

Diplomarbeit

Prüfung des Tieftemperaturverhaltens von Asphalt und Mastix unter Einbeziehung von Korrelationsanalysen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Assessment of the low-temperature performance of asphalt mixtures and asphalt mastic and correlation analysis

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Lukas Kohl, BSc

Matr.Nr.: 11938277

Betreuung: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Bernhard Hofko**
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E230-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Dezember 2025

Kurzfassung

Asphalt in Straßen ist allen erdenklichen Witterungseinflüssen ausgesetzt. Verschiedene Formen von Niederschlag sowie unzählige Kombinationen aus Temperatur, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung wirken binnen der ganzen Lebensdauer auf Asphalt ein. Zudem gibt es Belastungen durch Verkehr, chemische Stoffe und sogar Pflanzen, die den Asphalt beschädigen können.

Das Abkühlen des Asphalts kann zu Rissen an der Oberfläche führen, die sich in weiterer Folge durch das Frieren von eingedrungenem Wasser vergrößern. Sobald diese zu groß sind, muss der Asphalt instandgesetzt oder erneuert werden. Aus diesem Grund ist es essenziell, das Tieftemperaturverhalten im Vorhinein abschätzen zu können. Es gibt diverse Prüfmethode, welche dieses Verhalten im Labor untersuchen, doch diese nehmen zum Teil viel Zeit in Anspruch. Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob das Tieftemperaturverhalten durch Berechnungen vorhergesagt werden kann. Außerdem wird untersucht, welche Änderungen an der Mischgutrezeptur zu positiven oder negativen Auswirkungen führen.

Zuerst wurden neun verschiedene Mischgüter hergestellt. Jedes davon enthält eine einzige Änderung zur Ausgangs-Variante. Mithilfe des Abkühlversuchs wurden die klassischen Prüfergebnisse jedes Mischgut ermittelt. Anschließend folgte eine genauere Analyse der Spannungsverläufe, um bedeutende Charakteristika der Graphen zu untersuchen. Dafür wurden die Spannungsverläufe von jeweils drei Probekörpern pro Mischgut gemittelt und ausgewertet. Zusätzlich wurden Versuche an den verwendeten Bindemitteln und Mastix-Proben durchgeführt. Anschließend kamen Regressionen zum Einsatz, um die Zusammenhänge der gewonnenen Daten zu überprüfen. Als erstes wurden die Ergebnisse des Abkühlversuchs mit den Ergebnissen der Mastixversuche modelliert. Danach wurden erneut die Ergebnisse des Abkühlversuchs modelliert, nun aber auf Basis vieler verschiedener Versuchsergebnisse und Rezeptur-Kenngrößen.

Die Auswertung des Abkühlversuchs zeigte zum Teil deutliche Unterschiede der verschiedenen Mischgüter. Speziell die Verwendung eines härteren Bitumens oder aber das drastische Reduzieren des Füllergehalts führen zu einem schlechteren Ergebnis der Bruchtemperatur. Eine Verbesserung konnte durch die Erhöhung des Füllergehalts und durch die Verringerung des Größtkorns erzielt werden. Das Entfernen von Kalkhydrat hat leicht negative Auswirkungen auf die Bruchtemperatur. Das Tieftemperaturverhalten von Mastix zeigte zum Teil ähnliche, aber auch entgegengesetzte Resultate. Das härtere Bitumen senkt das Relaxationsvermögen, wodurch sich das Kälteverhalten verschlechtert. Durch das Entfernen von Kalkhydrat und durch die Reduktion des Füllergehalts wird die Relaxation positiv beeinflusst.

Analysen der Regressionen konnten belegen, dass einfach lineare Zusammenhänge zwischen dem Tieftemperaturverhalten von Asphalt und Mastix bestehen. Diese sind jedoch begrenzt und betreffen nur den Spannungsverlauf im Abkühlversuch. Die Berücksichtigung von weiteren Material- und Rezeptur-Parametern führt zu teils noch stärkeren Abhängigkeiten. Insbesondere die Bruchtemperatur korreliert mit dem Verhältnis von Bitumen : Füller und mit dem komplexen Schermodul des verwendeten Bitumens.

Die weiterführende Forschung und Überprüfung der gewonnenen Modelle könnte es ermöglichen, das Tieftemperaturverhalten von Asphalt mit entsprechender Genauigkeit zu prognostizieren.

Abstract

Asphalt pavements are exposed to every conceivable weather condition. Different forms of precipitation, as well as countless combinations of temperature, humidity and sunlight, affect asphalt during its whole lifespan. Furthermore, exposure to traffic, chemical substances and even plants can damage the asphalt.

The cooling of asphalt can lead to cracks on the surface, which enlarge due to the freezing of penetrated water. Once these cracks become too large, the asphalt must be repaired or renewed. For this reason, it is essential to be able to estimate the low-temperature performance in advance. Several test methods exist to investigate this behaviour, but some of them are very time-consuming. This thesis addresses whether the low-temperature performance can be predicted by calculations. In addition, it studies which adjustments of the asphalt mix design lead to positive or negative consequences.

First of all, nine different asphalt mixtures were produced. Each contains one adaption compared to the reference mixture. The typical test results were obtained using the thermal stress restrained specimen test (TSRST). Afterwards, a more specific analysis of the stress curve followed to consider key characteristics of the graphs. Therefore, the stress curves of three specimens per mix were averaged and evaluated. Additionally, tests were conducted on all binders and mastic samples used. Subsequently, regression analysis was used to check for correlations between the previously acquired data. First, the results of the TSRST were modelled using the results of the mastic-tests. In a second step, the results of the TSRST were modelled again, but this time many different test results and mix design parameters were used.

The evaluation of the TSRST showed clear differences between the asphalt mixtures. Especially by using a harder bitumen or a major reduction of filler content a worse failure temperature was obtained. Improvements were achieved by increasing the amount of filler and by lowering the maximum aggregate size. The removal of hydrated lime has slightly negative effects on the failure temperature. Partially the mastics tests showed similar results, but also some contrasting results. A harder binder decreases the ability of relaxation. As a consequence, the low-temperature performance declines. Removing hydrated lime and reducing the filler amount positively influences relaxation.

Analyses of all regressions could prove that simple linear correlations exist between the low-temperature performance of asphalt and mastic. However, these correlations are limited and only concern the stress curve of the TSRST. By including more material and mix design parameters, even stronger correlations were obtained in some cases. The failure temperature correlates especially with the ratio of bitumen : filler and with the complex shear modulus of the bitumen used.

Further research and validation of all derived models could enable the prediction of the low-temperature performance with appropriate accuracy.

Abkürzungen

AX Asphaltprobe mit der Nummer X

Bas Basalt

BBR Biegebalkenrheometer

BM Bindemittel

BX Bitumenprobe mit der Nummer X

DSR Dynamisches Scherrheometer

EP Erweichungspunkt

GK Größtkorn

GVO gebrauchsvorhaltensorientiert

Ker Kersantit

KH Kalkhydrat

KSM Kalksteinmehl

MX Mastixprobe mit der Nummer X

Pen Penetration

PmB Polymermodifiziertes Bitumen

Relax Relaxationsversuch für Bitumen und Mastix

RT Relaxation Test – Relaxationsversuch für Asphalt

RTFOT Rolling Thin Film Oven Test

TCT Tensile Creep Test – Zugkriechversuch

TSRST Thermal Stress Restrained Specimen Test – Abkühlversuch

UCTST Uniaxial Cyclic Tension Stress Test – Einachsiger zyklischer Zugversuch

UTST Uniaxial Tension Stress Test – Direkter Zugversuch

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
1 Grundlagen	8
1.1 Der Baustoff Asphalt	8
1.2 Kälteprüfungen für Asphalt	9
1.2.1 Direkter Zugversuch	10
1.2.2 Abkühlversuch	10
1.2.3 Relaxationsversuch	10
1.2.4 Zugkriechversuch	11
1.2.5 Einachsiger zyklischer Zugversuch	11
2 Materialien	12
2.1 Bindemittel	12
2.2 Mastix	13
2.3 Mischgut	14
3 Methoden	17
3.1 Abkühlversuch	17
3.1.1 Vorbereitung	17
3.1.2 Durchführung	18
3.1.3 Auswertung	18
3.2 DSR-Versuch	21
3.2.1 Vorbereitung	21
3.2.2 Durchführung	21
3.2.3 Auswertung	22
3.3 Relaxationsversuch	23
3.3.1 Vorbereitung	23
3.3.2 Durchführung	23
3.3.3 Auswertung	23
3.4 Bestimmung der Nadelpenetration	23
3.5 Bestimmung des Erweichungspunktes	24
3.6 Korrelationen	24
3.6.1 Dateneingabe	25
3.6.2 Berechnung	25
4 Ergebnisse	28
4.1 Bindemittel	28
4.2 Mastix	29
4.3 Mischgut	30

4.4	Korrelationen	34
4.4.1	Lineare Einfachregression	34
4.4.2	Multiple lineare Regression	36
5	Zusammenfassung	42
	Literatur	46
	Abbildungsverzeichnis	48
	Tabellenverzeichnis	49
A	Korngrößenverteilung des Mischguts	50
B	Ergänzende Versuchsergebnisse	56
C	Eingabedaten für die Regressionsanalyse	65

Einleitung

Die gegenständliche Diplomarbeit beschäftigt sich eingehend mit dem Tieftemperaturverhalten von Asphalt und Mastix. Dies geschieht in Form von Literaturrecherchen, Laborversuchen und Korrelationsanalysen. Die Gliederung und die entsprechenden Inhalte ergeben sich wie folgt:

Kapitel 1 schafft einen groben Überblick über den Baustoff Asphalt und über die vorhandenen Versuche, die das Kälteverhalten von Asphalt beschreiben. Dabei wird auf die Verfahren und Prüfergebnisse dieser Versuche eingegangen, um deren Zweck nachvollziehen zu können. Das Kapitel 2 zeigt die Materialien auf, welche im Verlaufe dieser Arbeit untersucht werden. Das Asphaltmischgut mit der Bezeichnung *SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, Ka20* stellt die Basis aller Materialien dar. Ausgehend davon werden weitere Mischgüter abgewandelt bzw. die zugehörigen Bindemittel und Mastix-Mischungen abgeleitet. Im Kapitel 3 werden alle durchgeführten Methoden erläutert. Diese beinhalten Laborversuche der erwähnten Materialien, aber auch Korrelationsberechnungen im Nachgang an die Versuche. Sämtliche Berechnungen werden mit dem Mathematikprogramm *MATLAB* in der Version *R2023b Update 1* realisiert. Daraufhin folgt das Kapitel 4. Es widmet sich der Präsentation aller erarbeiteten Ergebnisse sowie deren Vergleich und Interpretation. Den Abschluss bildet Kapitel 5, in dem alle wichtigen Aspekte und Ergebnisse der vorangegangenen Passagen zusammengefasst werden. Außerdem finden sich in diesem Abschnitt Antworten auf die gestellten Forschungsfragen, welche da lauten:

- Wie wirken sich unterschiedliche Rezeptur-Parameter auf das Kälteverhalten von Asphaltmischgut aus? Inwiefern wird dabei die Relaxation der entsprechenden Mastix-Mischung beeinflusst?
- Hängt das Tieftemperaturverhalten von Asphalt linear mit dem Tieftemperaturverhalten von Mastix zusammen?
- Hängt das Tieftemperaturverhalten von Asphalt (multipel) linear mit dessen Rezeptur- bzw. Materialparametern zusammen?

Grundlagen

Im ersten Abschnitt dieser Arbeit werden grundlegende Informationen auf Basis bekannter Literatur erläutert. Zuerst wird beschrieben, wie sich Asphalt zusammensetzt, welche Arten es gibt und wie er verschiedene Anforderungen im Straßenbau erfüllt. Danach wird auf Asphalt-Kälteprüfungen eingegangen. Dort werden zu Anfang verschiedene Prüfansätze erläutert. Im Anschluss sind die wichtigsten Aspekte der Kälteprüfungen beschrieben.

1.1 Der Baustoff Asphalt

Asphalt ist der am häufigsten verwendete Baustoff, um Straßen zu befestigen. Er besteht größtenteils – zu rund 93 bis 97 % – aus Gesteinskörnungen. Den Rest bildet Bitumen, welches als Bindemittel dient. Je nach Zusammensetzung können verschiedene Asphaltarten hergestellt werden. Dazu gehören Asphaltbeton, Splittmastixasphalt, Offenporiger Asphalt und Gussasphalt. Jede Asphaltart besitzt eine andere Tragwirkung. In Europa müssen alle verwendeten Baustoffe eine **CE**-Kennzeichnung besitzen. Das geht aus der Bauproduktenverordnung hervor [1, 6, 9]. Nachfolgend werden die Bestandteile von Asphalt beschrieben:

Gesteinskörnung Es gibt verschiedene Entstehungsarten für Gesteine. Im Straßenbau werden hauptsächlich natürliche Gesteine verwendet. Diese werden weiter in magmatische, sedimentäre und metamorphe Gesteine eingeteilt. Weiters werden industriell hergestellte Gesteine verwendet. Diese entstehen zumeist als Nebenprodukt in der Industrie. Außerdem können rezyklierte Gesteine eingesetzt werden. Solche kann man durch Aufbereitung von bereits verwendeten Gesteinen gewinnen. So wird z. B. herausgefrästes Asphaltgranulat für die Herstellung von Asphaltmischgut eingesetzt. Aus den verschiedenen Entstehungsarten können unterschiedliche ingenieurtechnische Eigenschaften resultieren. Unabhängig davon gelten jedenfalls dieselben Qualitätsanforderungen an die Gesteinskörnungen [1, 6].

Zusätzlich werden Gesteine auch nach ihrer Größe eingeteilt. Körner, die 2 bis 45 mm groß sind, gelten als grob. Feine Gesteinskörnungen beinhalten alle Körner bis 2 mm, die aber überwiegend größer als 0,063 mm sind. Gesteinskörnungen, die kleiner als 0,063 mm sind, werden als Feinanteil oder Füller bezeichnet. Dieser kann als Eigen- oder Fremdfüller vorkommen. Die Korngrößenverteilung spielt eine sehr wichtige Rolle für die Eigenschaften des Asphalts [1, 6, 9].

Bitumen In der Raffinerie entsteht beim Destillationsvorgang von geeignetem Rohöl ein dickflüssiger Rückstand. Dieser wird als Bitumen bezeichnet und besteht aus über 100000 verschiedenen Molekülen (hauptsächlich Kohlenwasserstoffe). Zusammen mit dem Füller bildet Bitumen einen Mörtel, den man **Mastix** nennt. Bitumen ist ein viskoelastischer

Stoff, dessen Beschaffenheit stark von der Temperatur abhängt. Die mechanischen Eigenschaften des Asphalts werden überwiegend durch das Bitumen bestimmt. Dieses ist bei tiefen Temperaturen hart und spröde und bei hohen Temperaturen sehr weich. Dadurch entstehen Kälterisse bzw. Hitzeverformungen. Um dies zu vermeiden, können Polymere zum Bitumen hinzugefügt werden. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Elastomere, die schon in kleinen Mengen wesentliche Verbesserungen der Gebrauchsspanne hervorrufen. Aber auch andere Eigenschaften, wie z. B. die Haftung, können durch Polymermodifiziertes Bitumen (PmB) optimiert werden [1, 6, 9].

Asphaltzusätze In bestimmten Fällen ergänzt man das Mischgut mit Zusätzen, um gewünschte Eigenschaften in der Herstellung oder im Gebrauch zu verändern. Beispielsweise werden verschiedene Granulate oder mineralische Bindemittel hinzugefügt [1, 9].

Obwohl Asphalt aus wenigen Baustoffen besteht, ist es nicht immer einfach, das richtige Mischgut für die verschiedenen Anforderungen zu finden. In der Praxis werden mehrere Schichten verwendet, um ein Optimum zu erhalten. Die unterste Schicht ist die Asphalttragschicht, sozusagen das Fundament. Diese erfährt bei Überfahrten von Fahrzeugen Zugspannungen, die während der gesamten Lebensdauer sehr oft auftreten. Um nicht aufzureißen, muss diese Schicht eine hohe Steifigkeit sowie hohe Ermüdungsresistenz aufweisen. Darüber befindet sich die Asphaltbinderschicht. Aufgrund der hohen Vertikalspannungen und großen Schubbeanspruchungen muss diese Schicht sehr resistent gegenüber Verformungen sein. An der Oberfläche wird die Asphaltdeckschicht eingebaut. Diese wird nicht nur durch Verkehr belastet, sondern auch durch teils extrem hohe und niedrige Temperaturen. Nun ist es schwierig, gleichzeitig Verformungen bei Hitze und Risse bei Kälte zu verhindern. Die kälteresistente Konzipierung ist jedoch sehr bedeutsam, da größere Risse schwerwiegende Schäden im Straßenbau darstellen [1, 9].

1.2 Kälteprüfungen für Asphalt

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es hilfreich, die grundlegenden Konzepte von Asphaltprüfungen hier kurz vorzustellen. Wie von Andres [1] und Mentlein und Lorenzl [9] beschrieben, gibt es zwei Arten, wie man die Baustoffanforderungen für Asphalt überprüfen kann. Zum einen empirische Verfahren, zum anderen leistungsbezogene Verfahren. Beim empirischen Ansatz ist die Zusammensetzung des Asphaltmischguts in den Lieferbedingungen enthalten. Das bedeutet, dass bei der Ausschreibung Maximal- und Minimalwerte der einzelnen Bestandteile angegeben sind. Diese Grenzen basieren auf Erfahrungswerten, die sich über lange Zeit bewährt haben. Sobald man jedoch andere Mischverhältnisse oder neue Komponenten einsetzen will, stößt man auf die Grenzen dieses Systems. Denn dafür gibt es oft keine oder zu wenige Erfahrungen. Die leistungsorientierten Prüfungen machen es möglich, auch solche Asphalte entsprechend zu bewerten und zu vergleichen. Mit diesen Performance-Prüfungen werden bautechnische Eigenschaften geprüft, wie z. B. Festigkeiten oder der Verformungswiderstand [1, 9].

Im Falle von leistungsorientierten Prüfungen spricht man in Österreich auch von gebrauchsvhaltensorientierten (GVO) Prüfungen. Hierzulande werden diese hauptsächlich beim Bau von hochbelasteten Verkehrsflächen, wie z. B. Autobahnen und Flugbetriebsflächen, verwendet. Mit diesem Konzept können realitätsnahe Bewertungen des Mischguts erzielt werden [10, 11].

Insgesamt gibt es viele verschiedene GVO Prüfungen. Da sich diese Arbeit speziell mit dem Tieftemperaturverhalten auseinandersetzt, werden nachfolgend nur die Kälteprüfungen beschrieben. Die Relevanz der kälteresistenten Konzipierung wurde im vorherigen Kapitel bereits erläutert.

1.2.1 Direkter Zugversuch

Der direkte Zugversuch (UTST – Uniaxial Tension Stress Test) wird durchgeführt, wenn man die *Zugfestigkeit* des Asphalts bestimmen möchte. Man kann damit unmittelbar herausfinden, unter welcher Spannung sich ein Riss in der Straße bilden würde. Dabei befindet sich der Probekörper in einer Klimakammer. Dort wird die Temperatur konstant gehalten, während am Prüfkörper gezogen wird. Der Versuch ist weggesteuert und die Dehnungsrate gleichbleibend. Die Dehnung, die beim Erreichen der Zugfestigkeit vorherrscht, heißt *Ausfalldehnung* [15, 23].

Gestartet wird mit dem Einspannen des Probekörpers in die Versuchsmaschine. Danach wird er auf die Prüftemperatur abgekühlt. Diese kann je nach gewünschtem Anwendungsfall angepasst werden. Nun wird die Dehnung so lange um 0,625 %/min erhöht, bis die Zugfestigkeit erreicht ist und der Probekörper reißt [15, 23].

1.2.2 Abkühlversuch

Mit dem Abkühlversuch (TSRST – Thermal Stress Restrained Specimen Test) werden Zugspannungen im Probekörper hervorgerufen, die bei tiefen Temperaturen in der Straße entstehen, da der Asphalt längs und quer zur Fahrbahn nicht beliebig dehnbar ist. Solche Zugspannungen werden kryogene Spannungen genannt [6, 23].

Im Labor werden diese dadurch erreicht, dass der Probekörper in der Prüfmaschine abgekühlt wird, während seine Länge konstant gehalten wird. Durch das Verhindern des Zusammenziehens entstehen die kryogenen Spannungen. Zu Beginn des Versuchs können diese Spannungen durch die Viskoelastizität des Asphalts noch abgebaut werden. Mit voranschreitender Zeit und dadurch fallender Temperatur ist dies aber nicht mehr möglich, weshalb der Probekörper irgendwann reißt. Die Temperatur zu diesem Zeitpunkt wird *Ausfalltemperatur* genannt. Die zugehörige Spannung, die unmittelbar vor dem Versagen herrscht, nennt man *Ausfallspannung* [6, 15, 23].

