 3) und in Schwarz bis Hellgrau die Proben mit 70/100. Ähnlich wie bei den konventionellen Prüfmethoden sind hier die Bitumenproben von Platten T748 und T754 die steifsten. Mit Ausnahme dieser beiden Proben nimmt die Steifigkeit mit der Zunahme am Bindemittelgehalt ab.



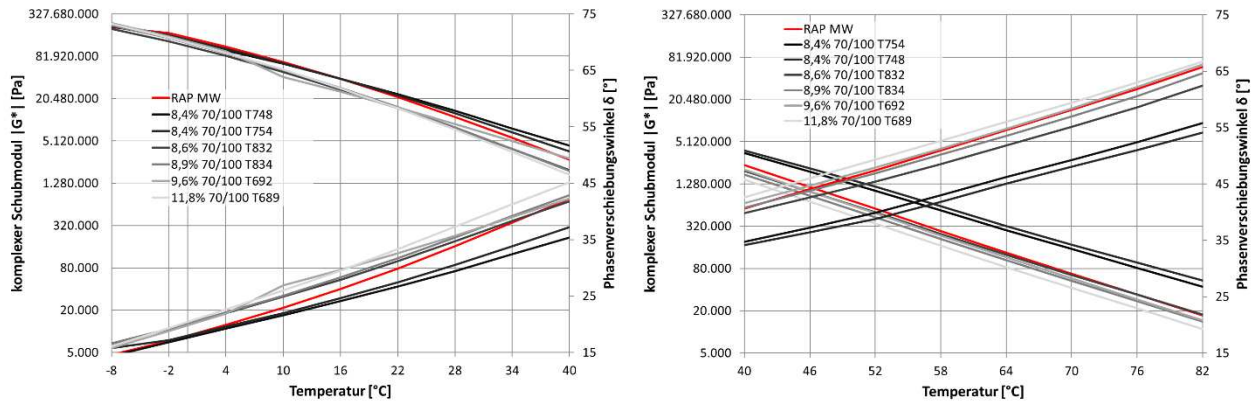


Abbildung 116: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  1,592 Hz für die Proben mit Bitumen 70/100

In Abbildung 117 sind der komplexe Schubmodul und der Phasenverschiebungswinkel bei 4 °C (1,592 Hz) und 52 °C (1,592 Hz) dargestellt, um die Unterschiede zwischen den Varianten leichter erkennbar zu machen. Im linken Diagramm hat die Referenz den höchsten komplexen Schubmodul, gefolgt von den Proben T754 und T748. Bei den restlichen vier Proben gibt es keinen klaren Trend, dass der komplexe Schubmodul mit der Zunahme an Bindemittelgehalt abnimmt. Wenn aber alle Proben betrachtet werden ist ein Trend erkennbar sowohl für den komplexen Schubmodul, der abnimmt, als auch für den Phasenverschiebungswinkel, der zunimmt. Im höheren Temperaturbereich (52 °C) im rechten Diagramm sind die Proben T754 und T748 deutlich steifer als die anderen. Mit Ausnahme von diesen zwei Proben nimmt die Steifigkeit mit der Zunahme an Bindemittelgehalt ab. T754 und T748 haben die kleinsten Phasenverschiebungswinkeln. Bei den restlichen Proben mit Bitumenzugabe steigen die Phasenverschiebungswinkel mit der Zunahme an Bindemittelgehalt. Die Referenz RAP liegt dazwischen. Wenn die Proben T754 und T748 nicht betrachtet werden, dann hat die Referenz bei 4 °C den höchsten Schubmodul und den kleinsten Phasenverschiebungswinkel und die Proben mit frischem Bitumen liegen sehr nah aneinander. Im hohen Temperaturbereich gibt es mehr Unterschied zwischen den Proben mit frischem Bitumen. Dort hat die Referenz den höchsten Schubmodul und den mittlere Phasenverschiebungswinkel.

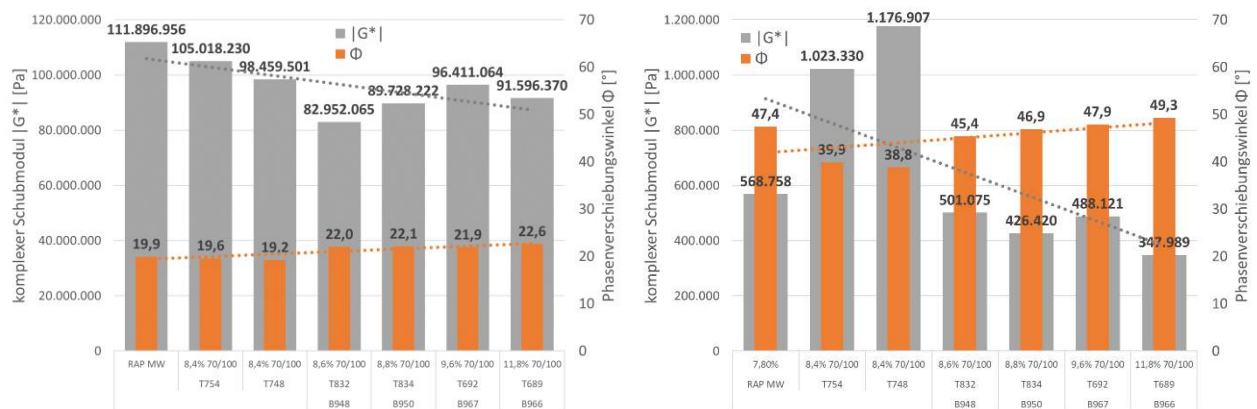


Abbildung 117: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  bei 4 °C und 1,592 Hz (links), und 52 °C und 1,592 Hz (rechts) für die Proben mit Bitumen 70/100

In Abbildung 118 sind die DSR Ergebnisse der Proben mit Zugabe von Destillationsbitumen 160/220 dargestellt. Sowohl im tieferen Temperaturbereich als auch im höheren führt die Zugabe an frischem Bitumen zu einem klaren Unterschied zwischen den Proben.

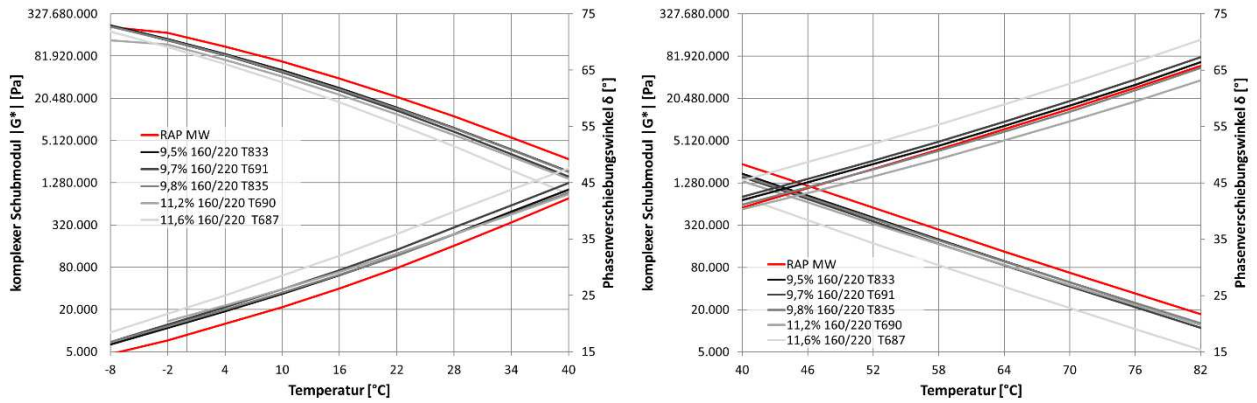


Abbildung 118: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  1,592 Hz für die Proben mit Bitumen 160/220

In Abbildung 119 sind der komplexe Schubmodul und der Phasenverschiebungswinkel bei 4 °C (1,592 Hz) und 52 °C (1,592 Hz) dargestellt. Links ist die Referenz und rechts sind die Proben mit der Zunahme am Bindemittelgehalt angeordnet. Im linken Diagramm ist ein klarer Abfall der komplexen Schubmoduln und ein Anstieg der Phasenverschiebungswinkel zu sehen. Im rechten Diagramm sinkt die Steifigkeit nach rechts wieder deutlich ab und bei den Phasenverschiebungswinkeln ist kein klarer Trend zu erkennen.

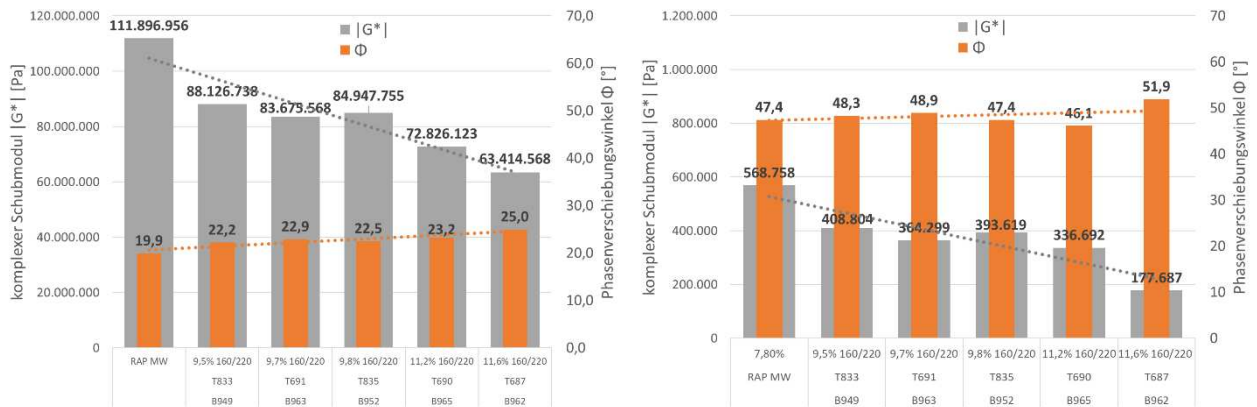


Abbildung 119: komplexer Schubmodul  $|G^*|$  und Phasenverschiebungswinkel  $\Phi$  bei 4 °C und 1,592 Hz (links), und 52 °C und 1,592 Hz (rechts) für die Proben mit Bitumen 160/220

### 7.5.3 Mischgutebene

#### 7.5.3.1 Verarbeitbarkeit

Im Rahmen des Prüfprogramms wurde die Verarbeitbarkeit von zwei RAP Mischgüter untersucht und mit der Verarbeitbarkeit von zwei Standard-Gussasphaltrezepturen (MA 4 und MA 8) verglichen. Es wurde der Ausbreitmaßversuch für Gussasphalt verwendet. In Abbildung 120 sind die Ergebnisse aller vier Mischgüter zu sehen. Beide Standardrezepturen liegen sehr nah aneinander und die RAP Mischgüter liegen tiefer darunter. Die höchsten Ausbreitmaße hat das Mischgut mit dem höchsten Bindemittelgehalt (11,8 M%). Die RAP Mischgüter haben bessere Verarbeitbarkeit wegen ihres höheren Bindemittelgehalts. Diese Prüfmethode wird bei Temperaturen über 180 °C, bei denen das Bindemittel schon flüssig ist. Das Bitumen weist zwar einen höheren Alterungszustand auf, aber bei diesen Temperaturen spielt der Bindemittelgehalt eine entscheidendere Rolle. Das heißt, dass Gussasphaltmischgüter mit RAP das Potential haben, bei niedrigeren Temperaturen eingebaut zu werden.