Der Probekörper wird vor dem Versuch beidseitig an Adapterplatten geklebt. Nach Aushärten des Klebers kann der Probekörper in der Klimakammer eingespannt werden. Zu Beginn des Versuchs werden alle Komponenten auf eine Starttemperatur von 10 °C temperiert. Danach folgt das Abkühlen mit einer Rate von 10 K/h. Die kryogenen Spannungen werden währenddessen gemessen und in einem Diagramm dargestellt. Der Versuch endet mit dem Reißen des Probekörpers [15, 23].

1.2.3 Relaxationsversuch

Wenn Asphalt längere Zeit durch eine Kraft beansprucht wird, so werden die Spannungen durch Relaxation abgebaut. Diese Eigenschaft wird mit dem Relaxationsversuch (RT – Relaxation Test) getestet, indem man Asphalt mit einer Zugkraft belastet. Dazu wird der Probekörper bei einer gleichbleibenden Prüftemperatur spontan gedehnt. Im Anschluss wird diese Dehnung durch die Einspannung konstant gehalten. Zu Beginn entstehen Zugspannungen, die wiederum durch das viskose Verhalten abgebaut werden (Relaxation). Die hervorgerufenen Spannungen werden gemessen und in einem Graphen dargestellt. Sobald die Spannung nur mehr 36,8 % des Ausgangswerts beträgt, ist der Versuch beendet. Dieser Zeitpunkt wird als *Relaxationszeit* bezeichnet. Zu diesem Zeitpunkt wird ebenso die Spannung festgehalten und für weitere Auswertungen verwendet. Je tiefer die Prüftemperatur ist, desto länger ist die Relaxationszeit [2, 15].

Die Prüftemperatur darf frei gewählt werden. Um Vergleichbarkeit zu schaffen, empfiehlt sich die Wiederholung der Prüfung mit bestimmten Temperaturen. Die Grenze von 36,8 %

der Anfangsspannung ergibt sich aus der Division von 1 durch die Eulersche Zahl e gemäß Gleichung (1.1).

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{2,718} = 0,368 = 36,8 \% \quad (1.1)$$

Sollte die Relaxation sehr lange dauern, kann der Versuch früher beendet werden, z. B. nach 48 Stunden. Die Spannung ist in diesem Fall zu Versuchsende festzuhalten [2, 15].

1.2.4 Zugkriechversuch

Der Zugkriechversuch (TCT – Tensile Creep Test) gibt Auskunft über das Kriechverhalten von Asphalt. Auf den Probekörper wird spontan eine Zugspannung aufgebracht, die während des gesamten Versuchs konstant gehalten wird. Zudem bleibt die Prüftemperatur unverändert. Durch das Halten der Zugspannung dehnt sich der Probekörper immer stärker. Diese *zeitabhängige Dehnung* ist während des Versuchs aufzuzeichnen. Sobald eine festgelegte Zeit abgelaufen ist, wird der Probekörper entlastet. Die daraus resultierende *Rückverformung* wird ebenfalls gemessen. Die Zugspannung wird je nach gewählter Temperatur angepasst. Acht Stunden lang soll die Belastung konstant gehalten werden. Nach der Entlastung ist mindestens für zwei Stunden die Dehnung zu bestimmen. Mit den gewonnenen Daten können verschiedene rheologische Modelle erstellt werden. Diese dienen zur Beschreibung der viskosen Material-Eigenschaften [2, 15, 23].

1.2.5 Einachsiger zyklischer Zugversuch

Der einachsige zyklische Zugversuch (UCTST – Uniaxial Cyclic Tension Stress Test) wird dazu verwendet, um die Kombination aus Temperatur- und Verkehrsbeanspruchung zu simulieren. Anders als die vorherigen Versuche zählt dieser nicht zu den statischen, sondern zu den zyklisch dynamischen Prüfmethode. Dabei wird der Prüfkörper unter konstanter Prüftemperatur in der Klimakammer eingespannt. Nun wird eine Zugbelastung aufgebracht. Diese wird so oft innerhalb der Grund- und Spitzenspannung zyklisch variiert, bis der Asphaltkörper reißt [23].

Die Grundspannung basiert auf Ergebnissen des Abkühlversuchs. Diese ist nämlich gleich groß wie die kryogene Spannung bei der gewählten Prüftemperatur. Die Spitzenspannung ergibt sich durch Addieren der Grundspannung und einer Verkehrslastspannung. Letztere wird auch mechanogene Spannung genannt und kann mit einem linearen elastischen Modell berechnet werden. Im Falle von Asphaltdeckschichten wird eine Verkehrslastspannung von 1,6 MPa angesetzt. Während diese Spannungen mit einer bestimmten Prüffrequenz appliziert werden, sind die resultierenden Verschiebungen und Lasten zu messen. Daraus werden in weiterer Folge die *Steifigkeitsparameter* ermittelt, welche als Ergebnis des UCTSTs dienen. Ein zusätzliches Ergebnis dieses Versuchs ist die *Anzahl der Lastzyklen*, die nötig ist, um den Probekörper zum Versagen zu bringen [15, 23].

Materialien

Dieses Kapitel befasst sich mit allen Materialien, die im Zuge der Versuche zur Anwendung kommen. Insgesamt werden 9 verschiedene Asphaltmischgüter, 9 Mastix-Mischungen und 3 Bindemittel (BM) behandelt. Bei den Asphaltmischgütern wurde darauf geachtet, dass sich jede Mischung nur in einem Parameter von den Parametern des Referenz-Mischguts unterscheidet. Dadurch kann der Einfluss jedes Parameters auf die Ergebnisse der GVO Prüfungen direkt verglichen und abgeschätzt werden.

Die Gliederung der folgenden drei Abschnitte geht aus dem Aufbau von Asphalt hervor: Bindemittel – Mastix – Mischgut. Die verwendeten Materialien werden in Tabellen mit Laborcodes aufgelistet. Dabei wird eine Nummerierung verwendet, die eigens für diese Diplomarbeit gewählt wurde (AX, BX & MX). Der erste Buchstabe symbolisiert das Material (A für Asphaltmischgut, B für Bitumen & M für Mastix) und die Zahl X ist eine fortlaufende Nummer. Das Hauptaugenmerk der Tabellen liegt auf den Rezepturen der Materialien. Außerdem ist immer angegeben, welche Versuche wie oft mit dem jeweiligen Material durchgeführt werden. Des Weiteren wird erläutert, wie Mastix und Mischgut in diesem Projekt hergestellt werden.

2.1 Bindemittel

Im Rahmen der Versuche werden drei verschiedene PmBs im ungealterten und im gealterten Zustand verwendet. Für die Kurzzeitalterung kam der sogenannte Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) nach *ÖNORM EN 12607-1* [12] zur Anwendung. Tabelle 2.1 bietet eine Übersicht der verwendeten Bitumensorten. In den letzten vier Spalten ist angegeben, wie viele Wiederholungen der jeweiligen Versuche durchgeführt werden. Wie diese Versuche ablaufen, ist im Kapitel 3 (Methoden) beschrieben.

Tab. 2.1: Verwendete Bitumen und daran durchgeführte Versuche

Nr.	Laborcode	Sorte	Alterung	DSR	Relax	Pen	EP
B1	B1673B_LRTF	PmB 45/80-80	RTFOT	2	3		
B2	B1531B_LRTF	PmB 25/55-65	RTFOT	2	3		
B3	B1161B_LRTF	PmB 45/80-65	RTFOT	2	3		
B4	B1673A	PmB 45/80-80	/		3	1	1
B5	B1531A	PmB 25/55-65	/		3	1	1
B6	B1161A	PmB 45/80-65	/		3	1	1

Bei der Herstellung der Asphaltmischgüter kommen nur die gealterten Bindemittel zur Anwendung. Die Bitumen B2 und B3 werden jeweils nur einmal verwendet. Für alle übrigen Mischgüter, darunter auch das Referenz-Mischgut, wird das Bitumen B1 eingesetzt. Damit stellt das PmB 45/80-80 auch das Referenz-Bitumen dar.

2.2 Mastix

Für die Mastix-Mischungen werden die RTFOT-gealterten Bindemittel (B1, B2 & B3) sowie vier unterschiedliche Füller eingesetzt:

- Kalkhydrat (KH)
- Kalksteinmehl (KSM)
- Kersantit (Ker)
- Basalt (Bas)

Kalkhydrat und Kalksteinmehl werden als Fremdfüller verwendet. Die Eigenfüller stammen aus der Extraktion der Kersantit- und Basalt-Gesteinskörnungen. Um den entsprechenden Füller für Kersantit und Basalt zu erhalten, wird der Feinanteil aus der Korngruppe 0/2 ausgesiebt. Das verwendete Kalkhydrat besitzt die Produktbezeichnung „Baumit SpeziKalk HMA“ und das Kalksteinmehl besitzt die Produktbezeichnung „Baumit Futterkalk gemahlen“. Das Kersantit-Gestein stammt aus dem Hartsteinwerk Loja, während das Basalt-Gestein aus dem Basaltwerk Pauliberg stammt.

In Tab. 2.2 sind alle verwendeten Mastix-Typen angegeben. Für Asphaltmastix existiert keine Klassifizierung wie z. B. für Bindemittel oder Asphalt, darum wird nur der interne Laborcode angegeben. Im mittleren Teil der Tabelle sind die Anteile der Füller und Bindemittel jeweils in Massen-Prozent angegeben. Die Spalte B:F gibt das Verhältnis von Bitumen zu Füller an. Die letzte Spalte zeigt, wie viele Wiederholungen des Relaxationsversuchs durchgeführt werden.

Tab. 2.2: Rezeptur der verwendeten Mastix-Mischungen und daran durchgeführte Versuche

Nr.	Laborcode	KH [M-%]	KSM [M-%]	Ker [M-%]	Bas [M-%]	B1 [M-%]	B2 [M-%]	B3 [M-%]	B:F [-]	Relax
M1	MX0070	22,51	18,43	7,03		52,03			1:0,92	3
M2	MX0071	22,51	18,43	7,03			52,03		1:0,92	3
M3	MX0072	22,51	18,43	7,03				52,03	1:0,92	3
M4	MX0073		37,66	7,45		54,88			1:0,82	3
M5	MX0074	10,15	8,68	10,30		70,87			1:0,41	3
M6	MX0075	34,07	26,76	4,54		34,64			1:1,89	-
M7	MX0076	21,45	17,57	7,79		53,19			1:0,88	3
M8	MX0077	23,62	17,96	6,63		51,79			1:0,93	3
M9	MX0078	22,51	18,43		7,03	52,03			1:0,92	3

Bei der Herstellung jeder Mischung werden zuerst die benötigten Füller miteinander vermengt. Daraufhin folgt das Erhitzen von Bitumen und Füller auf 185 °C. Beide Komponenten werden zehn Minuten lang miteinander verrührt. Nach einem Tag Abkühlen im Kühlschrank ist die Herstellung beendet.

Die Mischung M6 bildet jedoch eine Ausnahme. Durch den hohen Fülleranteil verbindet sich das Bitumen nicht ausreichend mit dem Füller, stattdessen entstehen inhomogene Klumpen. Diese Masse ist nicht für die Durchführung eines Relaxationsversuchs geeignet und wird deshalb nicht weiter behandelt. Abbildung 2.1 zeigt eine Gegenüberstellung, wie die Mastix-Mischungen üblicherweise aussehen (links) und wie Mastix M6 hingegen aussieht (rechts).

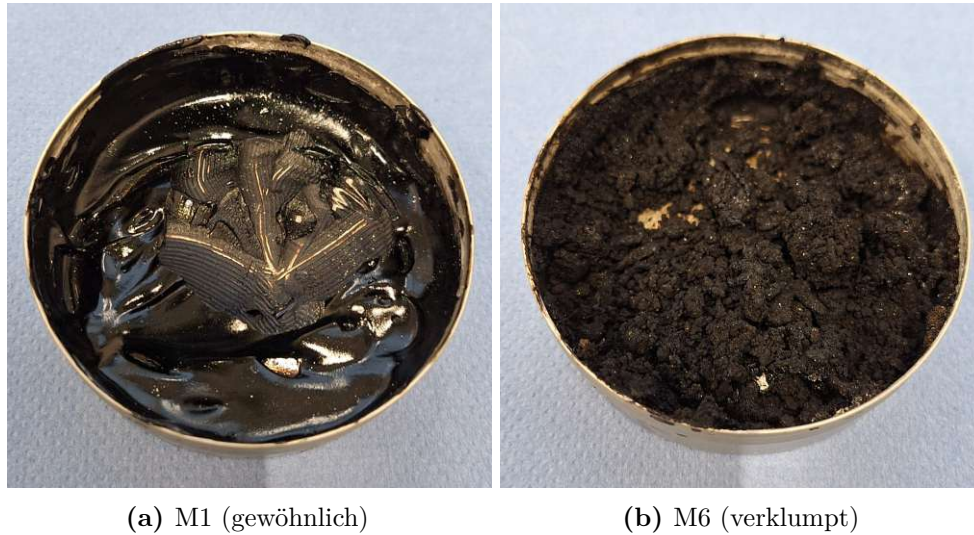


Abb. 2.1: Vergleich zweier Mastix-Mischungen

2.3 Mischgut

Alle in dieser Diplomarbeit behandelten Asphalte sind in Tab. 2.3 aufgelistet. Darin sind die Klassifizierung, die Hauptbestandteile und diverse Anmerkungen zu sehen. In der letzten Spalte ist zu sehen, wie viele Abkühlversuche pro Mischgut durchgeführt werden. Auch dieser Versuch wird in Kapitel 3 ausführlich erklärt. Das Mischgut in der ersten Zeile dient als Referenz. Ausgehend davon wird immer ein Parameter verändert. Die gelb markierten Zellen kennzeichnen diese Änderungen.

Tab. 2.3: Verwendete Asphaltmischgüter und daran durchgeführte Versuche

Nr.	Laborcode	Typ	BM	Gestein	Zusatz	Anm.	TSRST
A1	AS1837	SMA 11 S2	B1	Kersantit	Ka20	Referenz	1
A2	AS1838	SMA 11 S2	B2	Kersantit	Ka20		1
A3	AS1840	SMA 11 S2	B3	Kersantit	Ka20		1
A4	AS1841	SMA 11 S2	B1	Kersantit	/		1
A5	AS1842	SMA 11 S2	B1	Kersantit	Ka20	B : F ↑	1
A6	AS1843	SMA 11 S2	B1	Kersantit	Ka20	B : F ↓	1
A7	AS1854	SMA 8 S2	B1	Kersantit	Ka20		1
A8	AS1863	SMA 8 S3	B1	Kersantit	Ka25		1
A9	AS1865	SMA 11 S2	B1	Basalt	Ka20		1

Die Mastix-Mischungen aus Tab. 2.2 spiegeln sich auch in den Asphaltmischgütern wider. Das bedeutet, dass das Mischgut A1 mit den selben Anteilen an einzelnen Füllerkomponenten

und an Bindemittel hergestellt wird wie Mastix M1, Mischgut A2 mit den selben Anteilen wie Mastix M2 etc. Hierbei sei angemerkt, dass die Korngrößenverteilungen der Mischgüter A5 und A6 nicht in den Grenzen der Norm liegen. Diese Entscheidung wurde bewusst getroffen, um den Einfluss dieser Parameter auf die Ergebnisse deutlich erkennbar zu machen. Die Korngrößenverteilung jedes Mischguts ist im Anhang A gegeben. Darin findet sich eine Tabellenübersicht aller Korngrößenverteilungen sowie die jeweiligen Sieblinien.

Die Nomenklatur der Asphalte ist in Tab. 2.4 dargelegt. Um alle unterscheiden zu können, besitzen manche Mischgüter am Ende der Bezeichnung noch Zusätze, wie z. B. „Füller –“. In diesem Fall bedeutet das, dass weniger Füller verwendet wird und somit das Verhältnis von Bitumen zu Füller steigt.

Tab. 2.4: Nomenklatur der verwendeten Asphaltmischgüter

Nr.	Laborcode	Bezeichnung
A1	AS1837	SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, Ka20
A2	AS1838	SMA 11 deck PmB 25/55-65, S2, GS, Ka20
A3	AS1840	SMA 11 deck PmB 45/80-65, S2, GS, Ka20
A4	AS1841	SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS
A5	AS1842	SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, Ka20, Füller –
A6	AS1843	SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, Ka20, Füller +
A7	AS1854	SMA 8 deck PmB 45/80-80, S2, GS, Ka20
A8	AS1863	SMA 8 deck PmB 45/80-80, S3, GS, Ka25
A9	AS1865	SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, Ka20, Basalt

Die Herstellung jedes Asphaltmischguts erfolgt nach *ÖNORM EN 12697-35* [14]. Dabei werden das Gestein und das Bitumen auf 190 °C vorgeheizt und anschließend im Labormischer zu Asphalt verarbeitet. Daraufhin folgt die Verdichtung nach *ÖNORM EN 12697-33* [13], um eine quaderförmige Asphaltplatte zu erhalten. Die Verdichtung wird mit einem Stahlwalzensegment durchgeführt. Nun lässt man den Asphaltkörper in der Probenform bis zum Folgetag abkühlen. Damit ist der Herstellungsprozess abgeschlossen.

Weitere wesentliche Kennwerte der hergestellten Asphalte sind in Tab. 2.5 aufgelistet. Der Bindemittelgehalt und die Rohdichte beziehen sich dabei auf das gesamte Mischgut. Die Werte der Raumdichte und des Hohlraumgehalts wurden hingegen als Mittelwerte der jeweils geprüften Probekörper ermittelt.

Tab. 2.5: Kennwerte der verwendeten Asphaltmischgüter

Nr.	Laborcode	BM-Gehalt [M-%]	Rohdichte [Mg/m ³]	MW Raumdichte [Mg/m ³]	MW Hohlraumgehalt [V-%]
A1	AS1837	6,1	2,548	2,492	2,2
A2	AS1838	6,1	2,563	2,504	2,3
A3	AS1840	6,1	2,564	2,482	3,2
A4	AS1841	6,1	2,577	2,491	2,8
A5	AS1842	6,1	2,584	2,374	8,1
A6	AS1843	6,1	2,476	2,471	0,2
A7	AS1854	6,6	2,540	2,466	2,9
A8	AS1863	6,3	2,548	2,376	6,8
A9	AS1865	6,5	2,631	2,537	3,6

Methoden

Ein beträchtliches Maß dieser Arbeit fußt auf Versuchen, die im Labor durchgeführt werden. All diese Versuche sind in diesem Kapitel beschrieben. Dabei liegt der Fokus auf den wesentlichen Bestandteilen der Versuchsdurchführung und ausgewählten Prüfparametern. Der Großteil der Methoden wird nach verschiedenen Normen durchgeführt und ist in der Literatur allseits bekannt. Während sich die ersten fünf Abschnitte mit den verwendeten Versuchen beschäftigen, fokussiert sich der letzte Teil auf die Korrelationsberechnung der gesammelten Daten.

3.1 Abkühlversuch

Der Abkühlversuch (TSRST) wurde bereits im ersten Kapitel beschrieben. Im Folgenden wird die Methodik detaillierter angeführt, da die Ergebnisse dieses Versuchs einen wesentlichen Teil dieser Arbeit darstellen. Zuerst wird beschrieben, wie die Probekörper hergestellt und vorbereitet werden, danach geht es um die genaue Durchführung des TSRST. Bei der Auswertung der Versuchsdaten kommen zwei verschiedene Methoden zur Anwendung. In der einen Methode werden die Ergebnisse nach Norm ausgewertet, in der anderen werden weiterführende Berechnungen durchgeführt. Diese Methode beruht auf einem Artikel der Literatur.

3.1.1 Vorbereitung

Anhand des überschüssigen Asphaltmischguts aus dem Herstellungsprozess wird die Rohdichte mit dem Verfahren A der *ÖNORM EN 12697-5* [16] bestimmt. Die Asphaltplatte wird in acht gleich große Probekörper zersägt. Diese besitzen eine Breite und Höhe von 50 mm sowie eine Länge von 220 mm. Daraufhin wird für jeden Probekörper die Raumdichte mit dem Verfahren B aus *ÖNORM EN 12697-6* [17] berechnet. Mit den Werten der Rohdichte und der Raumdichte kann der Hohlraumgehalt der Asphalt-Probekörper bestimmt werden.

Drei der acht Probekörper werden zur weiteren Verarbeitung verwendet. Die Auswahl folgt nach den Hohlraumgehalten. Es wird darauf geachtet, dass die gewählten Probekörper einen ähnlichen Hohlraumgehalt besitzen.

Nun folgt das Einspannen der Probekörper. Dieser Vorgang wird nach *ÖNORM EN 12697-46* [15] abgewickelt. Das Ziel des Einspannens ist, den Probekörper an beiden Enden kraftschlüssig mit Stahlplatten zu verbinden, um ihn später in der Prüfkammer fixieren zu können. Dabei wird er auf die Einspannbank gelegt und mit einem Zweikomponenten-Kleber an die gereinigten Platten geklebt [15]. Der Kleber wird nicht nur stirnseitig, sondern auch längsseitig in Keilform aufgebracht, siehe Abb. 3.1.