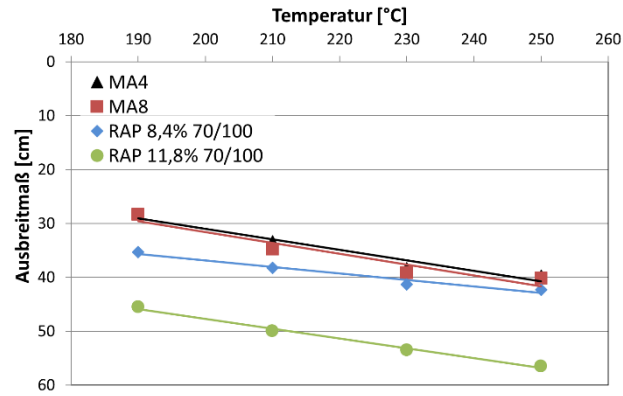


Abbildung 120: RAP Verarbeitbarkeit

### 7.5.3.2 UCCT

In Abbildung 121 sind die Ergebnisse der Asphaltprüfungen für die Beständigkeit gegen Verformung bei hohen Temperaturen dargestellt. Es sind die bleibenden, axialen Verformungen nach 3.600 Lastwechsel in % aufgetragen. In dunkelgrau sind die Ergebnisse von den Mischgütern mit Zugabe an Destillationsbitumen 70/100 zu sehen. Je höher der Bindemittelgehalt ist desto höher ist die Verformung. Die Proben T754 und T748 waren die Proben mit dem steifsten Bitumen. Hier, auf Asphalzebene, haben diese Mischgüter die kleinsten Verformungen (-2,4% und -2,1 %).

In hellgrauer Farbe in Abbildung 121 sind die Mischgüter mit Zugabe an 160/220 dargestellt. In diesem Fall gibt es auch eine Steigung der Verformung mit der Zunahme an dem Bindemittelgehalt. Diese Tendenz ist aber nicht so eindeutig wie bei 70/100. Wenn die Ergebnisse in Abbildung 119 mit den Ergebnissen in Abbildung 121 verglichen werden, dann kann ein sehr guter Zusammenhang zwischen den DSR und UCCT Werten beobachtet werden, der dann im Kapitel 7.6 in Detail analysiert wird.

In schwarzer strichlierter Linie ist die bleibende axiale Verformung (- 9%) des Referenzmischguts (KK Labor) vom Kapitel 5 dargestellt.

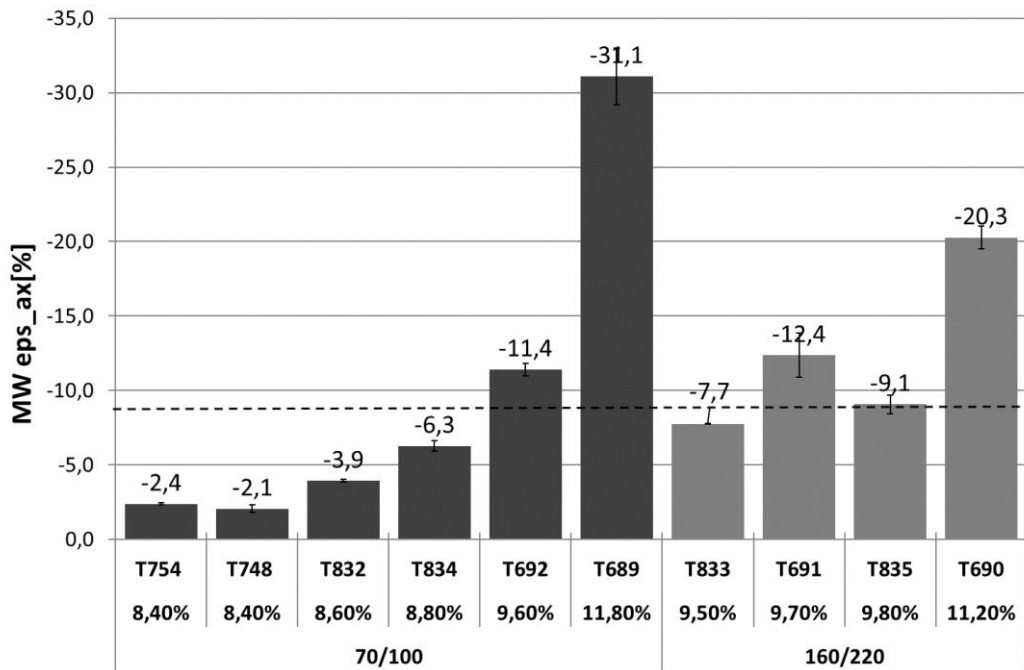


Abbildung 121: UCCT Ergebnisse; 70/100 links und 160/220 rechts

### 7.5.3.3 TSRST

In Abbildung 122 sind die Ergebnisse der Beständigkeit gegen Rissbildung bei tiefen Temperaturen zu sehen. Die Mischgüter sind in der Reihenfolge mit zunehmendem Bindemittelgehalt dargestellt. In dunklem Grau sind die Varianten RAP + 70/100 und in hellem Grau RAP + 160/220. Bei den Varianten RAP + 70/100 steigt die Beständigkeit gegen Rissbildung bis zum vierten Mischgut an und bleibt dann auf einem ähnlichen Niveau. Bei der Variante T834 wird eine Bruchtemperatur von  $-29,2\text{ °C}$  erreicht, was  $\text{TSRST}_{\text{max-25}}$  entspricht. Die zwei höchsten Anforderungen für die Bruchtemperatur einer Deckschicht liegen laut ÖNORM B3580-2 jeweils zwischen  $-30\text{ °C}$  und  $-25\text{ °C}$ . Die Variante T834 erfüllt also die zweithöchste Anforderung und das bei einem RAP Anteil von **98,9 M%**.

Bei den Varianten RAP + 160/220 liegen die zwei Bruchtemperaturen auf einem ähnlichen Niveau. Die geprüften Mischgüter haben einen höheren Bindemittelgehalt als T834 und ein weicherer Bitumen, das beigemischt wurde (160/220). Das spricht dafür, dass eine Grenze erreicht worden ist, die keine Optimierung mehr in Richtung Tieftemperaturverhalten zulässt. Die Bruchtemperaturen der Varianten K717, K607, K716 und K718 haben einen Mittelwert von  $-28,4\text{ °C}$ , der als diese Grenze interpretiert werden kann.

Mit der roten Linie in Abbildung 122 ist die Grenze von  $-28,4\text{ °C}$  und in schwarzer strichlierter Linie ist die Bruchtemperatur ( $-27,5\text{ °C}$ ) des Referenzmischguts (KK Labor) vom Kapitel 5 dargestellt.

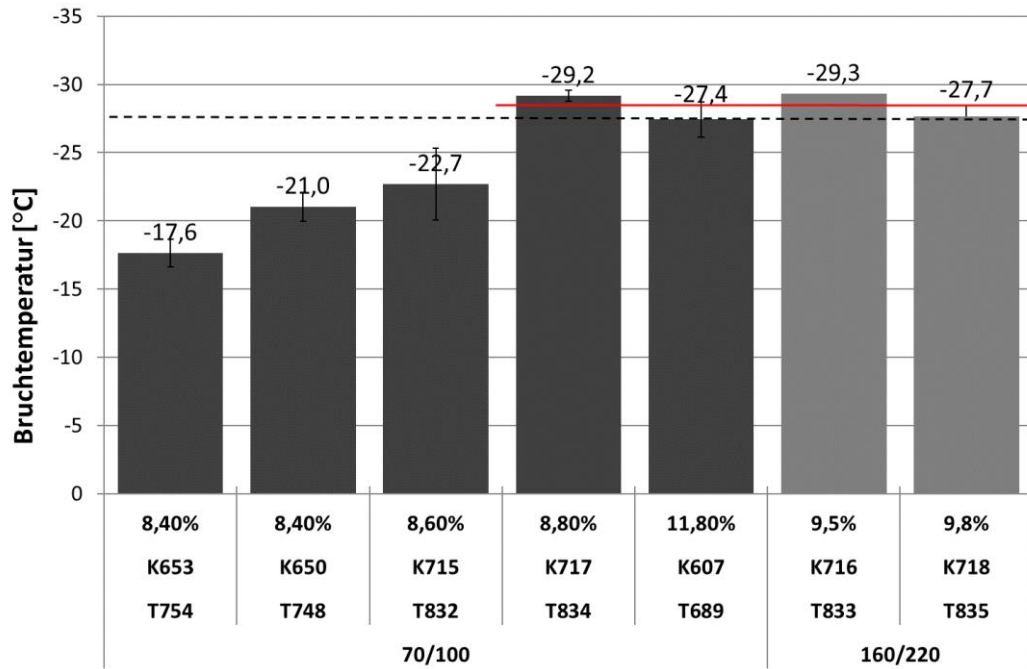


Abbildung 122: TSRST; RAP + 70/100 (links); RAP + 160/220 (rechts)

## 7.6 Korrelation DSR - UCCT

Die Mischgutvarianten unterscheiden sich in ihren Bindemittelgehalten (Abbildung 110). Damit eine Korrelation zwischen den DSR- und UCCT-Ergebnisse gemacht werden kann, wurden die  $eps_{ax}$  hinsichtlich dieser Unterschiede gewichtet. Wie im Kapitel 6 wird als Korrekturfaktor das Füller/Bitumen Verhältnis eingesetzt.

In Tabelle 58 sind die Korrekturfaktoren für alle Varianten aufgelistet. Als Korrekturfaktor  $k$  ist die Differenz des Füller/Bitumen Verhältnis  $c$  zwischen den RAP Varianten und der Betrachtungsebene Labor vom Kapitel 6 in % festgelegt. Mittels der Korrekturfaktoren wurden dann die  $eps_{ax}$  gewichtet und für die Korrelationen ( $eps_{ax}$  vs.  $|G^*|$ ,  $eps_{ax}$  vs.  $G'$ ,  $eps_{ax}$  vs.  $G''$  und  $eps_{ax}$  vs.  $\Phi$ ) verwendet (Abbildung 123). Die RAP Varianten wurden im Zusammenhang mit der Betrachtungsebene Labor vom Kapitel 6 gewichtet, weil dann in Abbildung 124 die Korrelationen mit den Werten von beiden Kapiteln analysiert werden. Es wurde mit den Absolutwerten von  $eps_{ax}$  gearbeitet, damit dann die Regressionen in Abbildung 123 und Abbildung 124 berechnet werden können.

Tabelle 58: Korrekturfaktoren  $k$  für die verschiedenen Varianten

	Beschreibung	Bindemittelgehalt M [%]	Füllergehalt M [%]	Füller/Bitumen Verhältnis $c$ [-]	Korrekturfaktor $k$ [%]	$ \text{eps\_ax} $ [%]	$ \text{eps\_ax} $ (gewichtet) [%]
Labor		8,8	23,5	2,69			
70/100	T754	8,4	24,6	2,93	8,72	2,4	2,6
	T748	8,4	24,3	2,89	7,35	2,1	2,3
	T832	8,6	23,7	2,76	2,31	3,9	4,0
	T834	8,8	24,8	2,82	4,81	6,3	6,6
	T692	9,6	25,2	2,63	-2,33	11,4	11,1
	T689	11,8	25,3	2,14	-20,36	31,1	24,8
160/220	T833	9,5	24,2	2,55	-5,45	7,7	7,3
	T691	9,7	25,1	2,59	-3,91	12,4	11,9
	T835	9,8	24,4	2,49	-7,48	9,1	8,4
	T690	11,2	24,7	2,21	-18,11	20,1	16,5

Mittels Formel (10) wurde der Korrekturfaktor  $k$  berechnet.

$$k_{RAP\_Variante} = \left[ \frac{(c_{RAP\_Variante} - c_{Labor})}{c_{Labor}} \right] \cdot 100 \quad (10)$$

In Abbildung 123 sind die Korrelationen dargestellt. Für die ersten drei Korrelationen wurden Potenzfunktionen verwendet und für die vierte, logarithmische Funktion. Mit den Potenzfunktionen in dieser Form werden die Null-Punkten von beiden Achsen genähert, aber nie erreicht und mit den logarithmischen Funktionen wird den Null-Punkt der X-Achse genähert, aber nie erreicht.

In den Diagrammen (links) sind die Werte des Bitumen/Füller Verhältnis ohne Korrekturfaktor und in den rechten Diagrammen mit Korrekturfaktor dargestellt. Die Einführung des Korrekturfaktors führt zu einer leichten Verbesserung der Korrelationen bei allen Varianten. Die Bestimmtheitsmaße der Regressionen von  $|G^*|$ ,  $G^*$ ,  $G'$  und  $\Phi$  mit  $|\text{eps\_ax}|$  (gewichtet) sind jeweils 0,760, 0,770, 0,752 und 0,717. Es kann aus diesem Grund die Schlussfolgerung gezogen werden, dass beide Prüfmethoden gut korrelieren.

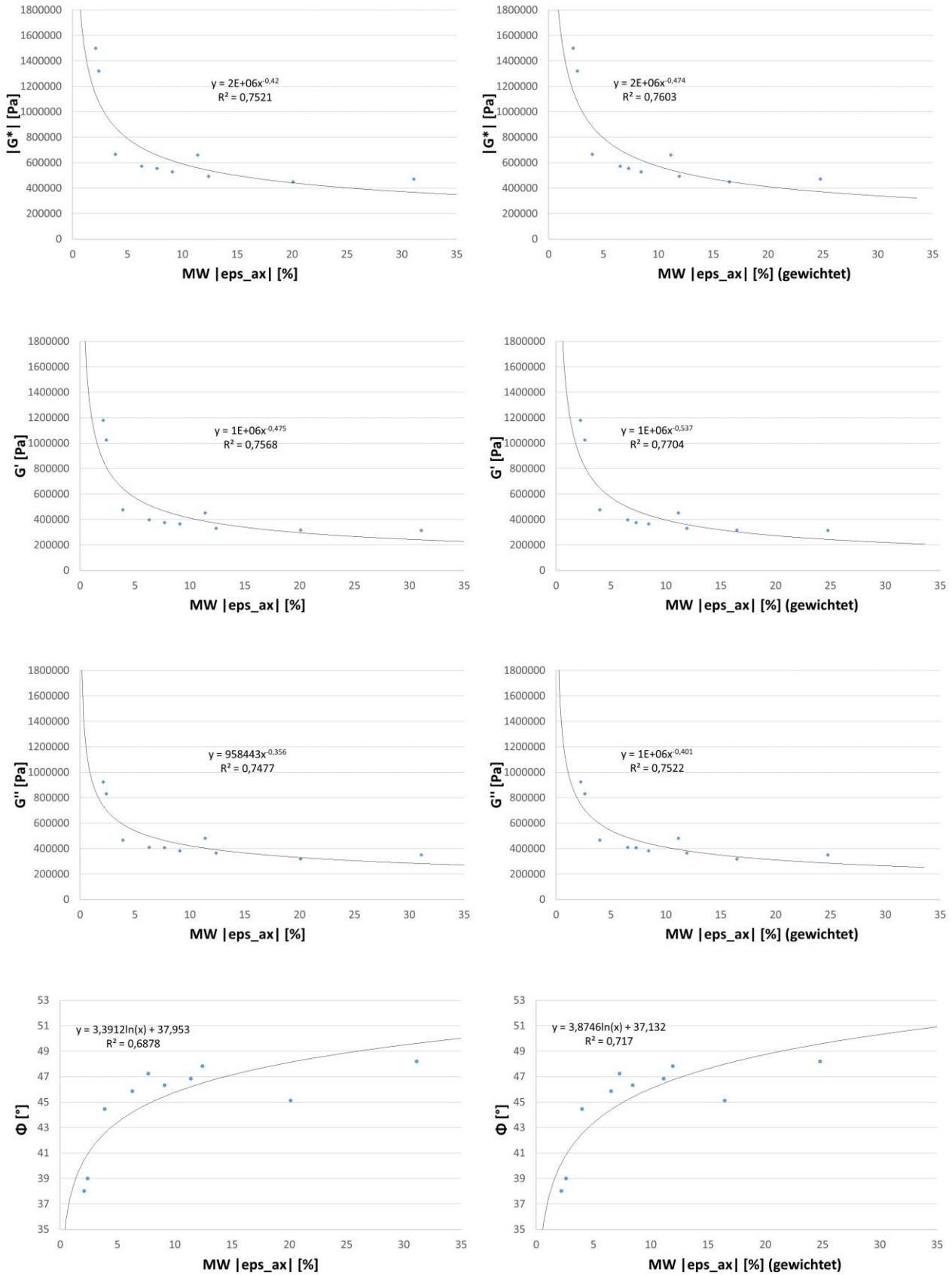


Abbildung 123: Korrelation DSR vs UCCT von den RAP Mischgütern

In Abbildung 124 sind die Korrelationen |eps\_ax| vs. |G\*|, |eps\_ax| vs. G', |eps\_ax| vs. G'' und |eps\_ax| vs. Phi von Kapiteln 6 und 7 zusammengefasst. Es wurden nur die gewichteten |eps\_ax| Werte verwendet. Wie

in Abbildung 123 wurden hier für die ersten drei Korrelationen Potenzfunktionen verwendet und für die vierte, logarithmische Funktion. Die Datenpunkte mit der größten und kleinsten bleibenden Verformung führen dazu, dass die Funktionen nicht mehr linear sind (siehe Kapitel 6). Die Bestimmtheitsmaße der Regressionen von  $|G^*|$ ,  $G''$ ,  $G'$  und  $\Phi$  mit  $|\text{eps\_ax}|$  (gewichtet) sind jeweils 0,638, 0,644, 0,627 und 0,664.

Die  $\text{eps\_ax}$  Werte wurden hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Füller/Bitumen Verhältnissen gewichtet. Die Unterschiede in den Sieblinien zwischen den RAP Varianten und GU Varianten wurden nicht berücksichtigt. Die Unterschiede in den Sieblinien befinden sich bei den Siebgrößen  $> 0,5$  mm und in diesem Bereich reagieren die Gussasphalte weniger sensibel als bei den Siebgrößen  $< 0,5$  mm.

Im Kapitel 6 wurde für jede Betrachtungsebene eine lineare Regression gemacht und dann wurden die linearen Regressionen gewichtet. Im Gegensatz dazu wurde hier jede Variante getrennt betrachtet. Für Kapitel 6 war das nötig, weil nur so die Unterschiede in den Füller/Bitumen Verhältnissen zwischen den Betrachtungsebenen berücksichtigt werden konnten.

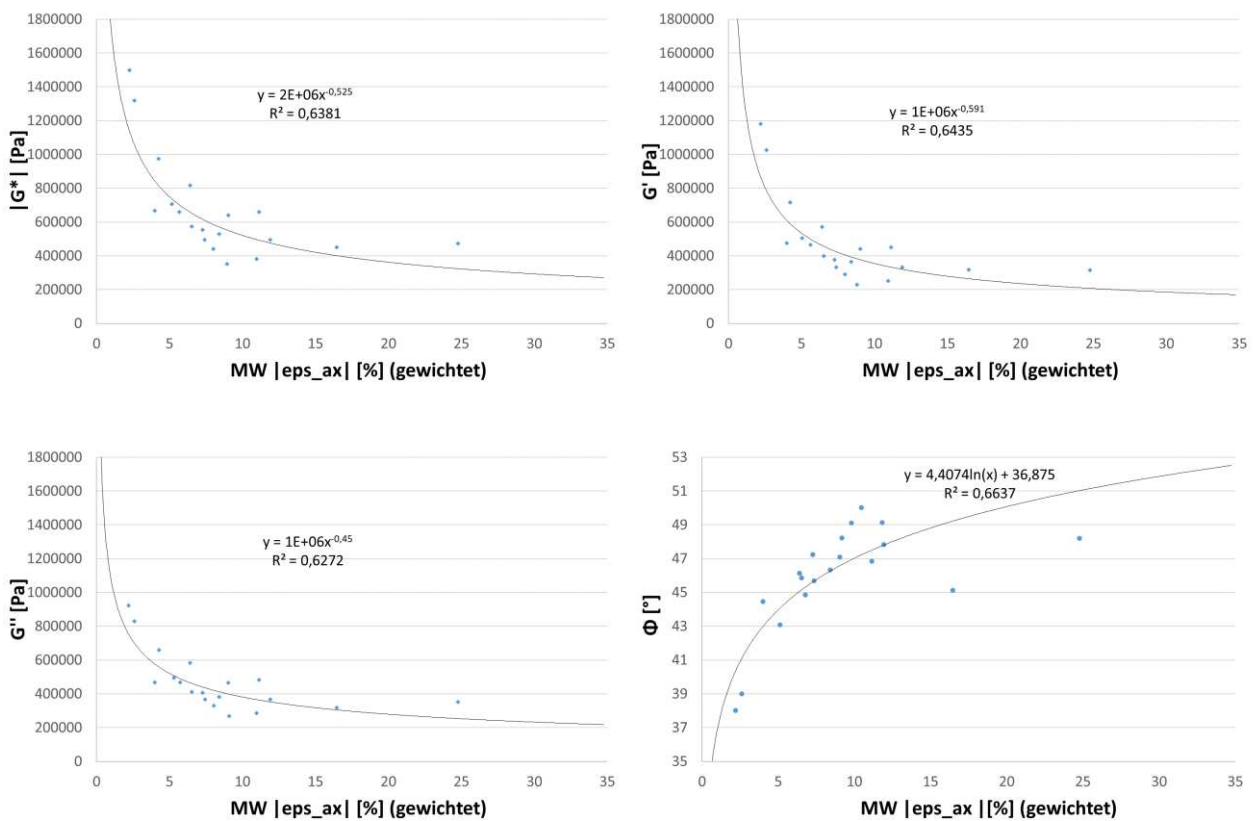


Abbildung 124: Korrelation RAP + frisches Bitumen vs. Ergebnisse vom Kapitel 6

Aufgrund der durchgeführten Korrelationen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es bei den Gussasphaltemischgütern einen guten Zusammenhang zwischen den Bindemittelkennwerten aus der DSR Prüfmethode und den Asphaltergebnissen für Beständigkeit bei hohen Temperaturen (UCCT) gibt und das unabhängig davon, ob RAP verwendet wird.



## 7.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wird eine Machbarkeitsstudie zum Recycling Potential von Gussasphalt vorgestellt. Ziel ist die Wiederverwendung von Gussasphalt bei einem RAP Anteil von über 98 M% und dabei gleichzeitig die höchsten Anforderungen für die Beständigkeit bei tiefen und hohen Temperaturen zu gewährleisten. Als Zusatz zum RAP wird lediglich frisches Bitumen als Verjüngungsmittel eingesetzt.

Im Rahmen des Prüfprogramms wurden gefrästes Ausbaugussasphaltgranulat (RAP) und Destillationsbitumen 70/100 und 160/220 verwendet. Es wurden insgesamt 11 Varianten mit unterschiedlicher Zugabe an frischem Bitumen untersucht.