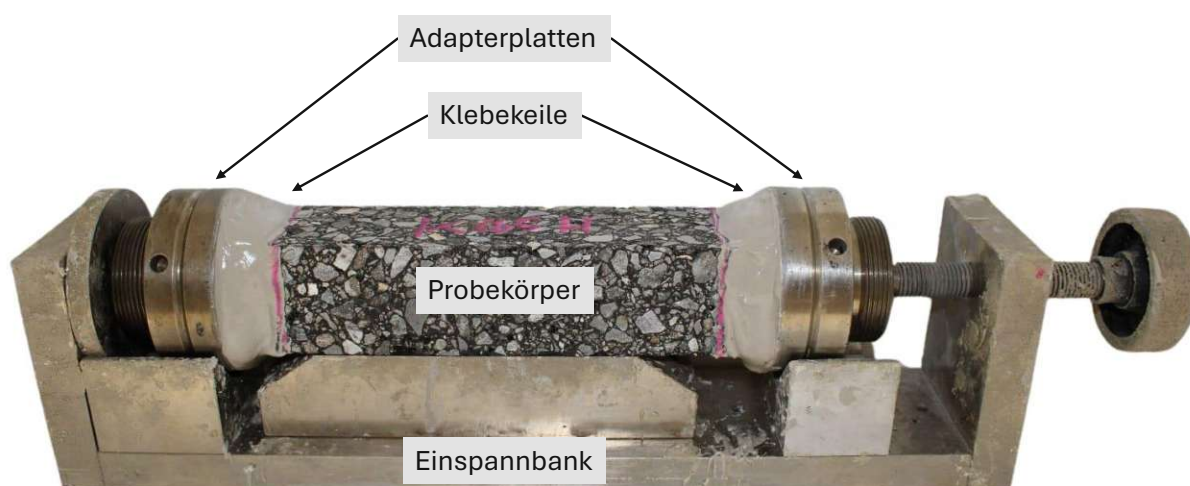


Abb. 3.1: Einspannen und Kleben des Probekörpers

Sobald der Kleber ausgetrocknet ist, wird der Prüfkörper in einem Kühlschrank auf 10 °C heruntergekühlt. Außerdem wird ein halbiertes Probekörper derselben Mischung gekühlt. Dieser wird später als Blindprobe in Kombination mit einem Temperaturmessfühler verwendet [15].

3.1.2 Durchführung

Der gesamte Ablauf des TSRST wird gemäß *ÖNORM EN 12697-46* [15] durchgeführt und ist nachfolgend beschrieben:

Zuerst wird der vorgekühlte Probekörper in die Prüfmaschine eingesetzt. Dazu werden die Gewinde der angeklebten Stahlplatten mit den Einspannmuttern der Maschine verschraubt. Die Blindprobe wird so nahe wie möglich am Probekörper platziert. Damit gewährleistet man, dass die Blindprobe mit dem Temperaturmessfühler keine wesentlichen Temperaturunterschiede zum Probekörper aufweist [15]. Abb. 3.2 zeigt einen fertig eingesetzten Prüfkörper inklusive Blindprobe.

Nachdem die Wegaufnahme eingestellt und die Dimensionen eingegeben wurden, beginnt die Konditionierung. Dafür wird die gesamte Prüfkammer mindestens eine Stunde lang auf 10 °C temperiert. Währenddessen muss der Prüfkörper spannungsfrei beweglich sein [15].

Mit dem Ende der Konditionierungsphase beginnt der eigentliche Versuch. Die Klimakammer wird nun um 10 K/h abgekühlt und die Länge des Probekörpers wird konstant gehalten. Über die gesamte Versuchsdauer hinweg zeichnet die Prüfmaschine die Temperatur im Blindkörper und die Längsspannung im Probekörper auf. Der Versuch dauert so lange, bis der Prüfkörper durch kryogene Spannungen reißt [15]. In Abb. 3.3 sind drei typisch gerissene Prüfkörper zu sehen.

3.1.3 Auswertung

Zur Auswertung werden je Mischgut drei Probekörper herangezogen. Wie weiter oben erwähnt, werden aus den Versuchsdaten herkömmliche Ergebnisse ausgewertet, aber auch spezifische, die nicht in der Norm verankert sind:

Methode 1

Bereits in Kapitel 1.2.2 sind die *Ausfalltemperatur* T_{Ausfall} und die *Ausfallspannung* $\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ erklärt, welche häufig auch als Bruchtemperatur bzw. Bruchspannung bezeichnet werden. Diese

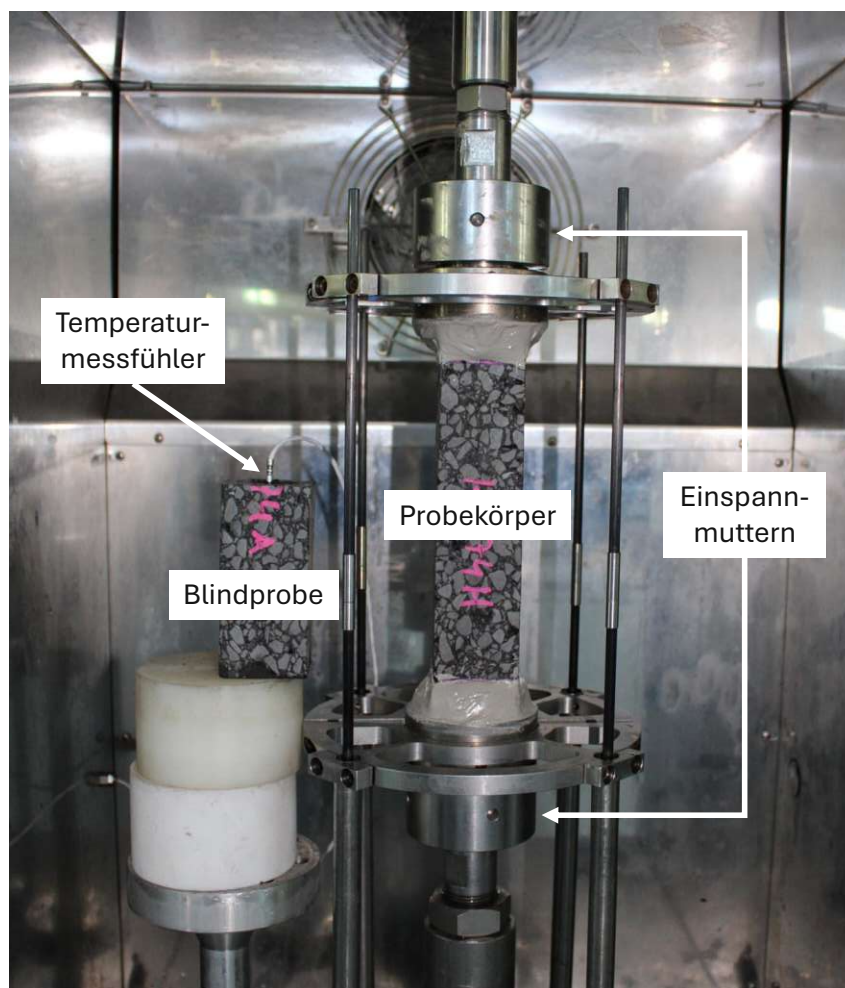


Abb. 3.2: Probekörper mit Blindprobe in der Prüfmaschine

Werte sind im Prüfbericht nach *ÖNORM EN 12697-46* [15] zu berücksichtigen. Außerdem werden die kryogenen Spannungen in Abhängigkeit der Temperatur graphisch dargestellt. Die Ausfalltemperatur und die Ausfallspannung sind als Mittelwert der drei durchgeführten Prüfungen anzugeben. Aktuell werden diese beiden Werte maßgeblich dazu verwendet, das Tieftemperaturverhalten von Asphalt zu beschreiben [15].

Methode 2

Darüber hinaus gibt es weitere interessante Daten, die mit dem TSRST gewonnen werden können. Nachstehend wird eine Methode beschrieben, die auf den Erkenntnissen von Maschauer et al. [8] basiert und auch in späteren Abschnitten dieser Arbeit angewandt wird.

Zu Beginn dieser Methode wird für jeden Probekörper eine mathematische Funktion berechnet, die den Spannungsverlauf über die Temperatur darstellt. Dies geschieht mit einer Regression, bei der die einzelnen Datenpunkte durch ein Polynom 6. Ordnung angenähert werden. Im Anschluss bildet man eine Durchschnitts-Funktion, indem man für die einzelnen Polynome der drei Probekörper den Durchschnitt berechnet [8]. All diese Berechnungen werden mithilfe von MATLAB durchgeführt. Beispielfhaft sind in Abb. 3.4 die Graphen von drei TSRST-Versuchen und die resultierende Durchschnitts-Funktion zu sehen. Wie in Methode 1 wird die Ausfalltemperatur als Mittelwert der einzelnen Prüfungen ermittelt. Durch die Auswertung der gemittelten Funktion an der Ausfalltemperatur erhält man die Ausfallspannung. Diese kann sich aufgrund der ver-



Abb. 3.3: Gerissene Probekörper nach abgeschlossenem Versuch

schiedenen Herangehensweisen unterscheiden zur Ausfallspannung nach Methode 1. Zumeist ist dieser Unterschied aber vernachlässigbar gering.

Nun werden weitere Charakteristika der Funktion betrachtet. Im Allgemeinen erkennt man bei den Graphen der TSRST-Auswertung, dass die Spannung am Anfang des Versuchs schwach zunimmt. Erst im Bereich tieferer Temperaturen bauen sich hohe Spannungen im Probekörper auf. Wie in Kapitel 1.2.2 erklärt liegt dies daran, dass der Asphalt die Spannungen in höheren Temperaturen viskoelastisch abbauen kann. Im Tieftemperaturbereich ist diese Eigenschaft nicht mehr so stark ausgeprägt, weshalb die Spannungen fast linear ansteigen.

Genau diese Linearität möchte man quantifizieren. Gemäß Maschauer et al. [8] wird dafür eine lineare Regression durchgeführt. Man fängt bei der Bruchtemperatur an und bildet eine Linie mit den letzten zwei Messpunkten. Anschließend berechnet man das Bestimmtheitsmaß¹ (R^2) der Regression und der tatsächlichen Kurve. Wenn dieser Wert größer als 0,9999 ist, fügt man weitere Punkte zur Regression hinzu. Sobald R^2 unter die Grenze von 0,9999 fällt, ist definitionsgemäß nicht mehr von Linearität zu sprechen. Damit ist man beim Übergangspunkt vom viskoelastischen zum linearen Materialverhalten angelangt. Abgekürzt wird dieser Punkt mit dem Ausdruck T_t [8]. Abbildung 3.5 zeigt ein Beispiel, wie die lineare Regression (rote Linie) aussehen kann. Der Übergangspunkt ist ebenfalls dargestellt (pinke Linie).

Der Übergangspunkt dient außerdem als Grundlage für einen weiteren Parameter. Zwischen der Bruchtemperatur und dem Übergangspunkt kann die Länge der linearen Regression berechnet werden. Jene Länge wird als L_{Lin} bezeichnet [8]. Der grüne Doppelpfeil in Abb. 3.5 stellt diesen linearen Abschnitt dar.

Der letzte Parameter dieser Methode ist die Steigung des Graphen bei +5 °C. Um ihn zu erhalten, wird die erste Ableitung der Durchschnitts-Funktion berechnet und anschließend bei +5 °C ausgewertet. Dieser Wert wird als k_5 definiert [8]. Dieser kann ebenfalls aus Abb. 3.5 entnommen werden (blaue Linie).

¹Eine grundlegende Beschreibung des Bestimmtheitsmaßes folgt in Kap. 3.6.2.

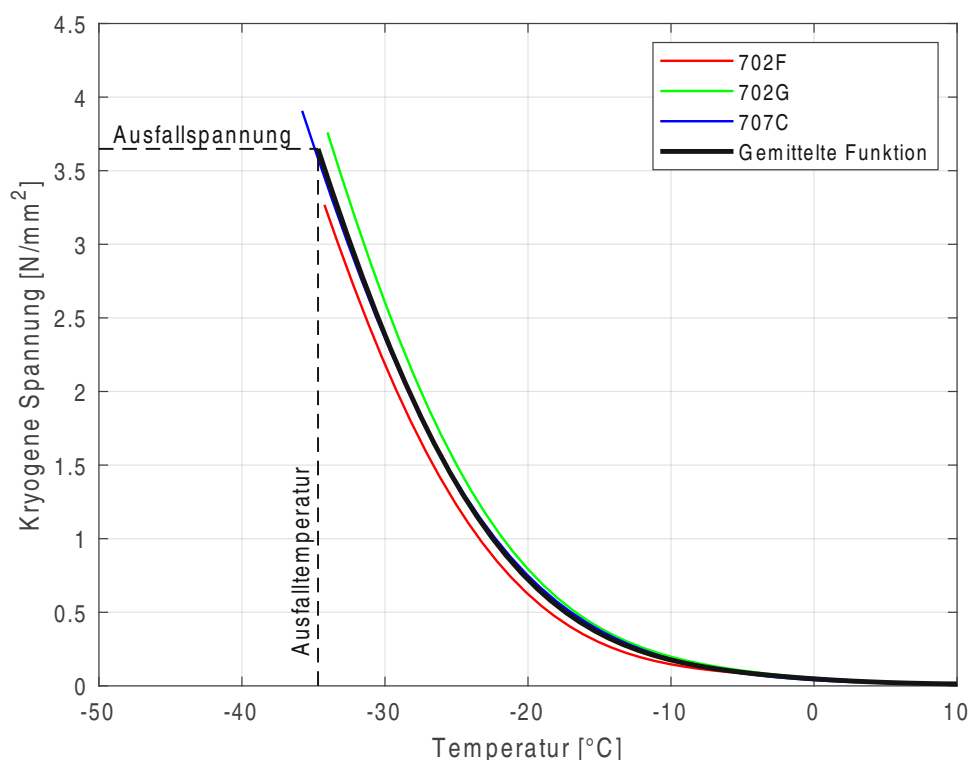


Abb. 3.4: Beispiel einer Durchschnitts-Funktion

3.2 DSR-Versuch

Die Versuche mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) zählen zu den Bitumenprüfungen. Dabei werden die rheologischen Eigenschaften des Bitumens untersucht. Der DSR-Versuch stellt eine sehr gängige Methode dar, um das Verhalten von Bitumen zu beschreiben. Die Durchführung basiert auf der *ÖNORM EN 14770* [21].

3.2.1 Vorbereitung

Zu Beginn werden rund 10 Gramm Bitumen auf 180 °C erhitzt, homogenisiert und anschließend in eine plattenförmige Kautschuk-Form gegossen. Es kommen Formen mit einem Durchmesser von 4 mm zur Anwendung. Darin kühlt das Material einen Tag lang ab. Danach wird der Messsensor des DSR-Geräts auf 65 °C vorgewärmt und der Nullpunkt des Messspaltabstandes wird kalibriert. Nun platziert man die Bitumenprobe zwischen den DSR-Platten. Daraufhin wird der Messspalt auf 1,05 mm reduziert. Mit einem vorgewärmten Spatel schneidet man das überstehende Material plan ab. Anschließend erfolgt eine erneute Einstellung des Messspalts auf 1 mm.

3.2.2 Durchführung

Um möglichst viele Informationen über das Bitumen zu erhalten, wird als Prüfverfahren ein Temperatur-Frequenzdurchlauf (T-f-Sweep) gemäß *ÖNORM EN 14770* [21] durchgeführt. In Tabelle 3.1 sind alle Schritte aufgelistet, die beim T-f-Sweep durchlaufen werden.

Der Versuch wird mit dem Einschwingvorgang gestartet. Dabei wird die aufgebrachte Scherspannung so lange erhöht, bis die Deformation am Rand der Probe auf 1/100 mm anwächst. Danach oszilliert die obere Platte zehn mal mit genau dieser Scherspannung. Währenddessen

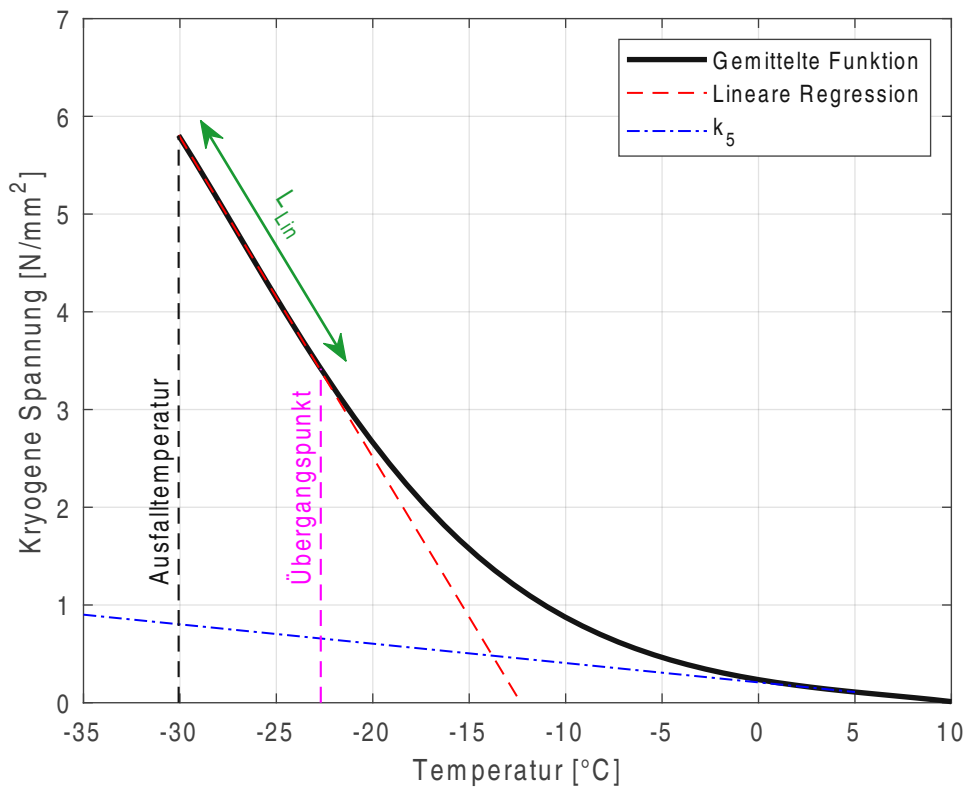


Abb. 3.5: Beispiel der Auswertung nach Methode 2

Tab. 3.1: Übersicht aller geprüften Temperaturen und Frequenzen im DSR-Versuch

Prüfbedingung										
Frequenzen [Hz]	0,03183	0,1	0,3	1	1,592	3	5	8	10	
Temperaturen [°C]	0	-6	-12	-18	-24					

misst das Gerät die Scherspannung im Bitumen. Dieses Prozedere wird für alle Prüfbedingungen wiederholt.

3.2.3 Auswertung

Anhand der gemessenen Scherspannungen und Scherdeformationen können der *komplexe Schermodul* $|G^*|$ und der *Phasenwinkel* δ errechnet werden [21]. Wegen der großen Anzahl an Kombinationen von gemessenen Frequenzen und Temperaturen entstehen sehr viele Messwerte. Um Übersichtlichkeit zu gewährleisten, werden im Ergebnis-Kapitel nur die Werte angegeben, die bei einer Frequenz von 0,03183 Hz und einer Temperatur von -12 °C gemessen werden. Die Frequenz von 0,03183 Hz wurde deshalb gewählt, da in einer Studie von Komaragiri et al. [7] bei dieser Frequenz eine Korrelation zwischen den Versuchsergebnissen von DSR und Biegebalkenrheometer (BBR) nachgewiesen werden konnte. Der volle Umfang der DSR-Ergebnisse ist auf den Anhang beschränkt.

3.3 Relaxationsversuch

Schon im Kapitel 1.2.3 wurde ein Relaxationsversuch erklärt, mit dem Asphaltproben geprüft werden. Im aktuellen Fall wird aber der Relaxationsversuch für Bitumen- und Mastixproben (Relax) beschrieben. Beide testen die selbe Eigenschaft, tun dies aber auf unterschiedlichen Materialebenen. In diesem und in allen nachfolgenden Kapiteln bezieht sich die Bezeichnung „Relaxationsversuch“ stets auf Bitumen bzw. Mastix, da nur dieser Versuch in gegenständlicher Diplomarbeit durchgeführt wird.

Die hier angewandte Vorgangsweise ist in der Literatur noch nicht stark vertreten, dennoch ist sie bereits mehrfach erprobt, unter anderem in einer Arbeit von Radenberg und Staschkiewicz [22]. Mit dem Relaxationsversuch wird geprüft, wie stark die Spannungen in einer Probe unter konstanter Deformation relaxieren. Die Probe kann rein bituminös sein, aber auch bitumenhaltige Materialien können geprüft werden. Für den Relaxationsversuch benötigt man ebenfalls ein DSR-Gerät, weshalb einige Vorgänge ähnlich wie beim DSR-Versuch sind [22].