Die gewonnenen Ergebnisse sprechen dafür, dass die RAP Homogenität unbedingt zu gewährleisten und zu kontrollieren ist. Die Asphaltanalyse des Ausgangsmaterial zeigt gute Homogenität hinsichtlich Bindemittelgehalt und Sieblinie, aber die Bitumenergebnisse haben zu der Schlussfolgerung geführt, dass es Unterschiede bei der Bindemittelhärte des Ausgangsmaterials gibt.

Mittels dem Ausbreitmaß für Gussasphalt wurde die Verarbeitbarkeit von den RAP Varianten geprüft. Die RAP Mischgüter zeigen bessere Verarbeitbarkeit wegen ihres höheren Bindemittelgehalts. Das heißt, dass Gussasphaltnischgüter mit RAP das Potential haben, bei niedrigeren Temperaturen eingebaut zu werden.

Die Versuche zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung (UCCT) haben bestätigt, dass die Zugabe an frischem Bitumen zu größeren Verformungen führt. Von dem TSRST Prüfprogramm konnte festgestellt werden, dass Bruchtemperaturen die Grenze von  $-28,4\text{ °C}$  ( $\text{TSRST}_{\text{max-25}}$ ) erreichen, die keine Optimierung mehr in Richtung Tieftemperaturverhalten lässt.  $\text{TSRST}_{\text{max-25}}$  ist die zweithöchste Anforderung für die Bruchtemperatur einer Deckschicht laut ÖNORM B3580-2 und diese Anforderung wird hier mit einem **RAP Anteil bis 98,9 M%** erfüllt.

Das MA 8 Referenzmischgut vom Kapitel 5 hat eine bleibende Verformung (UCCT) von  $-9\%$  und eine Bruchtemperatur von  $-27,5\text{ °C}$ . Wesentliches Ergebnis der Machbarkeitsstudie zum Recycling Potential von Gussasphalt ist die Variante T834 mit RAP Anteil von 98,9 M%, die eine höhere Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung (UCCT Ergebnis:  $-6\%$ ), höhere Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse (TSRST Ergebnis:  $-29,2\text{ °C}$ ) und bessere Verarbeitbarkeit als das MA 8 Referenzmischgut aus Kapitel 5 hat.

Es wurden die Korrelationen  $|G^*|$ ,  $G''$ ,  $G'$  und  $\Phi$  mit  $|\text{eps}_{\text{ax}}|$  (gewichtet) sowohl für die RAP Varianten als auch für alle Varianten von Kapitel 6 berechnet. Es konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass beide Prüfmethode gut korrelieren. Die Korrelationen haben gezeigt, dass es bei den Gussasphaltnischgütern einen guten Zusammenhang zwischen den Bindemittelkennwerten von der DSR Prüfmethode und den Asphaltenergebnisse für Beständigkeit bei hohen Temperaturen (UCCT) gibt und das unabhängig davon ob RAP verwendet wird, was eine wesentliche Erleichterung beim Mixdesign und der Qualitätskontrolle von Gussasphaltnischgütern mit RAP ist.

## 8 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

### Verarbeitbarkeit

Eines der Hauptziele der Doktorarbeit ist die Temperaturabsenkung von Gussasphalt. Um die Temperaturabsenkung bestimmen zu können, sollte zuerst die Verarbeitbarkeit der modifizierten Mischgüter gemessen werden. Bis zu diesem Zeitpunkt existiert noch kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt, deshalb wurden im Zuge dieser Dissertation zwei Prüfmethode entwickelt und im Kapitel 4 präsentiert. Die erste Methode ist die Bestimmung des Drehmoments durch die Verwendung eines großräumigen Gegenlaufzwangsmischers mit Messsystem. Die zweite Methode ist die Bestimmung des Ausbreitmaßes. Dabei wurde eine modifizierte Variante des Ausbreitversuchs für Frischbeton verwendet. Es wurde festgestellt, dass die durch den Ausbreitversuch ermittelten Einbautemperaturen deutlich besser mit der tatsächlichen Einbautemperaturen zusammenpassen. Das kann damit erklärt werden, dass der Gussasphalt in der Praxis durch Ausbreiten auf die Oberfläche verteilt wird. Das Drehmoment spielt eine Rolle im Asphaltkocher, in dem das Mischgut gerührt wird. Der Ausbreitmaßversuch für Gussasphalt bringt realitätsnähere Ergebnisse als die Drehmomentmessung. Die Versuchsdurchführung und die Auswertung sind einfacher. Die Prüfeinrichtung ist robuster, kostengünstiger und der Versuch kann direkt auf der Baustelle durchgeführt werden. **Daher wird es zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt empfohlen, in Zukunft den Ausbreitmaßversuch zu verwenden.**

### Optimierung der Temperaturabsenkung

Die Bestimmung der Verarbeitbarkeit hat eine Schlüsselrolle bei der Optimierung der Temperaturabsenkung von Gussasphalt gespielt. Damit wurde das Temperaturabsenkungspotential der modifizierten Mischgüter ermittelt. Es wurden verschiedene Methoden/Zusätze verwendet, um eine maximale Temperaturabsenkung bei gleichbleibendem Gebrauchsverhalten zu erreichen. Die verschiedenen Bitumenzusätze wurden sowohl auf Bitumen- als auch auf Asphaltenebene geprüft und auf beiden Ebenen hat Amidwachs besser als die anderen Zusätze abgeschnitten. **Mit der Kombination von Amidwachs und Rundkorn wurde die größte Temperaturabsenkung unter allen geprüften Mischgutvarianten und allen Gussasphalten erreicht.**

Hinsichtlich des Gebrauchsverhaltens kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sowohl die Referenzen als auch die modifizierten Mischgüter **eine hohe Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse** in Bezug auf die TSRST-Ergebnisse aufweisen. Die UCCT-Ergebnisse zeigen, dass die Variante mit dem höchsten Temperaturabsenkungspotential (RK 3%AW) **im Vergleich zur Referenz geringere oder gleiche Verformung** erreicht.

Um die verschiedenen Gussasphalte (MA 11, MA 8 und beide MA 4) besser miteinander zu vergleichen, wurden die drei Mischgutvarianten (Referenz, RK 4%AW, RK 3%AW) betrachtet. Wenn die Drehmomentmessungen verglichen werden, dann kann im Temperaturbereich 180 - 250 °C festgestellt werden, dass je feiner die Sieblinie desto kleiner die Drehmomente und damit die Temperaturanfälligkeit sind, obwohl die feinere Sieblinie mit härterem Bindemittel verwendet wurde. Die modifizierten MA 4 Gussasphalten haben die kleinste Temperaturabsenkung, was hauptsächlich von der feinen Sieblinie beeinflusst wird. Je kleiner die Gesteinskörnung desto weniger spielt ihre Form eine Rolle bei der Verarbeitbarkeit. In den MA 11 und MA 8 Diagrammen ist ein klarer Sprung zwischen modifizierten und nicht modifizierten Varianten zu sehen. Grund dafür ist sowohl die Kornform als auch die Zugabe von Wachs, die offensichtlich bei gröberen Sieblinien einen größeren Effekt haben. Wenn MA 8 und beide MA 4 Gussasphalte betrachtet werden, dann kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Unterschiede zwischen den Bitumenkennwerten im Vergleich zu den

Unterschieden zwischen den Sieblinien einen kleineren Einfluss auf die Optimierung haben. Die Mischgüter mit den feineren Sieblinien haben eine bessere Verarbeitbarkeit. Das gilt auch für MA 4 (Garage), das mit dem härtesten Bindemittel hergestellt worden ist. Die Methoden/Zusätzen zur Temperaturabsenkung haben einen kleineren Einfluss auf die Herstellungstemperatur bei den feineren Sieblinien.

Hinsichtlich des Gebrauchsverhaltens im Tieftemperaturbereich (TSRST-Ergebnisse) zeigt das Auskristallisieren des Wachsanteils, das eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit hervorruft [22], einen negativen Effekt nur bei dem Gussasphalt mit dem härtesten Bindemittel (MA 4 Garage). Die UCCT-Ergebnisse zeigen, dass MA 11 die größten Verformungen hat, gefolgt von MA 8 und MA 4. Die Sieblinie spielt offensichtlich eine Nebenrolle im Vergleich zur Bindemittelart bei der Beständigkeit gegen Verformung bei 50°C. Umgekehrt war der Fall bei der Bestimmung der Verarbeitbarkeit mit den Drehmomentmessungen. Das heißt, dass bei Temperaturen über 180°C (wo der Gussasphalt „flüssig“ ist) die Sieblinie entscheidender ist, und bei Temperaturen unter 50°C (wo der Gussasphalt ein Festkörper ist) die Bindemittelart. MA 4 Garage hat bessere Verarbeitbarkeit und bessere Verformungsbeständigkeit als MA 11 und MA 8. Das heißt, dass es bei MA 4 Garage das Potential besteht, weiches Bindemittel zu verwenden. So werden das Tieftemperaturverhalten und die Verarbeitbarkeit verbessert. **Es ist daher empfehlenswert feinere Gussasphalt-Rezepturen für Fahrbahnbeläge in der Praxis zu untersuchen.**

#### Großtechnische Umsetzung

Vier modifizierte MA 8 Mischgüter wurden für die großtechnische Umsetzung ausgewählt. Dabei wurden die Betrachtungsebenen Labor, Mischanlage und Baustelle berücksichtigt. Das Prüfprogramm wurde für alle Betrachtungsebenen wiederholt, damit es eine ausreichende Grundlage zum Vergleich gibt.

Von allen Asphaltproben und Betrachtungsebenen wurde Bitumen extrahiert und seine viskoelastischen Eigenschaften wurden mittels des Dynamic Shear Rheometer (DSR) untersucht. Beim Vergleich dieser Bitumenproben bestätigt sich, dass jene Proben, die einen Wachsanteil im Bindemittel aufweisen, insgesamt steifer sind als jene Proben, die kein Wachs enthalten. Zusätzlich zu den Bitumenversuchen wurde auch das Gebrauchsverhalten von den verschiedenen Mischgütern untersucht. Es konnte eine hohe Beständigkeit gegen Rissbildung bei niedrigen Temperaturen für alle Proben festgestellt werden. Bei der Beständigkeit gegen bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen ist die Verformung der modifizierten Varianten gleich oder kleiner als der Referenz. Die Proben mit Wachs führen zu den niedrigsten Werten. Im Rahmen der Asphaltversuche konnte ein sehr guter Zusammenhang zwischen Labor und Baustelle gefunden werden. **Das Prüfprogramm hat gezeigt, dass alle modifizierten Mischgutvarianten großtechnisch bei gleichbleibender Qualität hergestellt und eingebaut werden können.**

Am Ende des Prüfprogramms wurden die Ergebnisse von DSR und UCCT verglichen und es konnte ein direkter Zusammenhang festgestellt werden. Niedrigere komplexe Schubmoduln  $|G^*|$  führen zu größeren axialen Verformungen  $eps_{ax}$  und umgekehrt. Die Korrelation von  $eps_{ax}$  (*gewichtet*) und  $\Phi$  hat das höchste Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,870$  und es kann aus diesem Grund die Schlussfolgerung gezogen werden, dass  $eps_{ax}$  und  $\Phi$  gut korrelieren. **Das heißt, wenn die Gussasphaltrezepturen sich nur in ihrer Bindemittelhärte unterscheiden, kann mittels DSR die bleibende axiale Verformung auf Mischgutebene mit einer guten Genauigkeit vorhergesagt werden.** Diese Erkenntnis lässt sich damit erklären, dass der Gussasphalt auf dem Mastix Konzept aufgebaut ist. Er hat einen hohen Bindemittel- und Mastixgehalt, keine Hohlräume und die Zuschlagstoffe „schwimmen“ im Mastix.

### Emissions- und Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen der Einbauarbeiten auf der Baustelle wurden gesundheitsrelevante Emissionen gemessen und ihre Veränderung durch die Temperaturabsenkung untersucht. Bei der umfassenden Emissionsanalyse hat sich gezeigt, dass deutliche Unterschiede in der Emission zwischen den untersuchten Mischungen/Einbautemperaturen bestehen und **eine Emissionsreduktion von ca. 80 % durch eine Temperaturabsenkung mit 50°C möglich ist**. Da die Emissionen gesundheitsschädlich sind, ist es entscheidend, den Gussasphalt zukünftig bei niedrigeren Temperaturen herzustellen und einzubauen.

Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen temperaturabgesenkter Gussasphalte wurden anhand von Emissions-, Energie- und Kostenanalysen untersucht und über den Lebenszyklus bilanziert. Auf der Emissionsebene und Energieebene konnten Einsparungen von jeweils 33% der Gesamtemissionen und 14% des Gesamtenergieverbrauchs berechnet werden, wenn die Produktionstemperatur um 50°C abgesenkt wird. Auf Kostenebene führt die Wachszugabe trotz der Temperaturabsenkung zu höheren Kosten. Eine Optimierung der Herstellungs- und Einbautemperatur mit einer Reduktion der Wachszugabe ist also empfehlenswert. Es soll zusätzlich berücksichtigt werden, ob die höheren Kosten durch Wachszugabe oder den Arbeitnehmerschutz relevanter sind und welchen direkten und indirekten Einfluss das Wachs auf die Umwelt hat.

### Machbarkeitsstudie zum Recycling Potential von Gussasphalt

Die Arbeit im Rahmen der Gussasphaltoptimierung hat zu den Gedanken geführt, dass die Wiederverwendung von Gussasphalt unkomplizierter als die von Walzasphalt funktionieren sollte. Hauptprobleme bei der Wiederverwendung von Asphaltmischgütern sind das harte (gealterte) Bindemittel und die Änderungen (Verfeinerung) in der Sieblinie in Folge der Fräsarbeiten. Diese Nachteile für Walzasphalte können als Vorteile für den Gussasphalt angesehen werden. Gussasphalte werden in der Regel mit einem härteren Bitumen hergestellt. Die Sieblinie ist grundsätzlich füllereich vorgesehen. Als Zusatz zum RAP wird lediglich frisches Bitumen als Verjüngungsmittel eingesetzt.

Mittels dem Ausbreitmaß für Gussasphalt wurde die Verarbeitbarkeit von verschiedenen Varianten mit RAP geprüft. Die RAP Mischgüter haben bessere Verarbeitbarkeit wegen des höheren Bindemittelgehalts gezeigt. Das heißt, dass Gussasphaltmischgüter mit RAP das Potential haben, bei niedrigeren Temperaturen eingebaut zu werden. Die Versuche zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung (UCCT) haben bestätigt, dass die Zugabe an frischem Bitumen zu größeren Verformungen führt. Bei den TSRST Prüfungen konnte festgestellt werden, dass Bruchtemperaturen die Grenze von  $-28,4\text{ °C}$  ( $\text{TSRST}_{\text{max-25}}$ ) erreichen, die keine Optimierung mehr in Richtung Tieftemperaturverhalten lässt.  $\text{TSRST}_{\text{max-25}}$  ist die zweithöchste Anforderung für die Bruchtemperatur einer Deckschicht laut ÖNORM B3580-2 und diese Anforderung wird hier mit einem RAP Anteil bis 98,9 M% erfüllt.

Das MA 8 Referenzmischgut vom Kapitel 5 hat eine bleibende Verformung (UCCT) von  $-9\%$  und eine Bruchtemperatur von  $-27,5\text{ °C}$ . Wesentliches Ergebnis von der Machbarkeitsstudie zum Recycling Potential von Gussasphalt ist die Variante T834 mit RAP Anteil von 98,9 M%, die eine höhere Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung (UCCT Ergebnis:  $-6\%$ ), höhere Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse (TSRST Ergebnis:  $-29,2\text{ °C}$ ) und bessere Verarbeitbarkeit als das MA 8 Referenzmischgut vom Kapitel 5 hat. **Das ist ein Beweis, dass Wiederverwendung von Gussasphalt ein hohes Potential hat, das benutzt werden soll. Es ist an erster Stelle also empfehlenswert, die Regelwerke anzupassen und die Verwendung von RAP im Gussasphalt zuzulassen.**

Wie bei der großtechnischen Umsetzung wurden auch hier DSR-UCCT Korrelationen gemacht. Es wurden die Korrelationen  $|G^*|$ ,  $G''$ ,  $G'$  und  $\Phi$  mit  $|\text{eps\_ax}|$  (gewichtet) sowohl für die RAP Varianten als auch für alle Varianten von Kapitel 6 berechnet. Es konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass beide Prüfmethoden gut korrelieren. **Die Korrelationen haben gezeigt, dass es bei den Gussasphaltemischgütern einen guten Zusammenhang zwischen den Bindemittelkennwerten von der DSR Prüfmethode und den Asphaltergebnisse für Beständigkeit bei hohen Temperaturen (UCCT) gibt und das unabhängig davon, ob RAP verwendet wird, was eine wesentliche Erleichterung beim Mixdesign und der Qualitätskontrolle von Gussasphaltemischgütern mit RAP sein kann.**

#### Ausblick

Das Hauptziel, die Temperaturabsenkung von Gussasphalt, wurde erreicht und das hat drei wesentliche Vorteile mit sich gebracht:

- Neue Optimierungsmethoden für Gussasphalt
- Emissionsreduktion
- Ressourcenschonung

Es wurden verschiedene modifizierte Mischgutvarianten entwickelt, die ihre Vorteile sowohl im Labor als auch im Feld gezeigt haben. Sie haben das technische Wissen zur Optimierung von Gussasphalt erweitert und es soll im Rahmen der zukünftigen Arbeit mit diesem Asphaltmischgut genutzt und weiter ausgebaut werden. Die modifizierten Mischgutvarianten haben zu einer wesentlichen Emissionsreduktion geführt. Eine Emissionsreduktion bedeutet einen höheren Arbeitsschutz und niedrigere Umweltbelastung. Während der Effekt auf die Umweltbelastung weiter erforscht werden muss, hat sich klar gezeigt, dass die Arbeitssicherheit signifikant positiv beeinflusst wird. Die Ressourcenschonung wurde durch die Machbarkeitsstudie zum Recycling Potential von Gussasphalt untersucht und sie hat gezeigt, dass die Wiederverwendung von Gussasphalt ein großes Potential hat. Die Regelwerke verbieten den Einsatz von Ausbauasphalt beim Gussasphalt und diese Arbeit ist eine Motivation, das zu ändern. Dazu sind großtechnische Versuche zum Recycling von Gussasphalt notwendig, um die Umsetzbarkeit in die Praxis nachweisen zu können.

## 9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] CEN. EN 13108-6: Bituminous mixtures – Material specifications – Part 6: Mastic Asphalt. Brussels 2016.
- [2] Widyatmoko I, Elliott RC, Read JM. Development of heavy-duty mastic asphalt bridge surfacing, incorporating Trinidad Lake Asphalt and polymer modified binders. *Road Materials and Pavement Design*. 2005;6:469-83.
- [3] Medani TO, Hurman M, Liu XY, Scarpas A, Molenaar AAA. Describing the behaviour of two asphaltic surfacing materials for orthotropic steel deck bridges. *Proc Monogr Eng Wate*. 2007:1351-68.
- [4] Road Rehabilitation Energy Reduction Guide for Canadian Road Builders. Natural Resources Canada; 2005.
- [5] Hansen ES. Mortality of Mastic Asphalt Workers. *Scand J Work Env Hea*. 1991;17:20-4.
- [6] Ruhl R, Musanke U, Kolmsee K, Priess R, Breuer D. Bitumen emissions on workplaces in Germany. *J Occup Environ Hyg*. 2007;4:77-86.
- [7] Kriech AJ, Osborn LV. Review and implications of IARC monograph 103 outcomes for the asphalt pavement industry. *Road Materials and Pavement Design*. 2014;15:406-19.
- [8] Rühl R. Innovation eines Bauproduktes - Niedrigtemperaturasphalt. Gesprächskreis BITUMEN. 2003.
- [9] Radenberg M. Zwischenbilanz und Ausblick - Temperaturabsenkung bei Herstellung und Einbau von Asphalt. *Tiefbau 05/2007*, S 310-312. 2007.
- [10] Radenberg M. Temperaturabsenkung bei Asphalt – Grundlagen und Erfahrungen. *Tiefbau 05/2007*, S 310-312. 2007.
- [11] T. Butz, Rahimian I, Hildebrand G. Modifikation von Straßenbitumen mit Fischer-Tropsch-Paraffin. Fachartikel Bitumen. 2000.
- [12] Devivere M, Barthel W, Marchand J-P. Warm Asphalt Mixes by Adding Asphamin. Eurovia. 2001.
- [13] Drüschner L. Low Temperature Asphalt – Experience in Rolled Asphalt. Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna. 2004;report No. 198.
- [14] Frank S. Verfahren der Temperaturabsenkung - Modifizierungen für Bitumen und Asphalt. Fachartikel Straße+Autobahn. 2005.
- [15] D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J, Baumgardner G, Corrigan M, Cowsers T, et al. Warm Mix Asphalt: European Practice. US Department of Transportation and FHWA. 2008;Report No. FHWA-PL-08-007.
- [16] Biro S, Gandhi T, Amirkhanian S. Midrange Temperature Rheological Properties of Warm Asphalt Binders. *J Mater Civil Eng*. 2009;21:316-23.
- [17] Silva HMRD, Oliveira JRM, Peralta J, Zoorob SE. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Constr Build Mater*. 2010;24:1621-31.
- [18] Rubio MC, Martinez G, Baena L, Moreno F. Warm mix asphalt: an overview. *J Clean Prod*. 2012;24:76-84.
- [19] Wu CF, Zeng ML. Effects of Additives for Warm Mix Asphalt on Performance Grades of Asphalt Binders. *J Test Eval*. 2012;40:265-72.
- [20] Edwards Y, Tasdemir Y, Isacson U. Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures. *Cold Reg Sci Technol*. 2006;45:31-41.
- [21] Cardone F, Pannunzio V, Virgili A, Barbati S. An evaluation of use of synthetic waxes in warm mix asphalt. *Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials*, Vols 1 and 2. 2009:627-38.
- [22] Edwards Y. Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance. *Road Materials and Pavement Design*. 2009;10:313-35.
- [23] Merusi F, Giuliani F. Rheological characterization of wax-modified asphalt binders at high service temperatures. *Mater Struct*. 2011;44:1809-20.