3.3.1 Vorbereitung

Wie schon beim DSR-Versuch (siehe Kap. 3.2.1) werden rund 10 Gramm der Probe erhitzt, homogenisiert und in eine Gussform gegossen. Der Durchmesser der Form beträgt hier jedoch 8 mm und die Tiefe 2,5 mm. Anschließend wird die Form abgedeckt und einen Tag lang liegengelassen. Am nächsten Tag werden die Rheometerplatten für 5 Minuten auf 65 °C vorgewärmt, ehe die Probe eingebracht wird. Nun wird der Messspalt auf 2,1 mm reduziert und das überstehende Material wird wieder plan abgeschnitten. Danach folgt das Einstellen des Plattenabstandes auf 2,0 mm.

3.3.2 Durchführung

Der Versuch startet damit, dass die Probe auf -10 °C abgekühlt und für 45 min auf dieser Temperatur gehalten wird. Währenddessen wird die Normalkraft zwischen den Platten auf 0 N gehalten. Nach Verstreichen der 45 min wird die Probe einer Deformation von 0,1 % unterzogen. Diese Deformation wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,1 %/s aufgebracht. Daraufhin folgt die Relaxationsphase, in der die Deformation 30 min lang konstant gehalten wird [22]. In den ersten 120 Sekunden werden die Scherspannung, die Verformung und die Temperatur in Intervallen von 1/100 s erfasst. Danach werden diese Werte einmal pro Sekunde gemessen.

3.3.3 Auswertung

Um festzustellen, wie stark die Spannungen durch Relaxation abgebaut werden, wird die *Scherrelaxationsviskosität* λ_{Rel} berechnet. Dazu wird vorerst eine Regressionsfunktion τ aus den Messwerten der Scherspannungen berechnet. Durch Integration der Regressionsfunktion über die Versuchszeit, wie in Gleichung (3.1), erhält man die Scherrelaxationsviskosität [22].

$$\lambda_{\text{Rel}} = \int_0^{1800} \tau \, dt \quad (3.1)$$

3.4 Bestimmung der Nadelpenetration

Die Nadelpenetration ist ein Verfahren zur Bestimmung der Konsistenz von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln. Dabei dringt eine Nadel unter bestimmten Bedingungen in den

Probekörper ein. Die gemessene Eindringtiefe nach einer festgelegten Zeitspanne wird als *Penetration (Pen)* bezeichnet und dient der Klassifikation von Bindemitteln [19]. Der Versuchsablauf folgt zur Gänze der *ÖNORM EN 1426* [19], weshalb nachstehend nur die angewandten Prüfparameter erläutert werden:

Ungefähr 100 Gramm des Bitumens werden auf rund 165 °C erhitzt, homogenisiert und in ein Probengefäß mit 55 mm Innendurchmesser gefüllt. Nach einer einstündigen Abkühlphase wird das Gefäß für eine Stunde im Wasserbad auf 25 °C temperiert. Anschließend beginnt die Prüfung mit mindestens drei im Rahmen liegenden Bestimmungen. Hierbei kommen eine aufgebrachte Last von 100 g und eine Belastungsdauer von 5 s zur Anwendung.

3.5 Bestimmung des Erweichungspunktes

Der *Erweichungspunkt (EP)* dient ebenfalls der Klassifikation von Bindemitteln. Er beschreibt eine Temperatur, bei der das Material unter genormten Prüfbedingungen eine bestimmte Konsistenz erreicht. Eingesetzt wird das Ring- und Kugel-Verfahren, bei dem zwei Bitumenschichten in jeweils einen Ring gegossen werden und jeweils eine Stahlkugel tragen. In einer Flüssigkeit werden diese Schichten so lange erwärmt, bis ihre Verformung ausreicht, um die Bodenplatte zu berühren. Die zu diesem Zeitpunkt gemessene Temperatur ist als Erweichungspunkt definiert [20]. Dieses Verfahren wird gemäß *ÖNORM EN 1427* [20] durchgeführt. Erneut folgt eine kurze Beschreibung der Prüfparameter:

Anfangs werden die Ringe auf 90 °C über dem erwarteten Erweichungspunkt erhitzt. 5 Gramm Bindemittel werden ebenfalls erhitzt. Nachdem dessen Temperatur ca. 165 °C beträgt, wird es homogenisiert und in die Ringe eingegossen. Danach lässt man es für 30 min auf Raumtemperatur abkühlen und schneidet den Überstand am oberen Rand ab. Für das Flüssigkeitsbad wird Glycerin verwendet. Das Bad, die Ringe und die Kugeln werden auf 30 °C temperiert und anschließend im Ring- und Kugelautomat platziert. Gleich darauf folgt das Erhitzen um 5 °C/min. Die Lichtschranke des Automats misst den Zeitpunkt, an dem die Kugeln die Grenze von 25 mm erreichen.

3.6 Korrelationen

Das Finden von Korrelationen ist das Ziel einer jeden Regressionsanalyse. Man möchte versuchen, eine sogenannte Zielvariable mithilfe bestimmter Kovariablen, auch Prädiktoren genannt, zu beschreiben. Je höher die Korrelation dieser Größen ist, desto präziser lassen sich die Werte der Zielvariable vorhersagen. Im Allgemeinen besitzt jedes Regressionsmodell einen gewisse Ungenauigkeit aufgrund zufälliger Störungen. Es ist also ein Modell gesucht, das möglichst geringe Ungenauigkeiten aufweist [5].

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit besteht darin, mögliche Korrelationen zwischen den Versuchsergebnissen und den Rezeptur- bzw. Material-Parametern zu finden. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Methoden, die für die Berechnung der Korrelationen angewendet werden. Zu Beginn folgt eine Beschreibung der relevanten Daten. Danach wird gezeigt, welche Regressionsverfahren verwendet werden und wie diese funktionieren. Dabei werden auch alle relevanten statistischen Parameter erklärt. Diese Parameter und die berechneten Regressionsfunktionen dienen am Ende als Ergebnisse der Auswertung. Alle erwähnten mathematischen Prozesse werden mit MATLAB durchgeführt.

3.6.1 Dateneingabe

Zu Beginn werden alle Werte definiert, die für die späteren Berechnungen notwendig sind. Herangezogen werden dafür die gewonnenen Versuchsergebnisse sowie ausgewählte Parameter, die beim Mischen von Mastix und Asphalt relevant sind. Aufgrund dessen, dass Mastix M6 nicht erfolgreich hergestellt werden konnte, werden die Daten des sechsten Mischguts nicht in die Berechnung der Korrelationen miteinbezogen. Damit bleiben acht Mischgüter zur weiteren Betrachtung übrig und die Stichprobengröße ergibt sich zu $n = 8$.

In MATLAB werden diese Daten in Matrizen eingepflegt. Die Spalten repräsentieren jeweils die Ergebnisse eines Versuchs bzw. die Werte eines Parameters. Die Zeilen stellen die 8 verschiedenen Asphaltmischgüter dar. Insgesamt werden sechs Matrizen verwendet, welche lauten: `TSRST_Ergebnisse`, `Relax_Ergebnisse`, `Asphalt_Parameter`, `Mastix_Parameter`, `Bitumen_Parameter` und `Fueller_Parameter`. Die erste Matrix beinhaltet die Ergebnisse nach Methode 2 der TSRST-Auswertung – T_{Ausfall} , $\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$, T_t , L_{Lin} und k_5 . Die zweite Matrix enthält nur eine einzige Spalte mit den λ_{Rel} -Werten der Mastix-Mischungen. Die vier Parameter-Matrizen enthalten zum einen charakteristische Mengenverhältnisse der verwendeten Materialien, zum anderen die Ergebniswerte, die im Verlauf der durchgeführten Versuche ermittelt werden. Die genauen Werte dieser Matrizen sind später im Anhang C gezeigt.

3.6.2 Berechnung

Mit den nun definierten Matrizen werden Korrelationen berechnet. Dafür kommen die lineare Einfachregression und die multiple lineare Regression zur Anwendung. In beiden Verfahren wird versucht, eine Funktion zu finden, mit der die Ergebnisse des Abkühlversuchs bestmöglich berechnet werden können. Die Werte der Matrix `TSRST_Ergebnisse` stellen also immer die Zielvariablen dar. Bei der linearen Einfachregression dienen die Werte der Matrix `Relax_Ergebnisse` als Einflussgrößen. Für die multiple lineare Regression werden die vier Parameter-Matrizen herangezogen, um die Korrelationen zu berechnen.

Lineare Einfachregression

Um die lineare Einfachregression mithilfe von MATLAB zu berechnen, wird sich der Funktion `fitlm` bedient. Damit werden die Regressionskoeffizienten β_k ermittelt, um eine Funktion der Form

$$f(x_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \varepsilon_i \quad \text{mit} \quad i = 1, \dots, n$$

zu erhalten [24]. Diese Regressionsfunktion wird für jede Spalte der Matrix `TSRST_Ergebnisse` berechnet. Die Kovariablen x_i stammen aus der Matrix `Relax_Ergebnisse`. ε_i stellt den Fehlerterm dar, der minimiert werden soll.

Bei der Anwendung von `fitlm` erhält man nicht nur die Regressionsfunktion, sondern auch eine Vielzahl an statistischen Parametern [24]. Im Zuge der Auswertung der Ergebnisse dieser Arbeit werden einige ausgewählte Parameter in Tabellenform angegeben. Darin sind folgende Werte enthalten:

- Bestimmtheitsmaß, R^2
- Korrigiertes Bestimmtheitsmaß, \bar{R}^2
- F -Wert des F -Tests
- Überschreitungswahrscheinlichkeit, p -Wert

Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Indikator dafür, wie gut sich die Zielvariable durch die Regressionsfunktion beschreiben lässt. Es kann alle Werte von 0 bis 1 annehmen. Während $R^2 = 0$

bedeutet, dass kein Erklärungsgehalt der Zielvariable gegeben ist, stellt $R^2 = 1$ eine perfekte Korrelation dar. Ein wesentlicher Nachteil des Bestimmtheitsmaßes ist, dass der Wert von R^2 immer ansteigt, wenn man dem Modell neue Prädiktoren hinzufügt, selbst wenn diese in der Realität nicht mit der Zielvariable zusammenhängen. Dieser Einfluss wird durch das korrigierte Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 berücksichtigt, indem die Anzahl der unabhängigen Variablen im Modell sowie die Stichprobengröße einbezogen werden. Dadurch kann \bar{R}^2 höchstens gleich groß sein wie R^2 . Darüber hinaus kann das korrigierte Bestimmtheitsmaß sogar negative Werte annehmen, insbesondere wenn die Anzahl der Variablen nahe an der Stichprobengröße liegt [5].

Der F -Test ist ein statistischer Test, der verwendet wird, um Varianzen oder Mittelwerte eines Regressionsmodells miteinander zu vergleichen. Man überprüft damit, ob die Kovariablen einen Erklärungsgehalt für die Zielvariable liefern, oder ob die Korrelation durch Zufall entstanden ist. Herangezogen wird dafür der F -Wert, der das Verhältnis von „Erklärter Streuung“ zu „Reststreuung“ darstellt. Liegt der F -Wert nahe bei 1, so ist die Korrelation wahrscheinlich auf Zufall zurückzuführen. Wenn er jedoch deutlich größer als 1 ist, kann man von einem signifikanten Effekt der Prädiktoren ausgehen [4].

Der p -Wert bildet die Basis für einen weiteren statistischen Test. Er wird auch als Überschreitungswahrscheinlichkeit bezeichnet und kann Werte von 0 bis 1 annehmen. Der p -Wert gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass der Zusammenhang zwischen den Kovariablen und der Zielvariable lediglich durch Zufall entstanden ist, wenn die Nullhypothese wahr wäre. Definitionsgemäß ist die Nullhypothese jene Annahme, dass es keinen Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen gibt. Ergo weist ein kleiner p -Wert auf eine hohe statistische Signifikanz des Modells oder eines Parameters hin [3, 4].

Zusätzlich zu den genannten statistischen Kennwerten werden für die signifikantesten Regressionen Grafiken erstellt. Dabei werden die gemessenen Versuchswerte mit jenen Werten verglichen, die anhand der Regressionsfunktion errechnet werden. Die jeweiligen Differenzen geben Auskunft über die Güte der Korrelation.

Multiple lineare Regression

Die multiple lineare Regression ermöglicht es, mehrere Parameter aus einer Matrix in die Regression einfließen zu lassen. Man versucht also eine Funktion mit der Struktur

$$f(x_{i,1}, \dots, x_{i,k}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i,1} + \beta_2 \cdot x_{i,2} + \dots + \beta_k \cdot x_{i,k} + \varepsilon_i \quad \text{mit } i = 1, \dots, n$$

zu finden [24]. Die Verknüpfung der Parameter-Matrizen bietet aufgrund ihrer hohen Spaltenanzahl sehr viele verschiedene Kombinationen, um eine Regressionsfunktion zu ermitteln. Für die Auswertung wird deshalb auf die MATLAB-Funktion `stepwiselm` zurückgegriffen.

Diese Funktion startet mit dem Erstellen eines konstanten Modells, welches nur den Parameter β_0 enthält. Danach werden automatisch neue Variablen $x_{i,k}$ hinzugefügt oder entfernt, bis das definierte Qualitätskriterium erfüllt ist. Der Prozess des Hinzufügens und Entfernens von Prädiktoren erfolgt nach einem bestimmten System, das je nach Belieben des Anwenders verändert werden kann. Standardmäßig funktioniert dieses System so, dass für jeden Parameter überprüft wird, wie hoch der p -Wert wäre, wenn man diesen Parameter zum Modell hinzufügen würde. Wenn der p -Wert kleiner oder gleich `PEnter` ist, dann wird der Parameter ergänzt. Sollten mehrere Prädiktoren innerhalb dieser Grenze liegen, wird nur der hinzugefügt, der den kleinsten p -Wert besitzt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis kein Parameter mehr diese Bedingung erfüllt. Daraufhin wird noch überprüft, ob die bereits enthaltenen Variablen wieder entfernt werden sollen. Dabei wird für jeden Prädiktor ermittelt, wie hoch der p -Wert wäre, wenn man diesen entfernt. Beträgt der p -Wert `PRemove` oder höher, wird die entsprechende Variable aus dem System

entfernt. Wenn auch dieser Schritt abgeschlossen ist, erhält man die finale Regressionsfunktion. Die voreingestellten Grenzen der p -Werte sind $\text{PEnter} = 0,05$ und $\text{PRemove} = 0,10$ [25].

Diese Grenzen werden für die Berechnungen in der vorliegenden Diplomarbeit beibehalten. Außerdem wird hiermit festgelegt, dass nicht mehr als drei unabhängige Variablen für die Regression einer Zielvariable herangezogen werden, da es nur acht Stichproben gibt. Sollte die Anwendung von `stepwiselm` eine Funktion mit drei oder noch mehr Prädiktoren ergeben, wird eine erneute Berechnung mit `fitlm` durchgeführt, bei der die Anzahl an eingehenden Parametern manuell reduziert wird. Aus Gründen der Vollständigkeit wird die ursprüngliche Regressionsfunktion ebenfalls angeführt.

Nachdem die multiple lineare Regression berechnet wurde, werden dieselben Ergebnisse wie bei der linearen Einfachregression tabellarisch ausgegeben: R^2 , \bar{R}^2 , F -Wert und p -Wert. Ebenso wird eine graphische Darstellung aller signifikanten Regressionen gezeigt. Auch in diesem Fall werden die Werte der Zielvariable mit der Regressionsfunktion berechnet und den tatsächlichen Werten gegenübergestellt.

Ergebnisse

Das Ziel dieses Kapitels ist, die Ergebnisse aller Versuche und aller Regressionsanalysen kompakt zusammenzufassen. Die Messwerte werden hauptsächlich in Tabellen und Abbildungen präsentiert. Gleichermaßen werden die Resultate der Regressionen dargestellt. Auf Basis dessen werden die Ergebnisse interpretiert und die wichtigsten Resultate analysiert. Die Versuchsergebnisse sind separat, je nach Materialebene, gezeigt. Am Ende folgen die Berechnungsergebnisse der Korrelationen. Wenn Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern vorhanden sind, wird die Signifikanz diskutiert und es wird versucht, mögliche Zusammenhänge mit theoretischen Überlegungen zu begründen. Gewisse Informationen, die sehr umfangreich sind, werden im Anhang bereitgestellt. Darauf wird an den entsprechenden Stellen im Text verwiesen.

4.1 Bindemittel

Vier verschiedene Versuche wurden auf der Bitumen-Ebene durchgeführt. Die Resultate davon sind in Tab. 4.1 zu sehen. Zur besseren Vergleichbarkeit sind in der Tabelle jeweils nur ein Wert des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels angeführt. Die detaillierten Ergebnisse der DSR-Versuche sowie die Graphen der Relaxationsversuche sind im Anhang B enthalten.

Tab. 4.1: Ergebnisse der Bitumen-Versuche

Nr.	Laborcode	$ G^* ^1$ [MPa]	δ^1 [°]	λ_{Rel} [MPa · s]	Pen [1/10 mm]	EP [°C]
B1	B1673B_LR TF	72,9	25,8	9,64		
B2	B1531B_LR TF	127,6	21,8	19,47		
B3	B1161B_LR TF	71,7	26,8	10,15		
B4	B1673A			6,09	57	82,0
B5	B1531A			15,52	37	77,4
B6	B1161A			6,73	51	81,0

¹ Prüfbedingungen: 0,03183 Hz; -12 °C

Anhand der erhaltenen Daten ist gemäß aller Erwartungen erkennbar, dass die rheologischen Eigenschaften des PmB 45/80-80 (B1 bzw. B4) und des PmB 45/80-65 (B3 bzw. B6) sehr ähnlich sind. Die größte prozentuale Abweichung findet sich beim Penetrationswert und beträgt etwa 11 %. Obwohl der grundlegende Unterschied dieser beiden Bindemittel in der Klassifikation des Erweichungspunkts liegt, fallen die Werte des EPs sehr ähnlich aus.

Größere Unterschiede weist das PmB 25/55-65 (B2 bzw. B5) auf. Im Vergleich zu den beiden anderen Bitumen ist der komplexe Schermodul nahezu doppelt so groß. Die höhere Steifigkeit drückt sich auch durch die niedrigere Penetrationstiefe aus. Der Erweichungspunkt liegt ein bisschen tiefer als bei den anderen beiden PmBs. Ebenso ist der Phasenwinkel des PmB 25/55-65 am niedrigsten. Einen weiteren merklichen Unterschied findet man auch in den Ergebnissen des Relaxationsversuchs, denn die λ_{Rel} -Werte von B2 und B5 sind ca. doppelt so hoch wie die Werte der steiferen Bitumen. Der Relaxationsversuch ist auch der einzige Versuch, der mit den ungealterten und den RTFOT-gealterten Bindemitteln durchgeführt wurde. Wenn man jeweils die gepaarten Werte betrachtet, erkennt man, dass mit der Kurzzeitalterung von allen drei Bitumen eine sichtliche Steigerung der Scherrelaxationsviskosität einher geht. Summa summarum sprechen die gegebenen Werte dafür, dass dieses Bitumen ein steiferes Materialverhalten und eine geringere Relaxationsfähigkeit besitzt als die anderen beiden.

4.2 Mastix

Die Daten aller durchgeführten Relaxationsversuche können Abb. 4.1 entnommen werden. Darin sind die Mittelwerte der jeweiligen Versuchsergebnisse in einem Balkendiagramm dargestellt. Die Standardabweichungen dieser Ergebnisse werden durch die Fehlerbalken repräsentiert. Die aufgezeichneten Messwerte während des Versuchs sind im Anhang B graphisch dargestellt. Mastix M1 bildet die Referenz mit einer Scherrelaxationsviskosität von $27,9 \text{ MPa} \cdot \text{s}$.

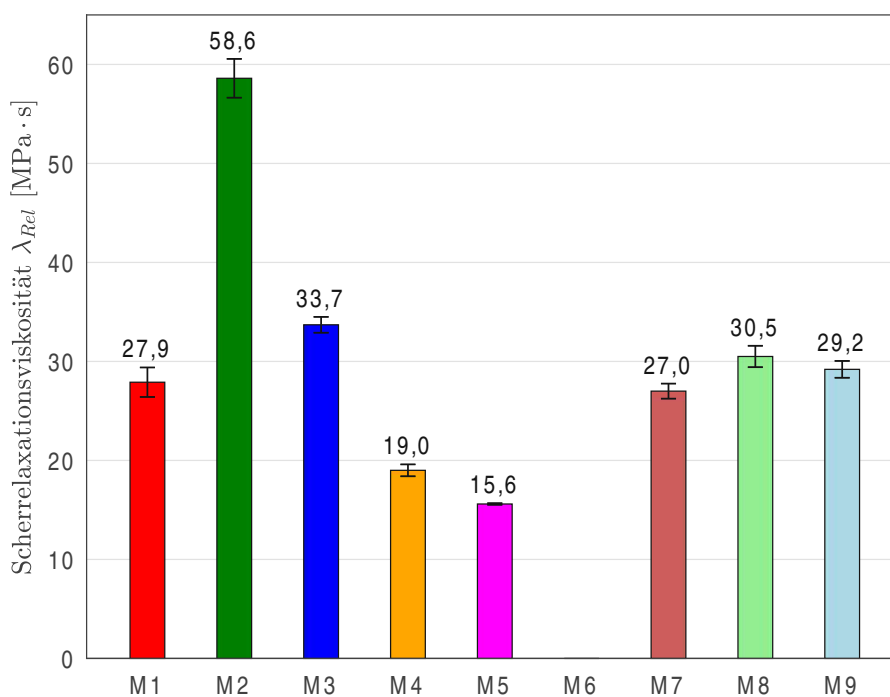


Abb. 4.1: Ergebnisse der Mastix-Relaxationsversuche

Die λ_{Rel} -Werte der ersten drei Mastix-Mischungen steigen im Vergleich zu den Werten der jeweiligen Bitumen aus Tab. 4.1 auf etwa das Dreifache an. Die Proportionalitäten innerhalb dieser drei Mischungen sind also gleich geblieben. Damit erhält man eine grobe Einschätzung, welchen Einfluss die zugegebenen Füller im entsprechenden Verhältnis haben.