- [24] Capitaio SD, Picado-Santos LG, Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Constr Build Mater.* 2012;36:1016-24.
- [25] Schwab O, Rechberger H, Hofko B. Evaluation of Environmental Performance and Life Cycle Costs of Construction Materials: The Case of Alternative Mastic Asphalt Mixes. 2016.
- [26] Silva HMRD, Oliveira JRM, Jesus CMG. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling.* 2012;60:38-48.
- [27] Volny D. Die analytische Methode zur Erstellung von Mischgutrezepturen für technische Asphalte. Wien, Österreich: TU Wien; 2005.
- [28] Crawford C. The Rocky Road of Mix Design. Hot Mix Design Technology - Winter 1989. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland, 1989. 1989.
- [29] Richerdson C. The Modern Asphalt Pavement. John Wiley & Sons, New York. 1908;Second Edition.
- [30] Belin P. Beobachtungen eines Straßenbauingenieurs. *BITUMEN* 2003;Heft 2/2003.
- [31] Washington Asphalt Pavement Association. WAPA Asphalt Pavement Guide.
- [32] Hveem FN. Gradation of Mineral Aggregates in Dense Graded Bituminous Mixtures. California Highways and public Works. 1941.
- [33] McKesson CL, Frickstad WN. Light asphaltic oil road surfaces: progress report of a cooperative investigation of intermediate road types. . Division of Highways, California Department of Public Works and the Bureau of Public Roads, US Department of Agriculture, Sacramento, . 1927.
- [34] Vallerga BA, Lovering WR. Evolution of the Hveem Stabilometer Method of Designing Asphalt Paving Mixtures. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists.* 1985;Volume 54.
- [35] White TD. Marshall Procedures for Design and Quality Control of Asphalt Mixtures. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists.* 1985;Volume 54.
- [36] Blab R. Analytische Methoden zur Modellierung der Verformungseigenschaften flexibler Fahrbahnaufbauten. . *Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung TU Wien,* . 2001;Heft 11, Wien.
- [37] CEN. EN 1426: Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration. Brussels2016.
- [38] CEN. EN 1427: Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and Ball method. Brussels2015.
- [39] CEN. ÖNORM EN 12593: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß. 2000.
- [40] Litzka J, Strobl R, Pass F, Augustin H. Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. *Schriftenreihe Straßenforschung.* 1999;Heft 479, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten.
- [41] Bellin P. Ergebnisse der amerikanischen SHRP-Forschung. *Straße + Autobahn* 5/96. 1986.
- [42] Brown SF. Introduction to Pavement Design. Bituminous Pavements Seminar. 1995.
- [43] FSV. RVS 08.97.05: Technical Contract Conditions, Requirements for Bituminous Mixtures. Vienna, Austria2015.
- [44] FGSV. Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen TL Asphalt-StB. 797. Bonn, Deutschland2013.
- [45] Renken P, Lobach T, Büchler S, Hagner T. Einfluss der Modifizierung von Bindemitteln durch Polymere und/oder Naturasphalt auf Stanfestigkeit, Kälteverhalten und Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Bonn: Bundesministerium für Verkehr; 2003.
- [46] Kast O. Standfestigkeit von Gussasphaltschichten unter extrem langsamem und schwerem Verkehr. Bonn-Bad Godesberg: Bundesminister für Verkehr; 1981.
- [47] Wang H, Li G. Study of factors influencing gussasphalt mixture performance. *Constr Build Mater.* 2015;101:193-200.
- [48] Hong-chang W, Guo-fen L. Study on high-temperature stability of composite gussasphalt concrete. *Materials Research Innovations.* 2015;19:S5-494-S5-9.
- [49] Luo S, Qian Z, Yang X, Wang H. Design of gussasphalt mixtures based on performance of gussasphalt binders, mastics and mixtures. *Constr Build Mater.* 2017;156:131-41.

- [50] DIN. DIN 52013 - Bestimmung der Duktilität. 2007.
- [51] CEN. EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). Brussels2012.
- [52] Xin C, Lu Q, Ai C, Rahman A, Qiu Y. Optimization of hard modified asphalt formula for gussasphalt based on uniform experimental design. *Constr Build Mater.* 2017;136:556-64.
- [53] Fan Liang, Wei Jianming, Hu Jiabo. Research on composition of qingchuan natural asphalt and structural parameters of asphaltene Technol Highway Transport. 2015;2:40-4.
- [54] CEN. EN 13302: Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus. Brussels2010.
- [55] Müller M, Dusha S. Konzeption von Gussasphalt - Betrachtungen zur quantitativen Bindemitteldosierung. Straße und Autobahn. 2017.
- [56] Sikinger T, Simmleit N, Mertens N. Einfaches Verfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Bitumen. 2001.
- [57] FGSV. Eindringtiefe an Gussasphaltwürfeln. 2001.
- [58] CEN. EN 12697-46: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. Brussels2012.
- [59] Rubach K. Hohlraumgehalt von Mineralstoffgemischen für Gussasphalt. *Asphalt.* 1994;1/91:43-4.
- [60] Blab R, Hessmann T. Generalsanierung Praterbrücke A23 - Südosttangente. 2013.
- [61] Schellenberg Kurt, Hans-Jörg E. Ansprache des Verformungswiderstandes von Gußasphalt mit dem dynamischen Eindringversuch mit ebenem Stempel - Weiterentwicklung und Bewertungshintergrund. Bundesministerium für Verkehr; 2000.
- [62] CEN. EN 12697 - 22 Spurbildungstest. 2007.
- [63] Chen J-S, Liao M-C, Huang C-C, Wang C-H. Fundamental Characterization of Engineering Properties of Gussasphalt Mixtures. *J Mater Civil Eng.* 2011;23:1719-26.
- [64] Ye H, Wang X, Fang N, Su Z. Low-Temperature Performance and Evaluation Index of Gussasphalt for Steel Bridge Decks. *Advances in Materials Science and Engineering.* 2019;2019:11.
- [65] Scholz W, Möhring R. Baustoffkenntnis. 2011.
- [66] CEN. EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton –Teil 5: Ausbreitmaß. 2009.
- [67] Bonzel J, Krell J. Konsistenzprüfung von Frischbeton. 1984.
- [68] CEN. EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreitmaß). 2007.
- [69] Hanzik V. Anwendung von Gussasphalt als hochwertige Verschleißschicht in Prag. Die Strasse1988.
- [70] Thomas Sikinger NS, Norbert Mertens. Einfaches Verfahren zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Bitumen. 2001.
- [71] Temperaturabsenkung FfS-uVA. Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt: M TA: FGSV; 2011.
- [72] Hofko B, Dimitrov M, Schwab O, Weiss F. High Efficient Low Emission Mastic Asphalt - Final Report. Vienna, Austria2015.
- [73] Hofko B, Dimitrov M, Schwab O, Weiss F, Rechberger H, Grothe H. Technological and environmental performance of temperature-reduced mastic asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design.* 2017;18:22-37.
- [74] Buisson J, Depierraz J, Rode P, Steenmans P, Veerman H. A Global Perspective. International Mastic Asphalt Association IMAA; 2013.
- [75] Rode P. Gussasphalt auf kommunalen Verkehrsflächen. 2016.
- [76] DAV Leitfaden Temperaturabgesenkte Asphalte. Deutscher Asphaltverband 2009.
- [77] Lechner C. Wachse in Kunststoffen – nicht nur Fließverbesserung. Clariant; 2012.
- [78] Mansfeld R, Barth R. Temperaturabgesenkte Asphalte. Bonn: Deutscher Asphaltverband e.V.; April 2009.
- [79] Zaumanis M. Warm Mix Asphalt Investigation. Technical university of Denmark; 2010.
- [80] Clariant. Licocene® PE 4201 granules.



- [81] BASF. LUWAX® WACHSE.
- [82] Romonta. Asphalt- und Bitumenmodifizierung.
- [83] Partl M. Asphalt & Bitumen. EMPA Schweiz.
- [84] Ölkers C. Asphalte mit viskositätsverändernden Zusätzen - 15 Jahre Praxis - Gestrata Journal - Folge 143. 2015.
- [85] Blab R, Eberhardsteiner L. Konstruktiver Straßenbau. 2016.
- [86] ÖNORM. ÖNORM B 3585-1: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Gussasphalt; Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-6. Austrian Standards, Wien; 2018.
- [87] ÖNORM. ÖNORM B 3585: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen -Gussasphalt - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-6. . Austrian Standards, Wien; 2012.
- [88] ÖNORM. ÖNORM B 3638: Technische Asphalte für den Straßenbau und verwandte Gebiete; Kugeleindruckprüfung von Gußasphalten. . Austrian Standards, Wien; 1987.
- [89] Pass F, Devivere M. Verfahren zur Herstellung von Gußasphalt. In: EUROVIA S.A. R-M, FR, editor.: Patentanwälte Gesthuysen, von Rohr & Eggert, 45128 Essen; 28.04.2004.
- [90] Walter R, Dorn P. Geologie von Mitteleuropa: Schweizerbart; 2007.
- [91] Murawski H, Mayer W. Geologisches Wörterbuch2010.
- [92] Bergman S. Lamproites and other potassium-rich igneous rocks: a review of their occurrence, mineralogy and geochemistry. eological Society, London, Special Publications,. 1987.
- [93] Pottgiesser T, Sommerhäuser M. Erste Überarbeitung der Steckbriefe der deutschen FLießgewässertypen. 2008.
- [94] CEN. EN 14771: Bitumen and bituminous binders - Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer (BBR). Brussels2012.
- [95] CEN. EN 12697-25: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test. Brussels2005.
- [96] Litzka J, Strobl R, Pass F, Augustin H. Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Strassenforschung. 1999.
- [97] DIN. DIN EN 12697-46: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen. Berlin2012.
- [98] aspha-min®. MHI Naturstein & Baustoffservice GmbH.
- [99] CEN. EN 12697-3: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer. Brussels2013.
- [100] Wagner M. Temperaturabgesenkte Asphalte, gebrauchsvorhaltensorientierte Untersuchungen an Bitumen und Asphalten: TU Wien; 2010.
- [101] Oner J, Sengoz B. Investigation of rheological effects of waxes on different bitumen sources. Road Materials and Pavement Design. 2017;18:1269-87.
- [102] FSV. RVS 02.01.12 Straßenverkehrszählung. 2015.
- [103] FSV. RVS 13.01.15: Pavement Management: Assessment Criteria for Conditioning Survey by RoadSTAR Measurements. Vienna, Austria2006.
- [104] FSV. RVS 11.06.71 Griffigkeitsmessungen mit dem Griptester. 2009.
- [105] Weiss F, Baloh P, Pfaller C, Cetintas EC, Kasper-Giebl A, Wonaschütz A, et al. Reducing paving emissions and workers' exposure using novel mastic asphalt mixtures. Building and Environment. 2018;137:51-7.
- [106] Dimitrov M, Hofko B, Weiss F, Spacek S. Innovative Mastic Asphalt - final report. 2018.
- [107] Merkblatt - Verwertung von Ausbausphalt. Österreichischer Baustoff-Recycling Verband; 2011.
- [108] FSV. RVS 08.97.05 Anforderungen an Asphaltmischgut. 2019.
- [109] FSV. RVS 11.03.22 Entscheidungshilfe bei der Verwertung von Asphaltgranulat für Asphaltmischgut. 2012.
- [110] FGSV. Merkblatt für die Weiderverwendung von Asphalt. 2013.
- [111] Leitfaden - Wiederverwenden von Asphalt. Deutscher Asphaltverband; 2014.

- [112] Buisson J, Depierrazz J, Rode P, Steenmans P, Veerman H. The Mastic Asphalt Industry - A Global Perspective. 2013.
- [113] Mastic asphalt – green, recyclable and an a+ performance every time. Mastic Asphalt Council MAC; 2017.

## 10 ANHANG

### 10.1 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: FORSCHUNGSKONZEPT UND FORSCHUNGSZIELE .....	12
ABBILDUNG 2: EMPIRISCHE METHODE DES ASPHALT MIX DESIGN [27, 42] .....	18
ABBILDUNG 3: ANALYTISCHE METHODE DES ASPHALT MIX DESIGN [27] .....	18
ABBILDUNG 4: GRENZSIEBLINIEN FÜR DIE GUSSASPHALTMISCHGÜTER MA 4, MA 8 UND MA 11 NACH RVS 08.97.05 [43] .....	20
ABBILDUNG 5: GRENZSIEBLINIEN FÜR DIE GUSSASPHALTMISCHGÜTER MA 5, MA 8 UND MA 11 NACH FGSV 797 [44]	21
ABBILDUNG 6: GRENZSIEBLINIEN: FSV UND FGSV VERGLEICH [43, 44] .....	22
ABBILDUNG 7: KORNGRÖßENVERTEILUNG MA 11 S [55] .....	23
ABBILDUNG 8: MA 11 AUSGANGSSIEBLINIE (ROT) UND OPTIMIERTE SIEBLINIE (LILA) [60] .....	25
ABBILDUNG 9: SOLL – SIEBLINIE MA 16; GRENZSIEBLINIEN MA 11 FSV (LINKS) UND FGSV (RECHTS) .....	26
ABBILDUNG 10: SOLL – SIEBLINIE MA 9,5 UND GRENZSIEBLINIEN NACH [47] (OBEN MITTIG); SOLL – SIEBLINIE MA 9,5 UND GRENZSIEBLINIEN FÜR MA 11 LAUT FSV (UNTEN LINKS); SOLL – SIEBLINIE MA 9,5 UND GRENZSIEBLINIEN FÜR MA 8 LAUT FSV (UNTEN RECHTS) .....	27
ABBILDUNG 11: SIEBLINIEN [64] .....	27
ABBILDUNG 12: SOLL – SIEBLINIE [45] UND GRENZSIEBLINIEN NACH FSV (LINKS) UND FGSV (RECHTS) .....	28
ABBILDUNG 13: SIEBLINIE DER MA 4 UND MA 8 .....	31
ABBILDUNG 14: LABORMISCHER MIT DREHMOMENTAUFNEHMER .....	33
ABBILDUNG 15: PRÜFEINRICHTUNG AUSBREITVERSUCH (QUELLE: RATIOTEC) .....	34
ABBILDUNG 16: PROBEFELD ZUR BESTIMMUNG DER TATSÄCHLICHEN EINBAUTEMPERATUR DER MODIFIZIERTEN MISCHGÜTER .....	35
ABBILDUNG 17: DREHMOMENTVERLÄUFE MA 4 .....	36
ABBILDUNG 18: DREHMOMENTVERLÄUFE MA 8 .....	36
ABBILDUNG 19: WIEDERHOLBARKEIT DREHMOMENTMESSUNGEN .....	37
ABBILDUNG 20: AUSBREITMAßVERLÄUFE MA 4 .....	38
ABBILDUNG 21: AUSBREITMAßVERLÄUFE MA 8 .....	39
ABBILDUNG 22: KORRELATION ZWISCHEN DREHMOMENT UND AUSBREITMAß .....	40
ABBILDUNG 23: VERGLEICH KORRELATION MA 4/MA8 .....	41
ABBILDUNG 24: BERECHNEN DER ÄQUIVISOSEN TEMPERATUR .....	42
ABBILDUNG 25: ABWEICHUNG EINBAUTEMPERATUREN LABOR - FELDMESSUNGEN .....	43
ABBILDUNG 26: GUSSASPHALT (LINKS), WALZASPHALT (RECHTS) .....	45
ABBILDUNG 27: KLASSIFIZIERUNG VON WACHSEN [77] .....	46
ABBILDUNG 28: MA 11 SIEBLINIE .....	54
ABBILDUNG 29: MA 8 SIEBLINIE .....	56
ABBILDUNG 30: SIEBLINIE MA 8 (-) FÜLLER .....	58
ABBILDUNG 31: MA 4 SIEBLINIE .....	59
ABBILDUNG 32: SIEBLINIE VON VARIANTE 2 (LINKS) UND VARIANTE 3 (RECHTS) .....	61
ABBILDUNG 33: PRINZIP DES RVS [54] .....	62
ABBILDUNG 34: BENDING BEAM RHEOMETER (BBR) UND MESSPRINZIP [95] .....	63
ABBILDUNG 35: BBR, DURCHBIEGUNG, STEIFIGKEIT, M-WERT [95] .....	64
ABBILDUNG 36: TSRST AUFBAU .....	64
ABBILDUNG 37: VERSUCHSSCHEMA DER ABKÜHLPRÜFUNG [96] .....	65
ABBILDUNG 38: UCCT AUFBAU .....	65

ABBILDUNG 39: DYNAMISCHE VISKOSITÄT BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN FÜR DAS GRUNDBITUMEN (PMB) UND FÜR VIER VERSCHIEDENE MODIFIKATIONEN MIT WACHSEN BEI FÜNF VERSCHIEDENEN WACHSGEHALTE ..68	68
ABBILDUNG 40: 30 M% PW MISCHUNG.....69	69
ABBILDUNG 41: DYNAMISCHE VISKOSITÄT BEI 245°C ZU VERSCHIEDENEN ADDITIVGEHALTE FÜR ALLE MODIFIZIERTEN VARIANTEN .....70	70
ABBILDUNG 42: ÄQUIVISCHE TEMPERATUR BEI 57,8 MPA*S ZU VERSCHIEDENEN ADDITIVGEHALTE FÜR ALLE MODIFIZIERTEN VARIANTEN .....71	71
ABBILDUNG 43: ERGEBNISSE TEMPERATURABSENKUNG BITUMENPRÜFUNGEN: ROTATIONALVISKOSIMETER .....71	71
ABBILDUNG 44: ERGEBNISSE BITUMENPRÜFUNGEN: BENDING BEAM RHEOMETER .....72	72
ABBILDUNG 45: MISCHMOMENT VS. TEMPERATUR FÜR DIE REFERENZ UND DIE WACHSMODIFIZIERTEN MA 11 MISCHGÜTER .....75	75
ABBILDUNG 46: MISCHMOMENT VS. TEMPERATUR FÜR DIE REFERENZ UND DIE MIT ZEOLITH MODIFIZIERTEN MA 11 MISCHGÜTER .....76	76
ABBILDUNG 47: MISCHMOMENT VS. TEMPERATUR FÜR DIE REFERENZ UND DIE MIT RUNDKORN MODIFIZIERTEN MISCHGÜTER .....77	77
ABBILDUNG 48: ERGEBNISSE TEMPERATURÄNDERUNG MA 11 MISCHGUTUNTERSUCHUNG – LABORMISCHER .....77	77
ABBILDUNG 49: VERGLEICH DER TEMPERATURÄNDERUNG AUF BITUMEN- UND MISCHGUTEBENE .....79	79
ABBILDUNG 50: BESTÄNDIGKEIT GEGEN RISSBILDUNG BEI TIEFEN TEMPERATUREN (TSRST) .....80	80
ABBILDUNG 51: BESTÄNDIGKEIT GEGEN VERFORMUNG BEI HOHEN TEMPERATUREN (UCCT).....80	80
ABBILDUNG 52: MISCHMOMENT VS. TEMPERATUR FÜR DIE REFERENZ UND DIE KK-MISCHGÜTER.....83	83
ABBILDUNG 53: MISCHMOMENT VS. TEMPERATUR FÜR DIE REFERENZ UND DIE RK-MISCHGÜTER.....84	84
ABBILDUNG 54: ERGEBNISSE TEMPERATURÄNDERUNG MA 8 MISCHGUTUNTERSUCHUNG – LABORMISCHER .....85	85
ABBILDUNG 55: MA 8 BESTÄNDIGKEIT GEGEN RISSBILDUNG BEI TIEFEN TEMPERATUREN (TSRST).....86	86
ABBILDUNG 56: BESTÄNDIGKEIT GEGEN VERFORMUNG BEI HOHEN TEMPERATUREN (UCCT).....87	87
ABBILDUNG 57: MISCHMOMENT VS. TEMPERATUR FÜR ALLE VARIANTEN.....89	89
ABBILDUNG 58: ERGEBNISSE TEMPERATURÄNDERUNG MA 4 GARAGENMISCHGUT MISCHGUTUNTERSUCHUNG – LABORMISCHER .....90	90
ABBILDUNG 59: MA 4 BESTÄNDIGKEIT GEGEN RISSBILDUNG BEI TIEFEN TEMPERATUREN (TSRST).....90	90
ABBILDUNG 60: BESTÄNDIGKEIT GEGEN VERFORMUNG BEI HOHEN TEMPERATUREN (UCCT).....91	91
ABBILDUNG 61: MISCHMOMENT VS. TEMPERATUR FÜR ALLE VARIANTEN.....93	93
ABBILDUNG 62: ERGEBNISSE TEMPERATURÄNDERUNG MA 4 GEHSTEIGMISCHGUT MISCHGUTUNTERSUCHUNG – LABORMISCHER .....94	94
ABBILDUNG 63: MA 4 BESTÄNDIGKEIT GEGEN RISSBILDUNG BEI TIEFEN TEMPERATUREN (TSRST).....94	94
ABBILDUNG 64: BESTÄNDIGKEIT GEGEN VERFORMUNG BEI HOHEN TEMPERATUREN (UCCT).....95	95
ABBILDUNG 65: DREHMOMENTVERLÄUFE VON MA 11 (OBEN LINKS), MA 8 (OBEN RECHTS), MA 4 GARAGE (UNTEN LINKS) UND MA 4 GEHSTEIG (UNTEN RECHTS) .....96	96
ABBILDUNG 66: VERGLEICH TEMPERATURABSENKUNG.....97	97
ABBILDUNG 67: VERGLEICH BRUCHTEMPERATUREN .....97	97
ABBILDUNG 68: VERGLEICH BLEIBENDE VERFORMUNGEN .....98	98
ABBILDUNG 69: SCHEMA PROBESTRECKE .....103	103
ABBILDUNG 70: LETZTER EINBAUTAG .....104	104
ABBILDUNG 71: BINDEMittelGEHALT .....107	107
ABBILDUNG 72: FÜLLERGEHALT .....107	107
ABBILDUNG 73: FÜLLER/BITUMEN VERHÄLTNIS .....108	108
ABBILDUNG 74: SIEBLINIEN .....108	108
ABBILDUNG 75: BESTIMMUNG DER PENETRATION [0,1MM] .....109	109