Mastix M4 besitzt im Unterschied zu M1 kein Kalkhydrat, sondern nur Kalksteinmehl als Fremdfüller. Dadurch reduziert sich die Scherrelaxationsviskosität fast auf zwei Drittel. Kalkhydrat dürfte die Eigenschaft der Relaxation also maßgebend beeinflussen.

Außerdem spielt das Verhältnis von Bitumen zu Füller eine große Rolle. Die Mischung M5 besitzt den geringsten Füllergehalt und gleichzeitig den geringsten Wert für λ_{Rel} . Das entspricht der Annahme, dass durch einen niedrigeren Füllergehalt eine ausgeprägtere Relaxation im Material möglich ist, da das Bitumen für die Relaxation verantwortlich ist. Anders ausgedrückt bedeutet das, je weniger Füller dem Bitumen beigemischt wird, desto weiter nähert sich λ_{Rel} an den Wert des reinen Bitumens an.

Wie bereits erwähnt, wurden für M6 keine Relaxationsversuche durchgeführt, da diese Mastix-Mischung keine homogene Masse bilden konnte. Der Vollständigkeit halber ist diese Mischung ohne einen zugeordneten Wert in der Grafik angegeben.

Die letzten drei Mastix-Mischungen – M7, M8 und M9 – weichen nicht wesentlich vom Referenzwert ab. Dies lässt sich auf die nahezu identischen Mischungsverhältnisse zurückführen. Mastix M9 besitzt die Besonderheit, dass der Eigenfüller aus dem Basalt-Gestein anstatt aus dem Kersantit-Gestein enthalten ist. Das macht sich aber nur in einer minimalen Differenz bemerkbar.

4.3 Mischgut

Auf der Ebene des Asphaltmischguts wurden nur Kälteprüfungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind sehr aufschlussreich und wichtig für die weiteren Beobachtungen der verschiedenen Mischgüter. Die Auswertung erfolgt mithilfe der zwei Varianten, die in Kapitel 3.1.3 erklärt wurden. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser beiden Varianten untersucht.

Methode 1

Abbildung 4.2 zeigt die Entwicklung der kryogenen Spannungen in Abhängigkeit der Probekörper-Temperatur als Mittelwert von drei Einzelprüfungen. Das erste Mischgut, welches in rot dargestellt ist, wird immer als Referenz herangezogen. Das Versagen dieses Mischguts ist bei $-30,1\text{ °C}$ und einer Spannung von $5,8\text{ N/mm}^2$ aufgetreten. An dieser Stelle sei erwähnt, dass in der folgenden Beschreibung immer von betragsmäßig höchsten bzw. tiefsten Temperaturen gesprochen wird. Eine hohe Ausfalltemperatur entspricht nach dieser Festlegung einem guten Tieftemperaturverhalten.

Mischgut A2 besitzt die betragsmäßig kleinste Ausfalltemperatur. Sie ist um 14 % niedriger als die Ausfalltemperatur des Referenzmischguts. Die Spannungen sind hingegen in jedem Temperaturbereich am größten. Dies lässt sich auf das härtere Bitumen zurückführen, denn das PmB 25/55-65 (B1) besitzt den höchsten komplexen Schermodul und die höchste Scherrelaxationsviskosität (siehe Kap. 4.1). Dadurch baut es die inneren Spannungen am langsamsten ab und versagt sehr früh.

Ebenso besitzt A5 eine vergleichsweise niedrige Bruchtemperatur. Die Differenz zum Referenzmischgut beträgt hier 10 %. Durch den geringen Füllergehalt kann diese Asphaltmischung die Spannungen schnell relaxieren, weshalb die Spannungen über den gesamten Temperaturbereich am kleinsten sind. Dieses Verhalten spiegelt sich auch im niedrigen λ_{Rel} -Wert des zugehörigen Mastix M5 wider. Das Relaxieren der Spannungen sollte grundsätzlich zu besserem Tieftemperaturverhalten führen, was in diesem Fall aber nicht zutrifft. Das liegt vermutlich an der zu geringen Zugfestigkeit, die ebenfalls mit der Reduktion des Fülleranteils einhergeht.

Mit dem höchsten Füllergehalt stellt das Asphaltmischgut A6 das Pendant zu A5 dar. Beide sind so konzipiert, dass die Grenzen der Norm überschritten sind. Wie im Buch von Andres [1] erwähnt, lässt ein hoher Feinanteil auf sehr steifes und sprödes Verhalten des Asphalts schließen, was wiederum mit frühem Versagen unter Kälteeinwirkung resultieren würde. Entgegen aller Vermutungen besitzt das Mischgut A6 jedoch die höchste Ausfalltemperatur mit $-32,0\text{ °C}$. In

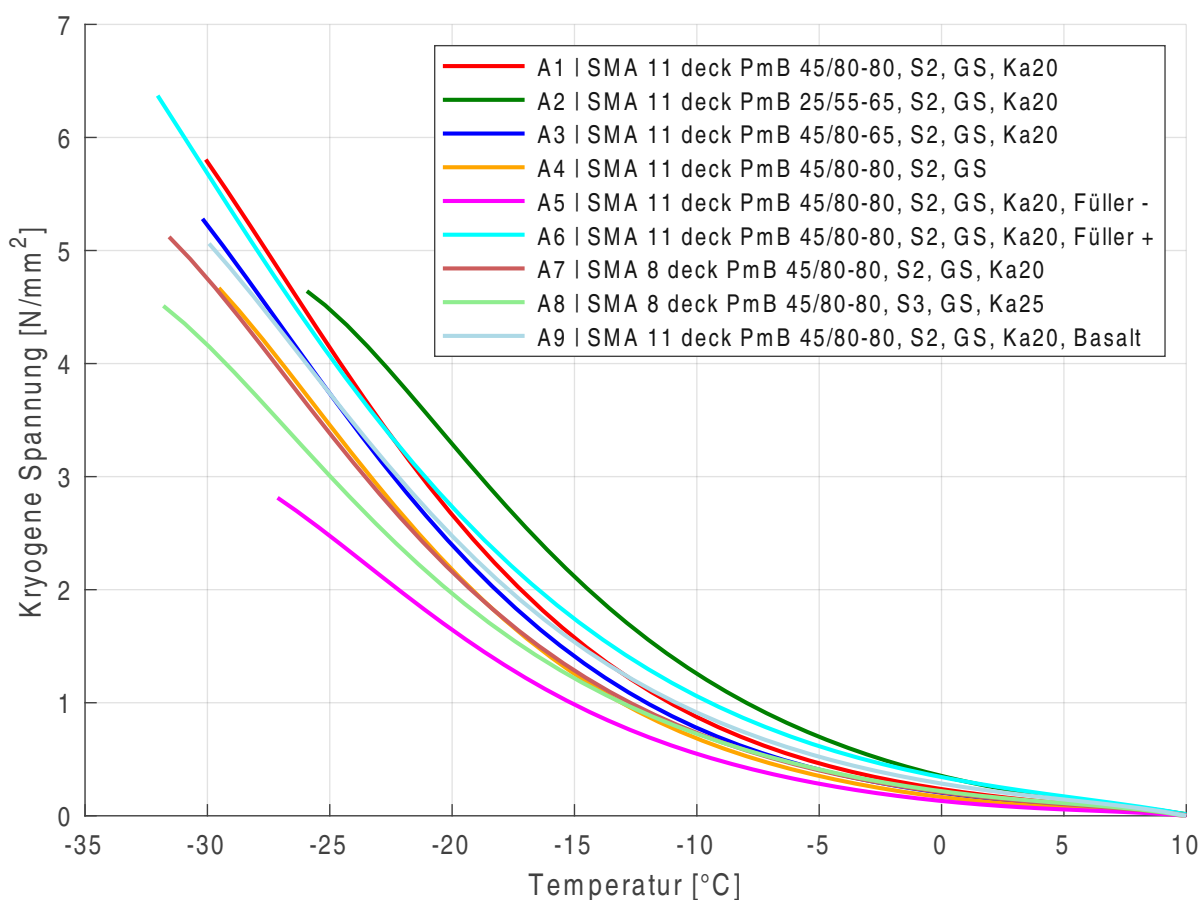


Abb. 4.2: Spannungsverläufe aller Asphaltmischgüter

diesem konkreten Fall könnte aber auch der hohe Anteil an Fremdfüller und die damit besseren Affinitätseigenschaften zum Gestein zu solch einem guten Resultat geführt haben. Bei der späteren Analyse der Korrelationen wird dieses Mischgut nicht in die Berechnung mit einfließen, weil die dazugehörige Mastix-Mischung nicht hergestellt werden konnte.

Die Asphaltmischgüter A3 und A9 zeigen ein sehr ähnliches Verhalten und weisen beinahe dieselbe Bruchtemperatur auf. Zudem weichen ihre Temperaturen nur minimal vom Referenzwert ab. A3 wurde mit einem PmB 45/80-65 (B3) gemischt, welches laut Klassifikation einen niedrigeren Erweichungspunkt besitzt als das PmB 45/80-80 (B1). Die Bitumen-Versuche zeigten jedoch, dass die tatsächlichen Erweichungspunkte nahezu ident sind. Aus diesem Grund ist es plausibel, dass der Kälteversuch ähnliche Werte liefert. Beim Herstellen von A9 wurde ein anderes Gestein verwendet. A9 enthält Gesteinskörnungen aus Basalt, welches dem Asphaltmischgut offenbar ähnliche Tieftemperatur-Eigenschaften verleiht wie das Kersantit-Gestein. Die Spannungsverläufe der Mischungen A3 und A9 sind ebenfalls sehr ähnlich, weichen aber ein wenig von der Referenzkurve ab.

Neben A6 gibt es zwei weitere Mischungen, die eine höhere Ausfalltemperatur aufweisen als die Referenz, nämlich A7 und A8. Beide haben ein Größtkorn (GK) von 8 mm. Asphalte mit GK 8 besitzen einen homogenen Aufbau gegenüber Asphalten mit GK 11. Dies bewirkt, dass sich die Spannungen sehr homogen über den Probekörper verteilen können, weshalb kleinere Spannungsspitzen entstehen. Damit lässt sich das spätere Versagen erklären. Der Unterschied zwischen den Temperaturen von A7 und A8 selbst ist vernachlässigbar gering, da er innerhalb der Messtoleranz

liegt. Das ist insofern beachtlich, da die Füller-Kategorie Ka_{25} laut *ÖNORM EN 13043* [18] höherwertiger ist als Ka_{20} . Möglicherweise ist man hier in einem Temperatur-Bereich angelangt, an dem dieser Unterschied keine wesentliche Rolle mehr spielt. Die Füller-Kategorie scheint jedoch einen Einfluss auf die Ausfallspannungen zu haben, denn diese ist bei A8 um $0,6 \text{ N/mm}^2$ niedriger als bei A7, was einer Reduktion von knapp 12 % entspricht.

Das Mischgut A4 besitzt hingegen gar kein Kalkhydrat und fällt damit in die Kategorie Ka_{NR} . Das macht sich mit einem minimal schlechteren Ergebnis in der Ausfalltemperatur bemerkbar, welche lediglich um $0,6 \text{ °C}$ kleiner ist als die Ausfalltemperatur des Referenz-Mischguts. Allerdings ist die Ausfallspannung verglichen mit A1 deutlich geringer. Auf Grundlage dieser Resultate stellt man also fest, dass die Füller-Kategorie wenig Einfluss auf T_{Ausfall} haben dürfte. Nur die Spannungen unterscheiden sich merklich, was aufgrund des geringen λ_{Rel} von M4 bereits zu vermuten war.

In Abbildung 4.3 sind ausgehend von der Nulllinie die Ausfalltemperatur und die zugehörige Ausfallspannung zu sehen. Oberhalb sind die Spannungen eingetragen und unterhalb dieser Linie sind die Temperaturen eingetragen. Man beachte, dass sich dadurch unterschiedliche Einheiten auf der Ordinate ergeben. Die gegebenen Informationen dieser Abbildung sind im Grunde genommen schon in der vorherigen Grafik enthalten. Die Darstellung in einem Balkendiagramm inklusive Zahlenwerten macht die Ergebnisse jedoch besser vergleichbar.

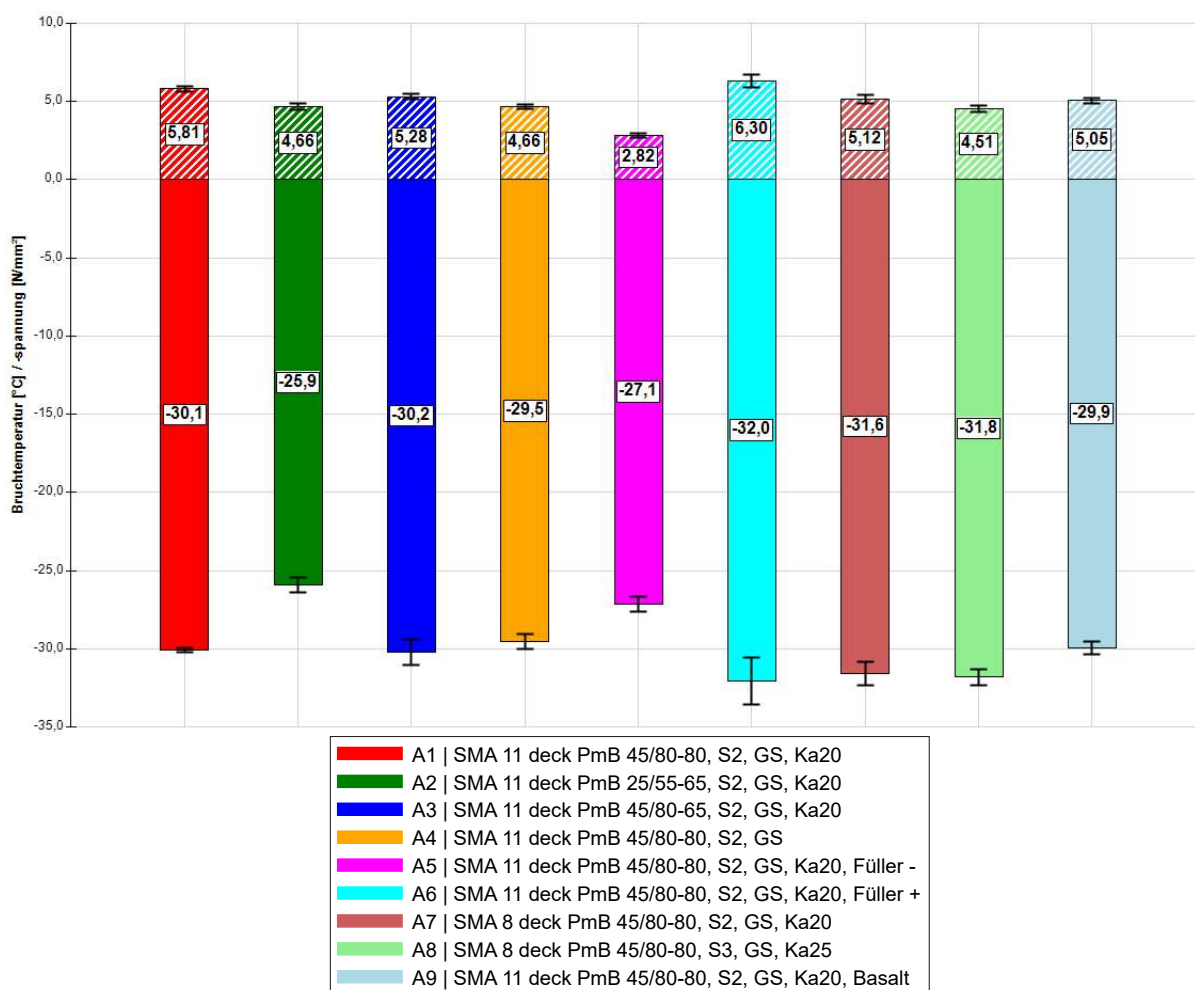


Abb. 4.3: Balkendiagramm der Ausfalltemperatur und Ausfallspannung aller Mischgüter

Unter Betrachtung der Bruchtemperaturen ist erkennbar, dass sich gewisse Gruppierungen bilden. Die Mischgüter A3, A4 und A9 beispielsweise haben sehr ähnliche Ergebnisse wie die Referenz. Die geänderten Parameter dieser Mischgut-Varianten betreffen das Bitumen (PmB 45/80-65), die Füllerkategorie (Ka_{NR}) und das Gestein (Basalt). Diese drei Änderungen haben also offensichtlich keine beträchtlichen Auswirkungen auf $T_{Ausfall}$, allerdings sinken die Werte von $\sigma_{kry,Ausfall}$, im Falle von Mischgut A4 sogar um knapp 20 %. Eine zweite Gruppierung beinhaltet A2 sowie A5, welche früheres Versagen aufweisen. Dies wird hervorgerufen durch das PmB 25/55-65 bzw. durch das vergrößerte Bitumen:Füller-Verhältnis. Die höhere Ausfalltemperatur geht einher mit einer niedrigeren Ausfallspannung. Dieser Effekt ist insbesondere bei A5 sehr stark, welches mit $2,8 \text{ N/mm}^2$ den kleinsten Wert aller Asphalte besitzt und damit auf rund die Hälfte vom Referenzwert abfällt. Die Asphaltmischgüter A6, A7 und A8 sind die einzigen, die eine Verbesserung von $T_{Ausfall}$ aufweisen. Die besseren Werte von A6 liegen entweder am generell sehr hohen Fülleranteil, oder aber am hohen Gehalt des Fremdfüllers. Dieses Mischgut stellt eine Ausnahme dar, weil nur hier eine höhere Bruchspannung gemessen wurde als im Referenz-Mischgut. Bezüglich der Ausfallspannungen werden die Extremwerte also von den Varianten „Füller –“ und „Füller +“ belegt. Die übrigen beiden Asphalte besitzen geringere Spannungen als A1, was auf den Parameter des Größtkorns zurückzuführen ist.

Methode 2

Die zweite Methode befasst sich tiefergehend mit den Merkmalen der Spannungsverläufe. Alle nach diesem Verfahren ermittelten Daten sind in Tab. 4.2 aufgelistet. Die Werte für die Ausfalltemperatur stimmen mit denen aus Methode 1 exakt überein. Bei den Ausfallspannungen beider Methoden gibt es Differenzen, diese sind jedoch marginal.

Tab. 4.2: Ergebnisse der TSRST-Auswertung nach Methode 2

Nr.	Laborcode	$T_{Ausfall}$ [°C]	$\sigma_{kry,Ausfall}$ [N/mm ²]	k_5 [N/mm ² /K]	T_t [°C]	L_{Lin} [-]
A1	AS1837	-30,1	5,80	-0,01979	-22,7	7,75
A2	AS1838	-25,9	4,64	-0,02919	-25,7	0,27
A3	AS1840	-30,2	5,28	-0,01714	-27,9	2,38
A4	AS1841	-29,5	4,67	-0,01230	-28,8	0,78
A5	AS1842	-27,1	2,81	-0,00972	-26,3	0,81
A6	AS1843	-32,0	6,37	-0,02907	-26,3	6,03
A7	AS1854	-31,6	5,12	-0,01591	-31,0	0,57
A8	AS1863	-31,8	4,51	-0,01627	-31,4	0,44
A9	AS1865	-29,9	5,06	-0,02322	-28,9	1,07

Bezüglich der Steigungen bei +5 °C haben die Mischgüter A2 und A6 die betragsmäßig größten Werte. Die Spannungen in diesen beiden Probekörpern steigen also zu Beginn des Versuchs am schnellsten an. Das ist auch in Abb. 4.2 erkennbar. Vor allem das Mischgut A6 setzt diesen Trend fort und baut mit voranschreitender Zeit deutlich höhere Spannungen auf als die übrigen. A5 hat den betragsmäßig niedrigsten Wert für k_5 . Auch das kann man Abb. 4.2 entnehmen. Der Graph dieses Asphaltmischguts ist stets unterhalb der anderen, da die Spannungen in jedem Temperatur-Bereich am stärksten relaxieren. Daraus lässt sich erneut schließen, dass der hohe Feinanteil im Mischgut zu wesentlich niedrigerem Relaxationsvermögen führt, da diese Eigenschaft auf das Bitumen beschränkt ist.