ABBILDUNG 76: BESTIMMUNG DES ERWEICHUNGSPUNKTES RUK [°C] .....	110
ABBILDUNG 77: DSR LABOR.....	111
ABBILDUNG 78: KOMPLEXER SCHUBMODUL  G*  UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ BEI 4 °C UND 1,592 HZ (LINKS), UND 52 °C UND 1,592 HZ (RECHTS) .....	111
ABBILDUNG 79: VERGLEICH FRISCHES BITUMEN VS. EXTRAHIERTES BITUMEN .....	112
ABBILDUNG 80: DSR MISCHANLAGE .....	112
ABBILDUNG 81: KOMPLEXER SCHUBMODUL  G*  UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ BEI 4 °C UND 1,592 HZ (LINKS), UND 52 °C UND 1,592 HZ (RECHTS) .....	113
ABBILDUNG 82: DSR BAUSTELLE .....	113
ABBILDUNG 83: KOMPLEXER SCHUBMODUL  G*  UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ BEI 4 °C UND 1,592 HZ (LINKS), UND 52 °C UND 1,592 HZ (RECHTS) .....	114
ABBILDUNG 84: ERGEBNISSE – TSRST; MA 8 LABOR .....	114
ABBILDUNG 85: ERGEBNISSE – TSRST; MA 8 MISCHANLAGE.....	115
ABBILDUNG 86: ERGEBNISSE – TSRST; MA 8 BAUSTELLE.....	116
ABBILDUNG 87: ERGEBNISSE – UCCT; MA 8 LABOR .....	116
ABBILDUNG 88: ERGEBNISSE – UCCT; VERGLEICH MA 8 LABOR - MISCHANLAGE.....	117
ABBILDUNG 89: ERGEBNISSE – UCCT; MA 8 BAUSTELLE.....	118
ABBILDUNG 90: ERGEBNISSE – UCCT; MA 8 VERGLEICH LABOR - BAUSTELLE.....	118
ABBILDUNG 91: KORRELATION .....	120
ABBILDUNG 92: VERKEHRSZÄHLUNG.....	121
ABBILDUNG 93: QUEREbenenHEITSMESSUNG MIT DEM PLANUM.....	122
ABBILDUNG 94: ÜBERSICHTSPLAN DER MESSUNGEN MIT DEM PLANUM .....	122
ABBILDUNG 95: DEFINITION DER QUEREbenenHEITSWERTE.....	122
ABBILDUNG 96: GRIPTESTER MK II (LABOR TU WIEN) .....	124
ABBILDUNG 97: MESSERGEBNISSE GRIP TESTER 2016 (LINKS) UND 2017 (RECHTS).....	124
ABBILDUNG 98: VERGLEICH ZWISCHEN DEN 2016 UND 2017 MESSERGEBNISSEN .....	125
ABBILDUNG 99: SPEKTRUM VON WACHS, KONVENTIONELLEM UND MODIFIZIERTEM BITUMEN; EINSATZ RECHTS OBEN IST FOKUSIERT AUF DIE FÜR DAS WACHS RELEVANTEN PEAKS .....	126
ABBILDUNG 100: HINTERGRUNDMESSUNGEN WÄHREND DER BAUARBEITEN AN DER OBERDORFSTRAÙE; GRÜN: AUTOMATISCHER PM10 SAMPLER; BLAU: MESSSTELLE DER STADT WIEN IN STADLAU .....	128
ABBILDUNG 101: PARTIKELGRÖÙENVERTEILUNG WÄHREND DER BAUARBEITEN AN DER OBERDORFSTRAÙE; DIE NIEDRIGSTE TEMPERATUR KONNTE AUFGRUND DER ZU NIEDRIGEN GESAMMELTEN MASSE IN DEN EINZELNEN STUFEN NICHT AUSGEWERTET WERDEN. ....	128
ABBILDUNG 102: ERGEBNISSE PM10 FILTERSAMPLER .....	129
ABBILDUNG 103: STRUKTUR DES LEBENSZYKLUS VON GUSSASPHALT; INSGESAMT UMFASST DER ZYKLUS FÜNF VERSCHIEDENE PHASEN .....	130
ABBILDUNG 104: ANTEILE DER EINZELNEN LEBENSZYKLUSPHASEN AM GESAMTENERGIEVERBRAUCH .....	131
ABBILDUNG 105: ANTEILE DER EINZELNEN LEBENSZYKLUSPHASEN AN DEN GESAMTKOSTEN .....	132
ABBILDUNG 106: ANTEILE DER EINZELNEN LEBENSZYKLUSPHASEN AN DEN GESAMTEMISSIONEN (PM10) .....	133
ABBILDUNG 107: GRAPHISCHE AUFBEREITUNG DER INPUTGRÖÙEN FÜR EINE BESTIMMTE EBENE MITHILFE DER SOFTWARE STAN. LINKS: ENERGIEFLUSSANALYSE FÜR DIE REFERENZ (GJ/FU); RECHTS: DIE KOSTENEbene DER REFERENZ (€/FU).....	134
ABBILDUNG 108: ASPHALTANALYSE; BINDEMittelGEHALT .....	141
ABBILDUNG 109: ASPHALTANALYSE; FÜLLERGEHALT.....	141
ABBILDUNG 110: FÜLLER/BITUMEN VERHÄLTNIß [-].....	142

ABBILDUNG 111: SIEBLINIEN; RAP (LINKS) UND RAP + FRISCHES BITUMEN (RECHTS) .....	142
ABBILDUNG 112: BESTIMMUNG DER PENETRATION [1/10 MM].....	143
ABBILDUNG 113: BESTIMMUNG DES ERWEICHUNGSPUNKTES RUK [°C].....	144
ABBILDUNG 114: KOMPLEXER SCHUBMODUL $ G^* $ UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ BEI 1,592 HZ FÜR DIE RAP PROBEN .....	144
ABBILDUNG 115: KOMPLEXER SCHUBMODUL $ G^* $ UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ 1,592 HZ FÜR DIE PROBEN MIT BITUMEN 70/100 .....	145
ABBILDUNG 116: KOMPLEXER SCHUBMODUL $ G^* $ UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ BEI 4 °C UND 1,592 HZ (LINKS), UND 52 °C UND 1,592 HZ (RECHTS) FÜR DIE PROBEN MIT BITUMEN 70/100.....	145
ABBILDUNG 117: KOMPLEXER SCHUBMODUL $ G^* $ UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ 1,592 HZ FÜR DIE PROBEN MIT BITUMEN 160/220 .....	146
ABBILDUNG 118: KOMPLEXER SCHUBMODUL $ G^* $ UND PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL $\Phi$ BEI 4 °C UND 1,592 HZ (LINKS), UND 52 °C UND 1,592 HZ (RECHTS) FÜR DIE PROBEN MIT BITUMEN 160/220.....	146
ABBILDUNG 119: RAP VERARBEITBARKEIT .....	147
ABBILDUNG 120: UCCT ERGEBNISSE; 70/100 LINKS UND 160/220 RECHTS .....	148
ABBILDUNG 121: TSRST; RAP + 70/100 (LINKS); RAP + 160/220 (RECHTS).....	149
ABBILDUNG 122: KORRELATION DSR VS UCCT VON DEN RAP MISCHGÜTERN .....	151
ABBILDUNG 123: KORRELATION RAP + FRISCHES BITUMEN VS. ERGEBNISSE VOM KAPITEL 6.....	152

## 10.2 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: EMPFOHLENE REZEPTUR [46] .....	25
TABELLE 2: EMPFOHLENE KORNGRÖßENVERTEILUNG GEMÄß [45] .....	28
TABELLE 3: MERKMALE DES BINDEMITTELS .....	31
TABELLE 4: MA 4 REZEPTUR DER VIER BETRACHTETEN VARIANTEN.....	32
TABELLE 5: MA 8 REZEPTUR DER VIER BETRACHTETEN VARIANTEN.....	32
TABELLE 6: ERGEBNISSE STREICHVERSUCH .....	41
TABELLE 7: ERMITTELTEN EINBAUTEMPERATUREN MITTELS MISCHMOMENT – MESSUNGEN UND AUSBREITMAß - MESSUNGEN .....	42
TABELLE 8: BINDEMittelKENNWerte PMB 25/55-65 .....	52
TABELLE 9: BINDEMittelKENNWerte 90/10 .....	52
TABELLE 10: BINDEMittelKENNWerte 70/100.....	53
TABELLE 11: MA 11 MISCHGUTVARIANTEN .....	55
TABELLE 12: MA 11 REZEPTUREN DER VARIANTEN MIT WACHSMODIFIKATION .....	55
TABELLE 13: MA 11 REZEPTUREN DER VARIANTEN MIT ZEOLITHEN.....	56
TABELLE 14: MA 11 REZEPTUREN DER VARIANTEN MIT RUNDKORN .....	56
TABELLE 15: BINDEMittelKENNWerte.....	57
TABELLE 16: MA 8 MISCHGUTVARIANTEN .....	57
TABELLE 17: MA 8 REZEPTUREN DER VARIANTEN MIT KK UND KKRK.....	58
TABELLE 18: MA 8 REZEPTUR DER VARIANTEN MIT RUNDKORN .....	58
TABELLE 19: MA 8 REZEPTUR DER VARIANTE MA8 (-)FÜLLER.....	58
TABELLE 20: BINDEMittelKENNWerte.....	59
TABELLE 21: MA 4 (GARAGE) MISCHGUTVARIANTEN.....	60
TABELLE 22: MA 4 GARAGENMISCHGUT REZEPTUR DER VIER BETRACHTETEN VARIANTEN .....	60
TABELLE 23: MISCHGUTVARIANTEN .....	61

TABELLE 24: MA 4 GEHSTEIGMISCHGUT REZEPTUREN DER VIER BETRACHTETEN VARIANTEN .....	61
TABELLE 25: PRÜFPROGRAMM RV .....	66
TABELLE 26: PRÜFPROGRAMM BBR .....	67
TABELLE 27: MISCHBEDINGUNGEN BITUMENPROBEN .....	67
TABELLE 28: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE DREHMOMENTMESSUNGEN MIT GUSSASPHALT MA 11 .....	73
TABELLE 29: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE TSRST-VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 11 .....	73
TABELLE 30: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE UCCT – VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 11 .....	74
TABELLE 31: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE DREHMOMENTMESSUNGEN MIT GUSSASPHALT MA 8 .....	81
TABELLE 32: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE TSRST - VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 8 .....	82
TABELLE 33: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE UCCT-VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 8 .....	82
TABELLE 34: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE DREHMOMENTMESSUNGEN MIT GUSSASPHALT MA 4 GARAGE .....	88
TABELLE 35: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE TSRST-VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 4 GARAGE .....	88
TABELLE 36: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE UCCT-VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 4 GARAGE .....	88
TABELLE 37: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE DREHMOMENTMESSUNGEN MIT GUSSASPHALT MA 4 GARAGE .....	92
TABELLE 38: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE TSRST - VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 4 GARAGE .....	92
TABELLE 39: PRÜFPROGRAMM FÜR DIE UCCT - VERSUCHE MIT GUSSASPHALT MA 4 GARAGE .....	92
TABELLE 40: HERSTELLUNGSTEMPERATUREN .....	101
TABELLE 41: ERGEBNISSE STREICHVERSUCH .....	102
TABELLE 42: TEMPERATURMESSUNG BAUSTELLE .....	104
TABELLE 43: PROBEENTNAHME BAUSTELLE .....	105
TABELLE 44: PRÜFPROGRAMM .....	106
TABELLE 45: KORREKTURFAKTOREN $K$ FÜR DIE VERSCHIEDENEN BETRACHTUNGSEBENEN .....	119
TABELLE 46: ERGEBNISSE DER MESSUNGEN MIT DEM PLANUM IM NOVEMBER 2016 UND 2017 .....	123
TABELLE 47: MESSBEDINGUNGEN - ÜBERSICHT .....	124
TABELLE 48: ABSOLUTE EMISSION VON 4 GUSSASPHALTEN IN LABORSTUDIE 2 .....	127
TABELLE 49: PARTIKELEMISSIONSDATEN DER FELDMESSUNG AN DER OBERDORFSTRAÙE; PROZENTUALE WERTE IMMER BEZOGEN AUF DIE REFERENZMISCHUNG .....	129
TABELLE 50: ZUSAMMENFASSUNG DER BERECHNETEN GESAMTENERGIEVERBRÄUCHE INKLUSIVE EINSPARUNGSPOTENTIAL .....	130
TABELLE 51: GEGENÜBERSTELLUNG DER ERMITTELTEN GESAMTKOSTEN .....	131
TABELLE 52: GEGENÜBERSTELLUNG DER ERMITTELTEN PARTIKELEMISSIONEN (PM-10) INKLUSIVE EINSPARUNGSPOTENTIAL .....	132
TABELLE 53: BINDEMITTELKENNWERTE 70/100 UND 160/220 .....	138
TABELLE 54: TABELLE SOLL - UND IST – BINDEMITTELGEHALT UND RAP-ANTEIL IN M [%] .....	138
TABELLE 55: PRÜFPROGRAMM ASPHALTANALYSE UND BITUMENELENE .....	139
TABELLE 56: PRÜFPROGRAMM ASPHALTELENE .....	140
TABELLE 57: KORREKTURFAKTOREN $K$ FÜR DIE VERSCHIEDENEN VARIANTEN .....	150