L_{Lin} hängt unter anderem von T_t und $T_{Ausfall}$ ab. Je weiter diese beiden Temperaturen auseinander liegen, desto größer wird der Wert von L_{Lin} . Das heißt im Umkehrschluss, dass das

Materialverhalten vor dem Versagen nahezu linear-elastisch ist, wenn L_{Lin} hoch ist. Das trifft deutlich auf die Asphalte A1 und A6 zu. Man sieht in Abb. 4.2, dass der Spannungsaufbau in tiefen Temperaturen fast linear erfolgt. Hier werden also keine Spannungen mehr durch Relaxation abgebaut. A3 besitzt mit einem L_{Lin} von 2,38 ebenfalls einen kurzen linearen Anteil vor dem Bruch. Alle anderen Mischgüter haben wesentlich kleinere Werte. In Abb. 4.2 macht sich das durch eine Krümmung am Ende des Versuchs bemerkbar. Insbesondere fällt die Steigung des Mischguts A2 sehr schnell ab bevor es reißt. Diese Krümmung lässt sich aber nicht damit begründen, dass im Tieftemperatur-Bereich plötzlich wieder Spannungen relaxieren. Diese Asphaltproben haben wohl eher ein minimal duktilen Versagen, sodass sich die Zunahme der Spannungen kurz vor dem Bruch verringert. Dahingehend ist beispielsweise ein Vergleich der Asphalte A2 und A6 sehr interessant. Denn diese haben ähnlich hohe Steigungen bei 5 °C. Am Ende des Versuchs sind die Charakteristiken dieser beiden Graphen aber grundlegend verschieden.

4.4 Korrelationen

Das letzte Unterkapitel beschäftigt sich mit den Korrelationen der bisher ausgewerteten Ergebnisse. Es werden die mathematischen Statistik-Parameter gezeigt und miteinander verglichen. Ebenso werden die errechneten Regressionsfunktionen dargestellt. Für die besten Korrelationen folgt eine genauere Betrachtung, wobei angemerkt sei, dass die Beurteilung einer „guten“ Korrelation immer subjektiv ist und nicht nur von mathematischen Werten abhängt.

4.4.1 Lineare Einfachregression

Zu Beginn wird mit der linearen Einfachregression gestartet, bei der die TSRST-Ergebnisse nur mit den Ergebnissen der Mastix-Relaxationsversuche verglichen werden. Das Ziel dabei ist, festzustellen, ob Korrelationen zwischen der Mastix-Ebene und der Mischgut-Ebene vorhanden sind. Damit geht man der Frage nach, ob man anhand von kürzer dauernden Mastix-Versuchen auf das Kälteverhalten des Asphalts schließen kann.

Die Werte aus dem Relaxationsversuch (Abb. 4.1) werden nun als Kovariable $\lambda_{\text{Rel},M}$ verwendet. Die Zielvariablen stammen aus der detaillierten TSRST-Auswertung in Tab. 4.2. Da es keine Werte für Mastix M6 gibt, werden die TSRST-Ergebnisse von A6 nicht in der Auswertung berücksichtigt. All diese Variablen werden in MATLAB mithilfe der beiden Matrizen `TSRST_Ergebnisse` und `Relax_Ergebnisse` definiert, welche tabellenförmig im Anhang C gegeben sind. Die Resultate der zugehörigen Korrelationsanalyse sind in Tabelle 4.3 zu sehen. Diese ist durch einen Doppelstrich in zwei Bereiche aufgeteilt. In der oberen Hälfte sind die statistischen Kennwerte aufgelistet und in der unteren Hälfte sind die Regressionsfunktionen zu sehen.

Durch die Betrachtung des Bestimmtheitsmaßes lässt sich schnell feststellen, dass nur eine Zielvariable mit der Scherrelaxationsviskosität korrelieren könnte, nämlich k_5 . Alle übrigen Größen lassen sich nicht gut mit einer von $\lambda_{\text{Rel},M}$ abhängigen Funktion beschreiben. Diese These wird speziell durch das korrigierte Bestimmtheitsmaß bestätigt, denn dieses nimmt sehr kleine, zum Teil sogar negative Werte an. Zusätzlich sind die p -Werte deutlich zu hoch bzw. die F -Werte deutlich zu niedrig, um auf signifikante Korrelation schließen zu können.

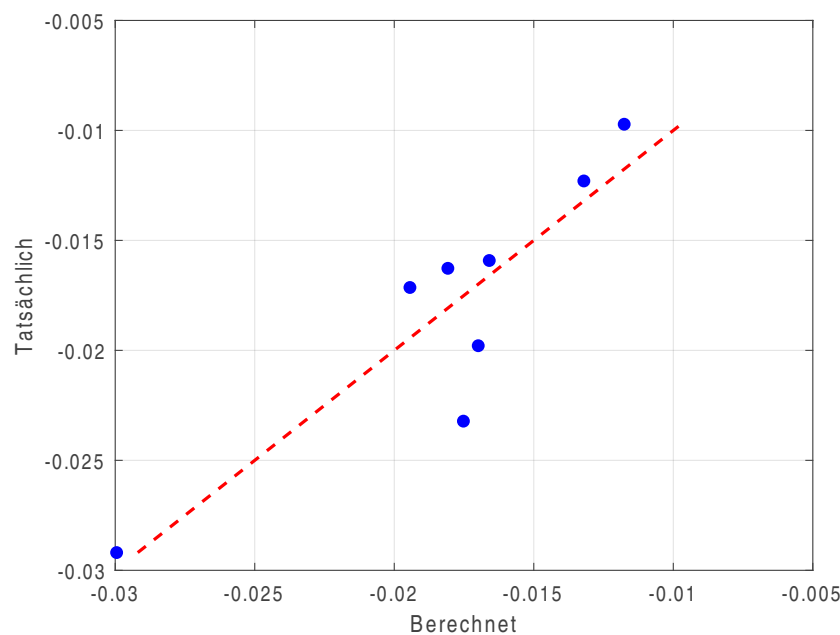
Somit muss also nur die Korrelation von k_5 genauer untersucht werden. Das Bestimmtheitsmaß von 0,7929 kann auf einen Zusammenhang hindeuten, ist alleine aber noch nicht ausreichend. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß von rund 0,76 liegt nicht weit darunter, was für eine Korrelation spricht. Des Weiteren befindet sich der p -Wert unter der 5 %-Grenze¹ und der F -Wert ist größer

¹Das Signifikanz-Kriterium von $p < 0,05$ ist lediglich eine Konvention, die häufig in der Literatur verwendet wird [26].

Tab. 4.3: Korrelationen zwischen Mastix- und Mischgut-Ergebnissen mittels linearer Einfachregression

Zielvariable	Kovariable	R^2	\bar{R}^2	p-Wert	F-Wert
T_{Ausfall}	$\lambda_{\text{Rel,M}}$	0,1534	0,0122	0,3374	1,087
$\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$	$\lambda_{\text{Rel,M}}$	0,0905	-0,0611	0,4692	0,597
k_5	$\lambda_{\text{Rel,M}}$	0,7929	0,7584	0,0030	22,97
T_t	$\lambda_{\text{Rel,M}}$	0,0344	-0,1266	0,6602	0,214
L_{Lin}	$\lambda_{\text{Rel,M}}$	0,0117	-0,1530	0,7983	0,071
<hr/>					
$f(x_i)$	$= \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \varepsilon_i$				
<hr/>					
T_{Ausfall}	$= -31,38 + 0,06144 \lambda_{\text{Rel,M}} + \varepsilon$				
$\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$	$= 4,119 + 0,02051 \lambda_{\text{Rel,M}} + \varepsilon$				
k_5	$= -0,005172 - 0,0004231 \lambda_{\text{Rel,M}} + \varepsilon$				
T_t	$= -29,08 + 0,04120 \lambda_{\text{Rel,M}} + \varepsilon$				
L_{Lin}	$= 2,392 - 0,02097 \lambda_{\text{Rel,M}} + \varepsilon$				

als 1. All diese Informationen sind Grund zur Annahme, dass sich k_5 gewissermaßen durch die Scherrelaxationsviskosität beschreiben lässt. Um dies zu überprüfen, werden die Ergebnisse dieser Regression noch graphisch ausgewertet. Abbildung 4.4 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten und tatsächlichen Werte für k_5 .

**Abb. 4.4:** Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von k_5 ($R^2 = 0,7929$)

Es sieht tatsächlich so aus, als würde eine lineare Abhängigkeit existieren, allerdings mit einer nicht vernachlässigbaren Streuung. Speziell der Datenpunkt von A9 stellt sich als Ausreißer heraus, mit einem tatsächlichen k_5 -Wert von -0,0232 und einem berechneten Wert von -0,1752, was einer Abweichung um rund 25 % entspricht. Der lineare Zusammenhang des Spannungsanstiegs zu Beginn des Abkühlversuchs mit der Scherrelaxationsviskosität ist aber durchaus plausibel. Wie man in der unteren Hälfte aus Tab. 4.3 sehen kann, geht $\lambda_{\text{Rel,M}}$ negativ in die Berechnung

der Regressionsfunktion ein. Wenn $\lambda_{\text{Rel},M}$ also größer wird, dann steigt k_5 betragsmäßig ebenfalls an. Das deckt sich mit der Annahme, dass die absolute Steigung des Spannungsverlaufs bei 5 °C höher ist, wenn der zugehörige Mastix weniger Relaxation zulässt. Somit deuten die vorliegenden Ergebnisse auf eine reale Korrelation hin und der abweichende Datenpunkt kann als valider Ausreißer eingestuft werden.

4.4.2 Multiple lineare Regression

Während das vorherige Kapitel nur Regressionen mit dem $\lambda_{\text{Rel},M}$ -Wert umfasst, werden hier die Regressionen mit mehreren verschiedenen Variablen erprobt. Um diese möglichen Zusammenhänge zu finden, greift man auf multiple lineare Regression zurück. Die Zielvariablen bleiben gleich wie im letzten Abschnitt, es werden wieder die detaillierten TSRST-Ergebnisse aus Tab. 4.2 verwendet. Alle untersuchten Kovariablen sind in Tab. 4.4 angeführt. Die exakten Eingabedaten der vier genannten Kategorien sind wieder im Anhang C zusammengetragen.

Tab. 4.4: Übersicht aller untersuchten Variablen in der multiplen linearen Regression

Kategorie	Variable	Langbezeichnung	Einheit
Asphalt	GK	Größtkorn	mm
	HR _B	Hohlraumgehalt, Verfahren B	V-%
	HR _D	Hohlraumgehalt, Verfahren D	V-%
Mastix	FF _M	Fremdfüller-Anteil	M-%
	EF _M	Eigenfüller-Anteil	M-%
	B _M	Bitumen-Anteil	M-%
	B : F	Bitumen : Füller-Verhältnis	-
	$\lambda_{\text{Rel},M}$	Scherrelaxationsviskosität	MPa · s
Bitumen	$ G^* $	Komplexer Schermodul, kurzzeitgealtert	Pa
	δ	Phasenwinkel, kurzzeitgealtert	°
	$\lambda_{\text{Rel},A}$	Scherrelaxationsviskosität, ungealtert	MPa · s
	$\lambda_{\text{Rel},B}$	Scherrelaxationsviskosität, kurzzeitgealtert	MPa · s
	Pen	Penetrationswert, ungealtert	1/10 mm
	EP	Erweichungspunkt, ungealtert	°C
Füller	FF _F	Fremdfüller-Anteil	M-%
	EF _F	Eigenfüller-Anteil	M-%
	FF : EF	Fremdfüller : Eigenfüller-Verhältnis	-

In einem ersten Schritt wird die multilineare Regressionsanalyse mit der Funktion `stepwiselm` durchgeführt, um automatisch die am besten zutreffendste Regression zu erhalten. Die entsprechenden Parameter dieser Analyse sind in der Tabelle 4.5 aufgelistet. Jene Tabelle ist ebenfalls in zwei Bereiche geteilt. Zuerst werden die verwendeten Variablen und zugehörige Statistik-Werte gezeigt, danach sind die berechneten Regressionsfunktionen angegeben.

Verglichen mit den Ergebnissen der linearen Einfachregression erkennt man, dass die Betrachtung von verschiedenen Variablen teilweise zu deutlich höheren Korrelationen führt. Besonders der hohe Wert für R^2 von 0,9992 für die Berechnung von T_{Ausfall} sticht heraus. Darauf wird aber erst ein wenig später eingegangen.

Beim Bilden einer Regressionsfunktion für L_{Lin} besitzt keine Kovariable einen p -Wert, welcher kleiner als 0,05 ist. Deshalb konnte mit den gewählten Kriterien keine zutreffende Regression zur Berechnung von L_{Lin} gefunden werden.

Tab. 4.5: Korrelationen zwischen den Mischgut-Ergebnissen und den Rezeptur- bzw. Materialparametern mittels multipler linearer Regression

Zielvariable	Kovariablen(n)	R^2	\bar{R}^2	p -Wert	F -Wert
T_{Ausfall}	GK / B:F / $ G^* $	0,9992	0,9987	$1,09 \cdot 10^{-6}$	1751
$\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$	B_M	0,7885	0,7533	0,0032	22,37
k_5	$\lambda_{\text{Rel,M}}$	0,7929	0,7584	0,0030	22,97
T_t	GK	0,5185	0,4382	0,0440	6,46
L_{Lin}	/	-	-	-	-

$f(x_{i,1}, \dots, x_{i,k})$	$= \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i,1} + \beta_2 \cdot x_{i,2} + \dots + \beta_k \cdot x_{i,k} + \varepsilon_i$
T_{Ausfall}	$= -36,63 + 0,5755 \text{ GK} - 5,682 \text{ B:F} + 7,525 \cdot 10^{-8} G^* + \varepsilon$
$\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$	$= 11,30 - 0,1196 B_M + \varepsilon$
k_5	$= -0,005172 + 0,0004231 \lambda_{\text{Rel,M}} + \varepsilon$
T_t	$= -43,12 + 1,492 \text{ GK} + \varepsilon$

Im Zuge der Berechnung von T_t stellt sich heraus, dass nur die Variable GK einen p -Wert unter 0,05 hat, weshalb dieser Wert auch gleichzeitig auf das gesamte Modell zutrifft. Diese Grenze wird aber mit 0,0440 nur knapp unterschritten. Der F -Wert liegt zwar über 1, das Bestimmtheitsmaß von 0,5185 und das korrigierte Bestimmtheitsmaß von 0,4382 zeigen jedoch, dass keine signifikante Korrelation vorhanden ist.

Interessant ist, dass man für die Werte von k_5 dieselbe Regressionsfunktion erhält, wie zuvor mit der linearen Einfachregression. Die Scherrelaxationsviskosität des Mastix korreliert also von allen untersuchten Parametern am besten mit dem Spannungsanstieg und keine andere Variable ist signifikant genug, um das Modell zu verbessern. Aufgrund des identen Modells werden an dieser Stelle keine weiteren Erörterungen mehr hinzugefügt.

Die Bruchspannung korreliert am stärksten mit dem Bitumen-Anteil auf Mastix-Ebene. In diesem Fall beträgt R^2 rund 0,79 und \bar{R}^2 beträgt rund 0,75. Auch der p -Wert und der F -Wert sprechen dafür, dass eine tatsächliche Korrelation vorliegen könnte. Eine Abhängigkeit der Spannungen vom Bitumen-Anteil wäre grundsätzlich nachvollziehbar, denn das Bindemittel ist für die Relaxation im Asphalt verantwortlich. Wenn dieser Anteil steigt, können die kryogenen Spannungen besser abgebaut werden, was wiederum die Probekörper-Spannung beim Versuchsende minimiert. Diese negative Proportionalität ist in der entsprechenden Regressionsfunktion aus Tab. 4.5 ebenfalls sichtbar. Um diesen Zusammenhang zu überprüfen, ist ein Blick auf Abb. 4.5 notwendig.

Die Linearität dieses Modells ist nicht wirklich eindeutig. Eine große Anhäufung von sieben Datenpunkten im rechten oberen Bereich der Grafik lässt auf den ersten Blick keine gute Korrelation anmuten. Diese Anhäufung entsteht dadurch, dass die Berechnung der 7 Punkte sehr ähnliche Werte liefert, die sich alle in einem Bereich um rund 5 N/mm² befinden, während die Messwerte zwischen 4,5 und 5,8 N/mm² liegen. Fern von diesen Werten liegt der Datenpunkt von A5 mit einer sehr guten Approximation. Nach weiterem Betrachten sieht es aber so aus, als könnte die lineare Abhängigkeit doch zutreffend sein, denn einige Werte werden ohne große Ungenauigkeiten vorhergesagt. Es gibt aber drei Datenpunkte, die als Ausreißer zu klassifizieren sind. Zwei Werte der Ausfallspannung werden mit der Regressionsfunktion um ca. 0,5 N/mm² überschätzt und einer wird um 0,72 N/mm² unterschätzt. Diese Differenzen sind definitiv nicht zu vernachlässigen. Zusammenfassend lässt sich hierzu sagen, dass das Bestimmtheitsmaß von 0,7885 sowie die graphische Auswertung nicht überzeugend genug sind, um von einer tatsächlichen

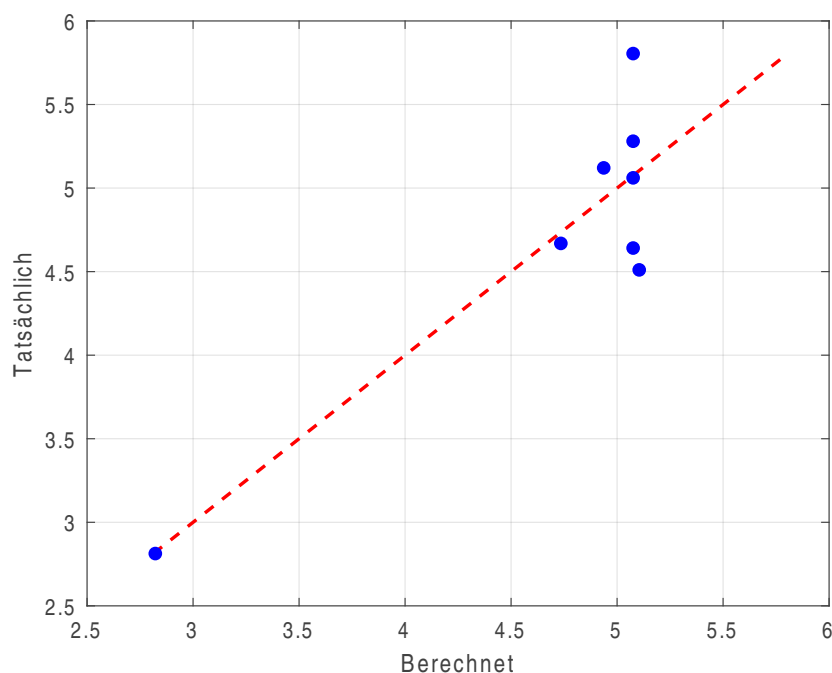


Abb. 4.5: Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von $\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ ($R^2 = 0,7885$)

Korrelation auszugehen, obwohl der Zusammenhang beider Größen mit den hypothetischen Annahmen übereinstimmen würde und damit logisch begründbar wäre. Um das Regressionsmodell eindeutig verifizieren zu können, wären mehr Daten erforderlich (was im Grunde auf alle Modelle, insbesondere aber auf dieses, zutrifft).

Zu guter Letzt wird die Regression der Ausfalltemperatur betrachtet. Hierbei liegt jedenfalls ein sehr hoher Wert für R^2 vor. Auch das angepasste Bestimmtheitsmaß von 0,9987 ist sehr hoch und weicht nur minimal vom gewöhnlichen Bestimmtheitsmaß ab. Zudem ist der p -Wert ausgesprochen niedrig und der F -Wert sehr hoch. Dies impliziert, dass die zufällige Entstehung dieser Korrelation höchst unwahrscheinlich ist. Abbildung 4.6 zeigt die mit dem Modell berechneten Werte im Gegensatz zu den gemessenen Werten der Ausfalltemperatur.

Die Werte aller Probekörper stimmen sehr gut mit den berechneten überein. Die größte Differenz besitzt das Mischgut A9 mit einem Unterschied von ca. 0,12 °C. Das Regressionsmodell scheint also im vorliegenden Fall sehr zuverlässig zu funktionieren. Allerdings muss man hierbei im Hinterkopf behalten, dass drei verschiedene Variablen zur Berechnung herangezogen werden, während die Stichprobengröße mit $n = 8$ relativ niedrig ist. Die hervorragenden Ergebnisse dieser Berechnungen sind also kritisch zu hinterfragen. Deshalb wird zunächst überprüft, ob die Zusammenhänge der drei Parameter plausibel erklärt werden können.

Die Auswirkungen des Parameters GK wurden bereits im Zusammenhang mit den TSRST-Ergebnissen diskutiert. Ein kleineres GK führt zu einem homogeneren Aufbau des Probekörpers, wodurch sich die Spannungsspitzen reduzieren. Infolgedessen tritt das Versagen im Abkühlversuch erst bei etwas niedrigerer Temperatur auf. Man betrachte nun die Formel zur Berechnung von T_{Ausfall} in Tab. 4.5. Eine Änderung des GK von 11 mm auf 8 mm würde gemäß dieser Formel einen Temperaturunterschied von etwa 1,7 °C bewirken. Ungefähr dieselbe Differenz kann in Abb. 4.3 ebenfalls festgestellt werden (Vergleich von A1 mit A7 bzw. A8). Demnach besteht die Möglichkeit eines Einflusses durch das Größtkorn.

Die Korrelation von T_{Ausfall} mit dem Bitumen : Füller-Verhältnis auf Mastix-Ebene ist ebenfalls denkbar. Ein hoher Füller-Anteil sorgt für ein steifes und sprödes Verhalten, während ein hoher

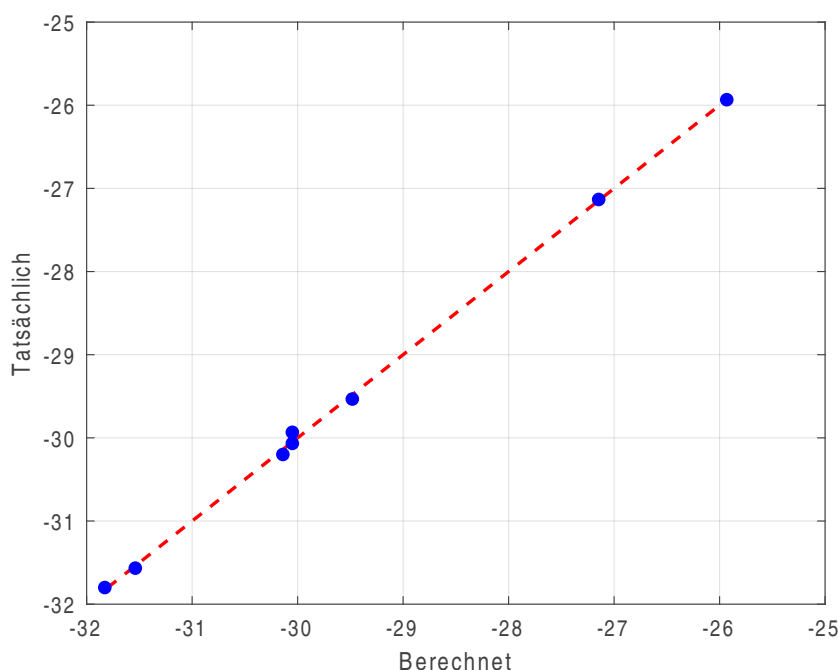


Abb. 4.6: Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von T_{Ausfall} ($R^2 = 0,9992$)

Bitumen-Anteil mehr Relaxation im Mischgut zulässt. Wenn also die Variable B:F steigt, sinkt die Bruchtemperatur. Diese Beziehung findet sich auch in der Regressionsfunktion wieder.

Zuletzt wird der Einfluss von $|G^*|$ untersucht. Wenn der komplexe Schermodul groß ist, dann liegt ein härteres Bitumen vor. Dieses verhält sich steifer gegenüber einem Bitumen mit niedrigem komplexen Schermodul. Das heißt im Umkehrschluss, dass sich ein weiches Bitumen in der Regel positiv auf das Tieftemperaturverhalten des Asphalts auswirkt. Aus diesem Grund werden härtere Bindemittel tendenziell für warme Regionen eingesetzt, wohingegen weichere Bitumen eher in kühleren Regionen verbaut werden. Ein niedriger Wert für $|G^*|$ hat somit ähnliche Auswirkungen wie ein hohes Verhältnis von Bitumen:Füller. Folglich ist die lineare Abhängigkeit der Ausfalltemperatur vom komplexen Schermodul sehr wahrscheinlich.

Auf dieser Grundlage ist der Einfluss aller drei Kovariablen glaubhaft. Auch die Tatsache, dass jeweils ein Parameter der Kategorien Asphalt, Mastix und Bitumen enthalten ist, deutet auf eine gute Korrelation hin. Da die Anzahl der Variablen für die vorhandene Stichprobengröße aber trotzdem nicht ideal ist, wird eine weitere Analyse der Ergebnisse von T_{Ausfall} durchgeführt. Keine Variable ist von vornherein auszuschließen, deshalb wird manuell jeweils eine Variable aus dem Modell entfernt. Danach folgt eine erneute Berechnung dieser drei Kombinationen mit der Funktion `fitlm`. Die Ergebnisse davon sind in der Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Das Entfernen von $|G^*|$ bewirkt eine drastische Reduzierung des Bestimmtheitsmaßes, denn dieses beträgt nur mehr rund 0,53. Vor allem aber die übrigen drei statistischen Kennwerte unterstreichen, dass die Korrelation mit den Variablen GK und B:F sehr gering ist. Ein besseres Ergebnis entsteht, wenn man stattdessen das B:F-Verhältnis aus der Regression entfernt. Damit befindet sich R^2 wieder in einem Bereich, in dem die Korrelation wahrscheinlicher ist. Der p -Wert liegt in diesem Fall unter 0,05 und der F -Wert von 8,73 deutet auf einen gewissen Erklärungsgehalt dieses Regressionsmodells hin. Die beste Korrelation erhält man allerdings, wenn das Größtkorn unberücksichtigt bleibt und nur die Parameter B:F und $|G^*|$ im Modell verbleiben. In jenem Fall betragen $R^2 = 0,8623$ und $\bar{R}^2 = 0,8072$. Die übrigen beiden Statistik-Werte bestätigen, dass diese Kombination der Kovariablen zum besten Modell der drei untersuchten Modelle führen. In

Tab. 4.6: Korrelationen zwischen der Ausfalltemperatur und ausgewählten Rezeptur- bzw. Materialparametern mittels multipler linearer Regression

Zielvariable	Kovariablen	R^2	\bar{R}^2	p -Wert	F -Wert
T_{Ausfall}	GK / B:F	0,5331	0,3464	0,1489	2,85
T_{Ausfall}	GK / $ G^* $	0,7774	0,6883	0,0234	8,73
T_{Ausfall}	B:F / $ G^* $	0,8623	0,8072	0,0070	15,65

$f(x_{i,1}, \dots, x_{i,k})$	$= \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i,1} + \beta_2 \cdot x_{i,2} + \varepsilon_i$
T_{Ausfall}	$= -35,14 + 0,8549 \text{ GK} - 3,730 \text{ B:F} + \varepsilon$
T_{Ausfall}	$= -42,46 + 0,7739 \text{ GK} + 6,295 \cdot 10^{-8} G^* + \varepsilon$
T_{Ausfall}	$= -30,56 - 6,891 \text{ B:F} + 8,599 \cdot 10^{-8} G^* + \varepsilon$

Abbildung 4.7 sind die tatsächlichen Werte und die vorhergesagten Werte dieser Regression zu sehen.

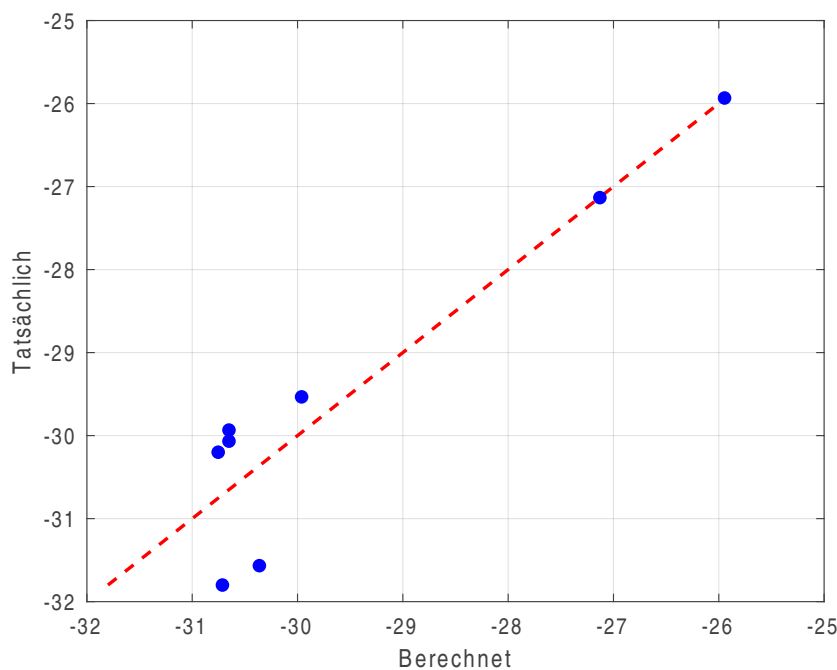


Abb. 4.7: Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von T_{Ausfall} nach Entfernen der Kovariable GK ($R^2 = 0,8623$)

Darin ist erkennbar, dass zwei Messwerte fast exakt mit den berechneten Werten übereinstimmen. Diese Werte stammen von den Mischgütern A2 und A5. Alle anderen Datenpunkte streuen jedoch etwas stärker. Jene zwei Werte, die in der Abbildung unterhalb der rot gestrichelten Linie liegen, besitzen eine Abweichung von rund 1,1 °C bzw. 1,2 °C. Die übrigen vier Werte besitzen kleinere Abweichungen, welche in einem Bereich von ungefähr 0,4 – 0,7 °C liegen. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch ein Vergleich dieser Grafik mit der vorherigen, welche die Regression mit drei Variablen enthält. Man sieht, dass die Datenpunkte der Asphalte A2 und A5 in den verschiedenen Abbildungen beinahe dieselben berechneten Werte besitzen. Die anderen sechs Datenpunkte unterscheiden sich jedoch merklich. Das Einbeziehen des Größtkorns in die Regression dient also gewissermaßen als zusätzliche Optimierung des Modells, sodass die Zielva-

riable noch genauer vorhergesagt werden kann. Insgesamt nehmen die erwähnten Differenzen aber ein akzeptables Ausmaß an, wenn man bedenkt, dass die Standardabweichung der Messergebnisse ungefähr in dieser Größenordnung liegt.

Zu dieser Regression lässt sich abschließend festhalten, dass sowohl die Statistik-Berechnungen als auch die graphische Darstellung auf eine tatsächliche Korrelation schließen lassen. Auch die theoretischen Überlegungen zu den Auswirkungen der Variablen $B:F$ und $|G^*|$ sprechen für eine signifikante Korrelation. Deshalb wird angenommen, dass die Ausfalltemperatur linear vom Bitumen: Füller-Verhältnis und vom komplexen Schermodul abhängt. Zwar ist die Abhängigkeit des Größtkorns ebenfalls gegeben, diese ist aber schwächer ausgeprägt im Vergleich zu den anderen beiden Parametern.

Zusammenfassung

Im Laufe dieser wissenschaftlichen Arbeit wurden etliche Aspekte des Tieftemperaturverhaltens von Asphalt und Mastix untersucht. Angefangen wurde mit der Suche nach Kälteprüfungen für Asphalt in der Literatur. Daraufhin erfolgten verschiedene Laborversuche, allen voran der Abkühlversuch mit prismatischen Asphalt-Probekörpern. Weitere Prüfungen wurden für relevante Bindemittel und Mastix-Mischungen durchgeführt. Zu guter Letzt wurde überprüft, ob die gewonnenen Daten linear miteinander korrelieren. Im Laufe dieser Tätigkeiten wurden die anfangs gestellten Forschungsfragen beantwortet. Es folgt nun ein Resümee der gewonnenen Erkenntnisse.

Wie wirken sich unterschiedliche Rezeptur-Parameter auf das Kälteverhalten von Asphaltmischgut aus? Inwiefern wird die Relaxation der entsprechenden Mastix-Mischung beeinflusst?

Der maßgebende Wert in Bezug auf das Kälteverhalten von Asphalt ist die Bruchtemperatur. Um die erste Frage zu beantworten, ist es deshalb sehr hilfreich, sich nur die Differenzen aller gemessenen Bruchtemperaturen zum Referenz-Wert anzusehen. Diese werden durch das Balkendiagramm in Abbildung 5.1 repräsentiert.

Das erste Mischgut besitzt eine Ausfalltemperatur von $-30,1\text{ °C}$. Man erkennt eine deutliche Verschlechterung der Ergebnisse, wenn man das härtere PmB 25/55-65 verwendet. Dies ist auf die fehlende Relaxationsfähigkeit zurückzuführen, was auch durch die Bitumen-Versuche deutlich wurde. Es hat sich nämlich gezeigt, dass dieses Bindemittel ein steiferes und elastischeres Verhalten besitzt als die übrigen getesteten Bindemittel. Unter Verwendung des PmB 45/80-65 konnte keine wesentliche Veränderung festgestellt werden. Diese Ähnlichkeit deckt sich ebenso mit den Ergebnissen der Bitumen-Prüfungen, denn dieses Bitumen besitzt ähnliche Materialparameter wie das Ausgangs-Bitumen. Das Entfernen des Kalkhydrats macht sich mittels einer geringen Erhöhung der Ausfalltemperatur bemerkbar. In diesem Fall wurde lediglich eine wesentliche Veränderung der Ausfallspannung verzeichnet. Des Weiteren stellte sich heraus, dass eine Senkung des Füllergehalts in diesem hohen Ausmaß negative Auswirkungen auf das Tieftemperaturverhalten hat. Damit steigt zwar das Relaxationsvermögen, gleichzeitig verliert der Probekörper aber an Zugfestigkeit, um die Spannungen aufnehmen zu können. Eine drastische Erhöhung des Füllergehalts führt wiederum zu einem besseren Ergebnis, wobei erwähnt werden muss, dass sich verhältnismäßig viel Fremdfüller in diesem Mischgut befindet, was ebenso der Auslöser für die Verbesserung sein könnte. Weitere Untersuchungen wären in diesem Fall nötig, um diesen Effekt genauer verorten zu können. Der Parameter Größtkorn hat einen sichtlich großen Einfluss auf das Kälteverhalten. Beide Proben mit GK 8 weisen eine niedrigere Bruchtemperatur auf als die Referenz mit GK 11. Hierzu stellt sich die weiterführende Frage, ob dieser Effekt auch auf größere Probekörper bzw. auf eine eingebaute Asphaltschicht zutrifft, wenn also eine größere

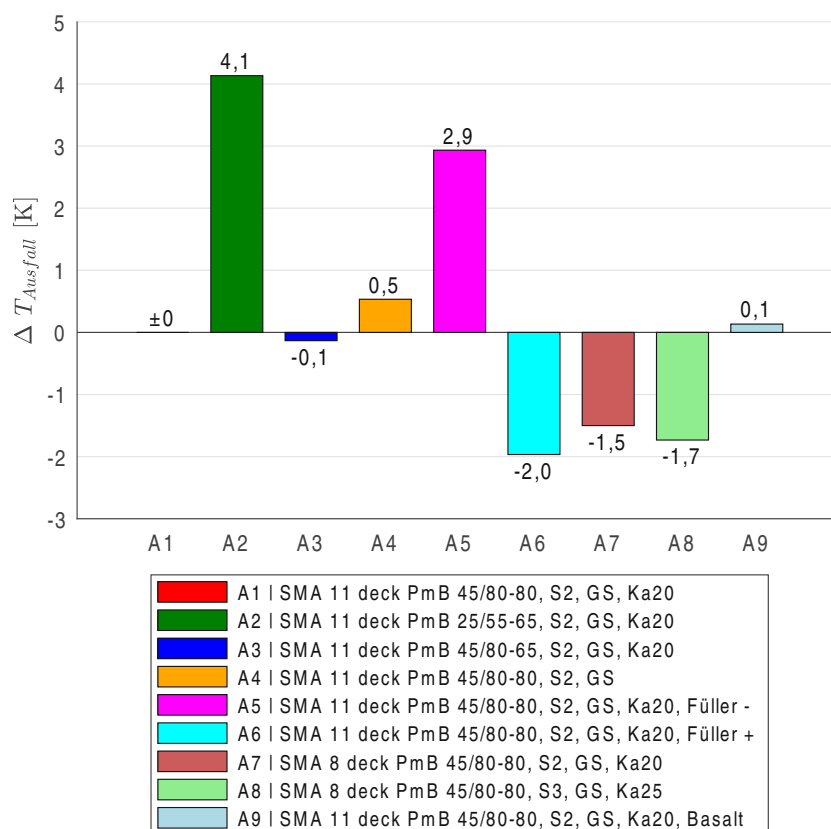


Abb. 5.1: Differenzen der Ausfalltemperatur bezogen auf das Referenz-Mischgut

Fläche betroffen ist. Die Füller-Kategorie Ka_{25} verbessert das Tieftemperaturverhalten minimal im Gegensatz zur Kategorie Ka_{20} . Eine weitere Erkenntnis ist, dass das Basaltgestein aus dem Basaltwerk Pauliberg keinen merklich großen Einfluss auf die Ausfalltemperatur hat, denn diese weicht nur unwesentlich vom Referenz-Wert ab.

Neben den klassischen Parametern des Abkühlversuchs wurden auch die Charakteristika der Spannungsverläufe untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass das Mischgut mit dem harten Bitumen sowie die Variante „Füller +“ die Spannungen zu Beginn des Versuchs am schwächsten relaxieren können. Der Spannungsanstieg ist also in diesem Bereich am größten. Im Falle von A2 deckt sich dieses Ergebnis mit dem Relaxationswert von M2, denn dieser ist von allen am höchsten. Die Mischung M6 kann nicht für solch einen Vergleich herangezogen werden, da damit keine Messungen möglich waren. Das Mischgut „Füller -“ zeigt hingegen einen sehr niedrigen Spannungsanstieg am Anfang des TSRST. Dies ist ein Resultat der hohen Relaxationsfähigkeit im Material. Am Ende des Versuchs weisen zwei Mischgüter einen annähernd linearen Spannungsverlauf auf, nämlich A1 und A6. Auch das Mischgut A3 besitzt einen Bereich mit linearem Verlauf, dieser ist allerdings kürzer. Das lineare Materialverhalten aller anderen Proben ist schwächer ausgeprägt, denn diese zeigen kurz vor dem Bruch einen deutlichen Spannungsabfall.

Nun wird näher eingegangen auf die Auswirkungen der Rezeptur-Parameter auf die Relaxation des Mastix. Um einen guten Überblick zu schaffen, werden wieder die Differenzen der Versuchsergebnisse mithilfe eines Balkendiagramms dargestellt. Diese sind in Abbildung 5.2 zusammengefasst.

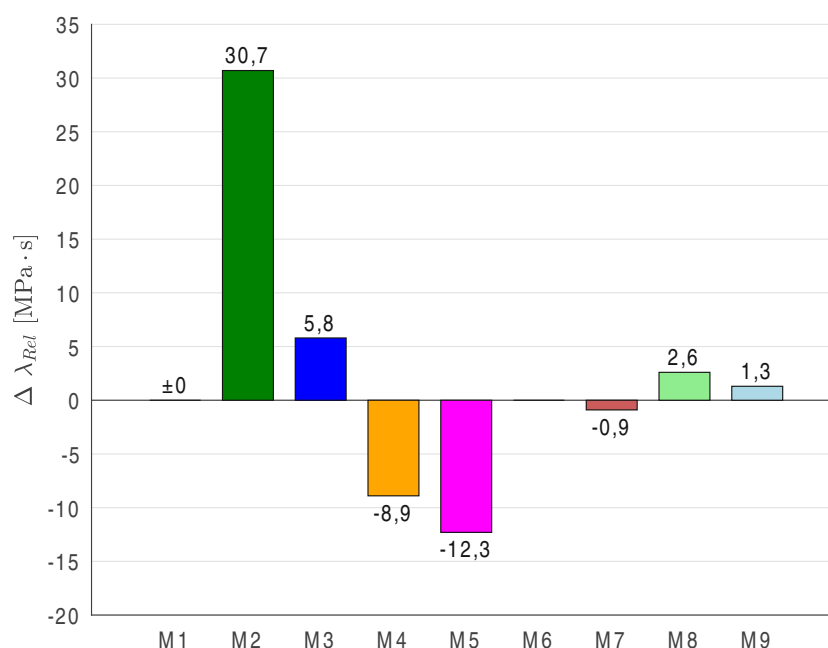


Abb. 5.2: Differenzen der Scherrelaxationsviskosität bezogen auf den Referenz-Mastix

Die Referenz-Mischung erzielte eine Scherrelaxationsviskosität von rund 27,9 MPa·s. Es stellte sich heraus, dass das steifere Bitumen der Klasse PmB 25/55-65 zu einer deutlich geringeren Relaxation führt, während das PmB 45/80-65 nur für eine leicht geringere Relaxation sorgt. Außerdem wurde herausgefunden, dass die Scherrelaxationsviskosität ungefähr auf das Dreifache ansteigt, sobald Füller im Verhältnis von B : F = 0,92 hinzugefügt wird. Wenn kein Kalkhydrat als Fremdfüller verwendet wird, wirkt sich das positiv auf die Relaxationseigenschaften von Mastix aus. Mit der Erhöhung des Bitumen : Füller-Verhältnisses konnte eine noch stärkere positive Wirkung hinsichtlich der Relaxation verzeichnet werden. Bei starker Verringerung dieses Verhältnisses war es nicht möglich, ein geeignetes Material herzustellen, wodurch dazu keine weiteren Ergebnisse vorliegen. Der Parameter Größtkorn hat naturgemäß keinen wesentlichen Einfluss auf die Relaxation, da nur der Feinanteil des Gesteins im Mastix enthalten ist. Der Austausch von Kersantit- gegen Basalt-Gestein ruft ebenso keine ausschlaggebende Veränderung in der Scherrelaxationsviskosität hervor.

Hängt das Tieftemperaturverhalten von Asphalt linear mit dem Tieftemperaturverhalten von Mastix zusammen?

Es wurden fünf verschiedene Kombinationen der einfach linearen Regression untersucht. Dabei wurden die Ergebnisse des Abkühlversuchs nur mit den Relaxationswerten modelliert. Vier Kombinationen davon weisen keine markanten Anzeichen einer guten Korrelation auf. Eine wurde jedoch genauer analysiert, da diverse Indikatoren auf eine Korrelation hindeuten. Dabei wird der Spannungsanstieg zu Beginn des Abkühlversuchs (k_5) durch die Scherrelaxationsviskosität der Mastix-Mischung ausgedrückt. Die Ergebnisse der Analyse legen eine lineare Abhängigkeit zwischen diesen beiden Größen sehr nahe. Die wesentliche Aussage ist aber, dass der entscheidende Faktor des Tieftemperaturverhaltens von Asphalt – die Bruchtemperatur – nicht mit dem Tieftemperaturverhalten von Mastix korreliert.

Hängt das Tieftemperaturverhalten von Asphalt (multipel) linear mit dessen Rezeptur- bzw. Materialparametern zusammen?

Durch das Hinzufügen von mehreren verschiedenen Variablen zum Modell konnten weitere Korrelationen gefunden werden. Berücksichtigt wurden dieses Mal auch die Ergebnisse der durchgeführten Bitumen-Versuche sowie Rezeptur-Parameter auf allen Ebenen. Für die Zielgrößen T_t und L_{Lin} wurde weiterhin keine signifikante Korrelation festgestellt. Die multiple lineare Regressionsanalyse von k_5 führt zu den selben Ergebnissen wie die einfach lineare Analyse, nämlich, dass eine einfach lineare Abhängigkeit von der Scherrelaxationsviskosität besteht. Die Ausfallspannung wurde mit dem Bindemittel-Anteil auf Mastix-Ebene berechnet. In diesem Fall ist die Güte der Korrelation nicht eindeutig, da die mathematischen Kennzahlen und die graphische Analyse keine ausreichende Signifikanz belegen. Hierzu wäre weitere Forschung notwendig, um die tatsächliche Abhängigkeit beweisen oder widerlegen zu können. Ein besonders hohes Bestimmtheitsmaß entsteht bei der Regression der Ausfalltemperatur, wenn folgende drei Kovariablen herangezogen werden: das Größtkorn, das Bitumen:Füller-Verhältnis und der komplexe Schermodul. Diese Kombination kann die vorliegenden Versuchsergebnisse sehr genau vorhersagen. Allerdings ist die hohe Korrelation kritisch zu betrachten, denn es sind nur acht Stichproben zur Auswertung vorhanden. Infolgedessen wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, bei denen nur zwei unabhängige Variablen inbegriffen sind. Dabei stellte sich heraus, dass von den drei erwähnten Variablen das Größtkorn den schwächsten Einfluss auf die Ausfalltemperatur hat, während der komplexe Schermodul den stärksten Einfluss besitzt. Das beste Ergebnis resultiert aus der Kombination der Parameter $B:F$ und $|G^*|$. Sowohl die empirischen Daten (Statistik und Grafik) als auch die theoretischen Ansätze implizieren, dass die Bruchtemperatur linear von je einem Rezeptur- und Materialparameter abhängt.

Literatur

- [1] C. Andres. *Das Baustellenhandbuch für den Straßen- und Wegebau*. 2., aktualisierte Aufl. Mering: Forum Verl., 2015. ISBN: 9783865866394.
- [2] S. Büchler. „Rheologisches Modell zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Asphalten“. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [3] C. Czado und T. Schmidt. *Mathematische Statistik*. Statistik und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN: 9783642172618.
- [4] L. Fahrmeir, C. Heumann, R. Künstler, I. Pigeot und G. Tutz. *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. 8. Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016. ISBN: 9783662503720.
- [5] L. Fahrmeir, T. Kneib und S. Lang. *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen*. Statistik und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 9783642018374.
- [6] C. Karcher, D. Jansen, K. Krass und E. Straube. *Straßenbau und Straßenerhaltung: Ein Handbuch für Studium und Praxis*. 11., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2024. ISBN: 9783503239191.
- [7] S. Komaragiri, A. Filonzi, A. Masad, D. Hazlett, E. Mahmoud und A. Bhasin. „Using the dynamic shear rheometer for low-temperature grading of asphalt binders“. In: *Journal of Testing and Evaluation* 50.3 (2022), S. 1622–1633. DOI: 10.1520/JTE20210277.
- [8] D. Maschauer, J. Mirwald und B. Hofko. „Viennese Ageing Procedure (VAPro): adaptations and further development to address low-temperature performance of aged asphalt mixtures“. In: *Road Materials and Pavement Design* 23.sup1 (2022), S. 147–161. DOI: 10.1080/14680629.2022.2029547.
- [9] H. Mentlein und H. Lorenzl. *Straßenbau, Straßenbautechnik*. 8., aktualisierte Auflage. WIT Werner-Ingenieur-Texte. Köln: Reguvis, 2021. ISBN: 9783846210512.
- [10] *ÖNORM B 3580-1:2024 04 15: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Asphaltbeton – Teil 1: Empirische Anforderungen*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Apr. 2024.
- [11] *ÖNORM B 3580-2:2024 04 15: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Asphaltbeton – Teil 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Apr. 2024.
- [12] *ÖNORM EN 12607-1:2014 12 15: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Dez. 2014.
- [13] *ÖNORM EN 12697-33:2023 01 15: Asphalt – Prüfverfahren – Teil 33: Probestückvorbereitung mittels Walzverdichtungsgerät*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Jan. 2023.

- [14] ÖNORM EN 12697-35:2025 05 01: *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 35: Labormischen*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Mai 2025.
- [15] ÖNORM EN 12697-46:2020 05 01: *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Mai 2020.
- [16] ÖNORM EN 12697-5:2019 02 01: *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 5: Bestimmung der Rohdichte*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Feb. 2019.
- [17] ÖNORM EN 12697-6:2024 03 15: *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, März 2024.
- [18] ÖNORM EN 13043:2014 02 15: *Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Feb. 2014.
- [19] ÖNORM EN 1426:2015 09 15: *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Sep. 2015.
- [20] ÖNORM EN 1427:2015 09 15: *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Sep. 2015.
- [21] ÖNORM EN 14770:2023 11 01: *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR)*. Deutsch. Wien: Austrian Standards, Nov. 2023.
- [22] M. Radenberg und M. Staschkiewicz. *Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft S 144. Bergisch Gladbach: Schünemann Verlag, 2020. ISBN: 9783956065392.
- [23] M. Spiegl. „Tieftemperaturverhalten von bituminösen Baustoffen: Labortechnische Ansprache und numerische Simulation des Gebrauchsverhaltens“. Dissertation. Wien: Technische Universität Wien, 2008.
- [24] The MathWorks Inc. *fitlm - Fit linear regression model*. 2025. URL: <https://de.mathworks.com/help/stats/fitlm.html> (Zugriff am 02.08.2025).
- [25] The MathWorks Inc. *stepwiselm - Perform stepwise regression*. 2025. URL: <https://de.mathworks.com/help/stats/stepwiselm.html> (Zugriff am 02.08.2025).
- [26] R. L. Wasserstein und N. A. Lazar. „The ASA Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose“. In: *The American Statistician* 70.2 (2016), S. 129–133. DOI: 10.1080/00031305.2016.1154108.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vergleich zweier Mastix-Mischungen	14
(a)	M1 (gewöhnlich)	14
(b)	M6 (verklummt)	14
3.1	Einspannen und Kleben des Probekörpers	18
3.2	Probekörper mit Blindprobe in der Prüfmaschine	19
3.3	Gerissene Probekörper nach abgeschlossenem Versuch	20
3.4	Beispiel einer Durchschnitts-Funktion	21
3.5	Beispiel der Auswertung nach Methode 2	22
4.1	Ergebnisse der Mastix-Relaxationsversuche	29
4.2	Spannungsverläufe aller Asphaltmischgüter	31
4.3	Balkendiagramm der Ausfalltemperatur und Ausfallspannung aller Mischgüter	32
4.4	Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von k_5 ($R^2 = 0,7929$)	35
4.5	Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von $\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ ($R^2 = 0,7885$)	38
4.6	Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von T_{Ausfall} ($R^2 = 0,9992$)	39
4.7	Vergleich der berechneten und tatsächlichen Werte von T_{Ausfall} nach Entfernen der Kovariable GK ($R^2 = 0,8623$)	40
5.1	Differenzen der Ausfalltemperatur bezogen auf das Referenz-Mischgut	43
5.2	Differenzen der Scherrelaxationsviskosität bezogen auf den Referenz-Mastix	44
A.1	Sieblinie des Mischguts A1	51
A.2	Sieblinie des Mischguts A2	51
A.3	Sieblinie des Mischguts A3	52
A.4	Sieblinie des Mischguts A4	52
A.5	Sieblinie des Mischguts A5	53
A.6	Sieblinie des Mischguts A6	53
A.7	Sieblinie des Mischguts A7	54
A.8	Sieblinie des Mischguts A8	54
A.9	Sieblinie des Mischguts A9	55
B.1	Approximierter Spannungsverlauf der Bitumen-Relaxationsversuche	63
B.2	Approximierter Spannungsverlauf der Mastix-Relaxationsversuche	64

Tabellenverzeichnis

2.1	Verwendete Bitumen und daran durchgeführte Versuche	12
2.2	Rezeptur der verwendeten Mastix-Mischungen und daran durchgeführte Versuche	13
2.3	Verwendete Asphaltmischgüter und daran durchgeführte Versuche	14
2.4	Nomenklatur der verwendeten Asphaltmischgüter	15
2.5	Kennwerte der verwendeten Asphaltmischgüter	16
3.1	Übersicht aller geprüften Temperaturen und Frequenzen im DSR-Versuch	22
4.1	Ergebnisse der Bitumen-Versuche	28
4.2	Ergebnisse der TSRST-Auswertung nach Methode 2	33
4.3	Korrelationen zwischen Mastix- und Mischgut-Ergebnissen mittels linearer Einfachregression	35
4.4	Übersicht aller untersuchten Variablen in der multiplen linearen Regression	36
4.5	Korrelationen zwischen den Mischgut-Ergebnissen und den Rezeptur- bzw. Materialparametern mittels multipler linearer Regression	37
4.6	Korrelationen zwischen der Ausfalltemperatur und ausgewählten Rezeptur- bzw. Materialparametern mittels multipler linearer Regression	40
A.1	Übersicht der Korngrößenverteilungen aller verwendeten Asphaltmischgüter	50
B.1	Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche	56
C.1	Werte der Matrix <code>TSRST_Ergebnisse</code>	65
C.2	Werte der Matrix <code>Relax_Ergebnisse</code>	65
C.3	Werte der Matrix <code>Asphalt_Parameter</code>	66
C.4	Werte der Matrix <code>Mastix_Parameter</code>	66
C.5	Werte der Matrix <code>Bitumen_Parameter</code>	66
C.6	Werte der Matrix <code>Fueller_Parameter</code>	67

Anhang A

Korngrößenverteilung des Mischguts

Tab. A.1: Übersicht der Korngrößenverteilungen aller verwendeten Asphaltmischgüter

Korngröße [mm]	A1 [M-%]	A2 [M-%]	A3 [M-%]	A4 [M-%]	A5 [M-%]	A6 [M-%]	A7 [M-%]	A8 [M-%]	A9 [M-%]
0,063	5,99	5,99	5,99	5,34	2,67	12,26	6,22	6,26	6,93
0,125	8,30	8,30	8,30	8,29	4,36	15,73	8,81	8,59	9,78
0,25	11,18	11,18	11,18	11,18	7,26	18,59	12,18	11,43	10,84
0,5	13,72	13,72	13,72	13,71	9,81	21,11	15,12	13,89	11,92
1	17,08	17,08	17,08	17,07	13,21	24,39	18,96	17,22	15,96
2	23,27	23,27	23,27	23,27	19,75	30,07	25,34	23,44	24,62
4	34,17	34,17	34,17	34,17	32,42	38,17	36,68	38,04	32,62
8	60,02	60,02	60,02	60,02	59,90	60,31	95,14	95,27	61,28
11,2	97,04	97,04	97,04	97,02	97,04	97,03	100,00	100,00	96,30
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
22,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
63	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

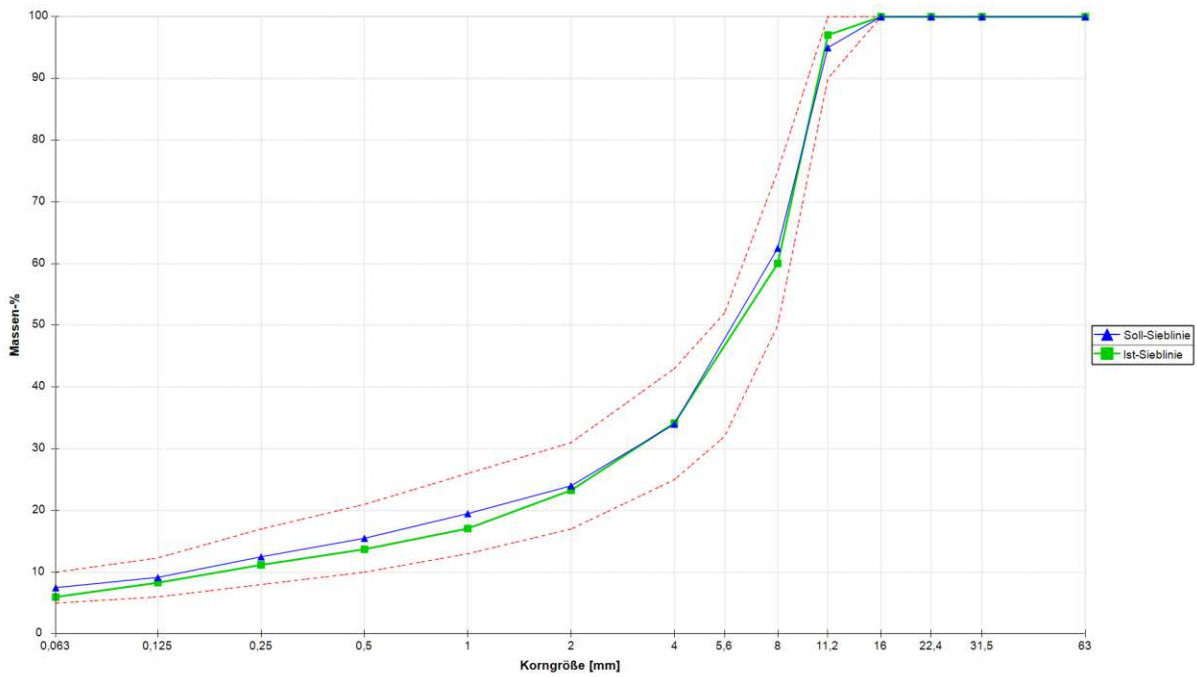


Abb. A.1: Sieblinie des Mischguts A1

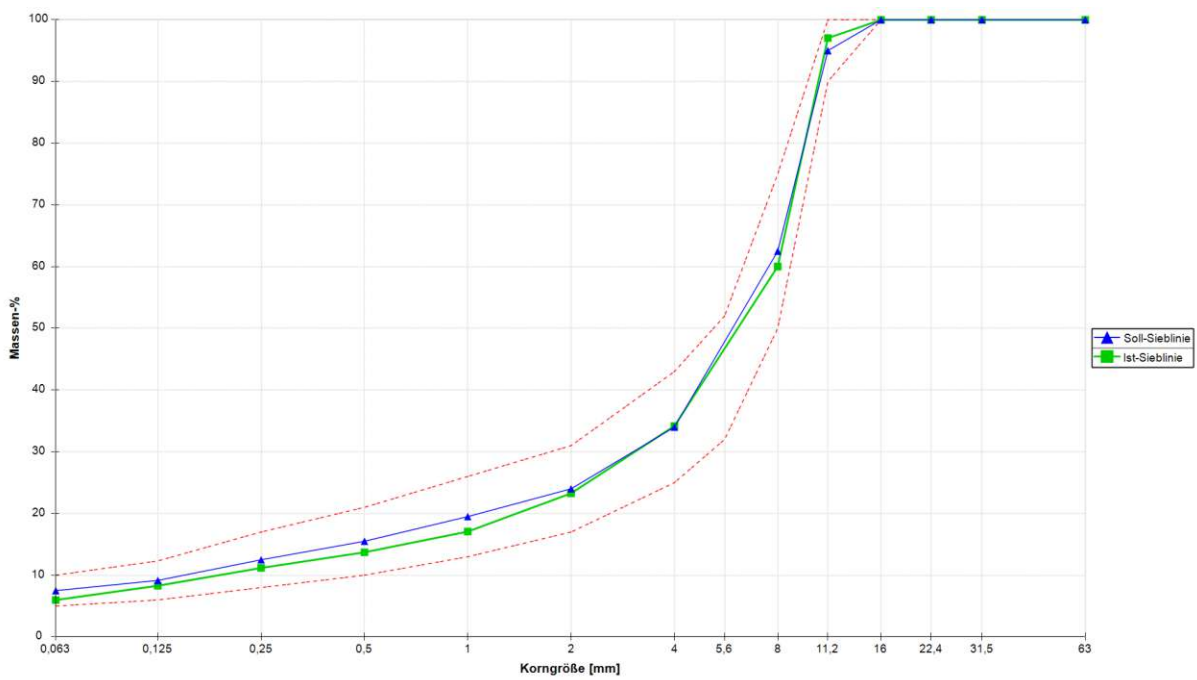


Abb. A.2: Sieblinie des Mischguts A2

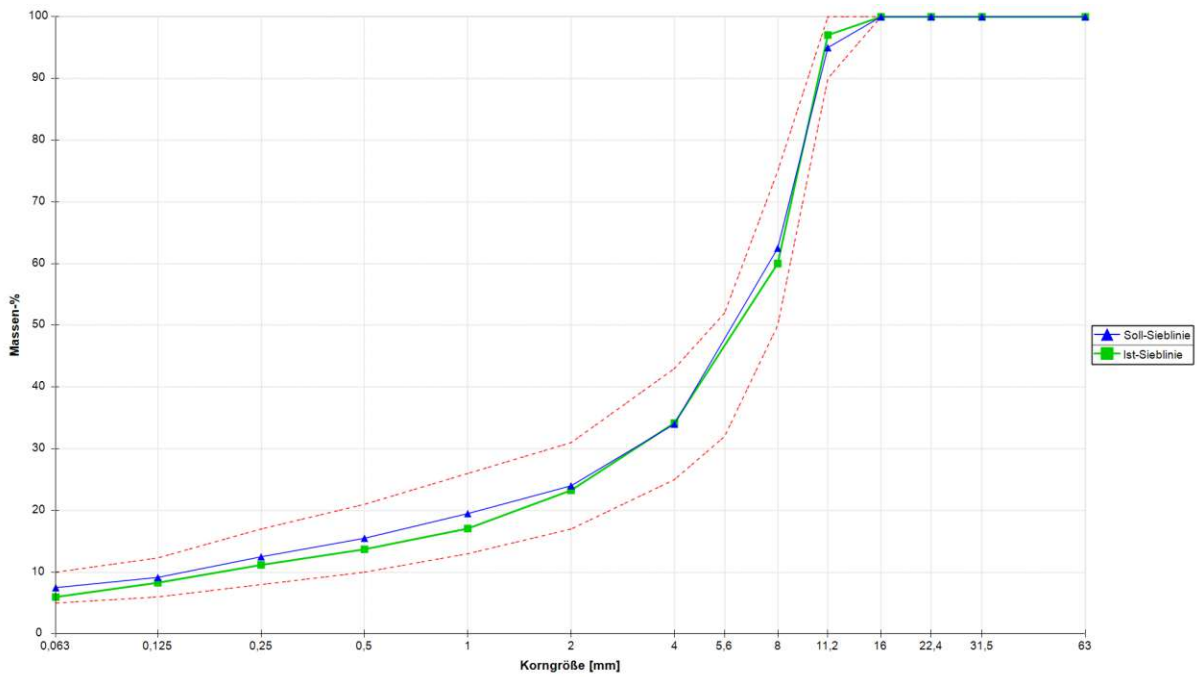


Abb. A.3: Sieblinie des Mischguts A3

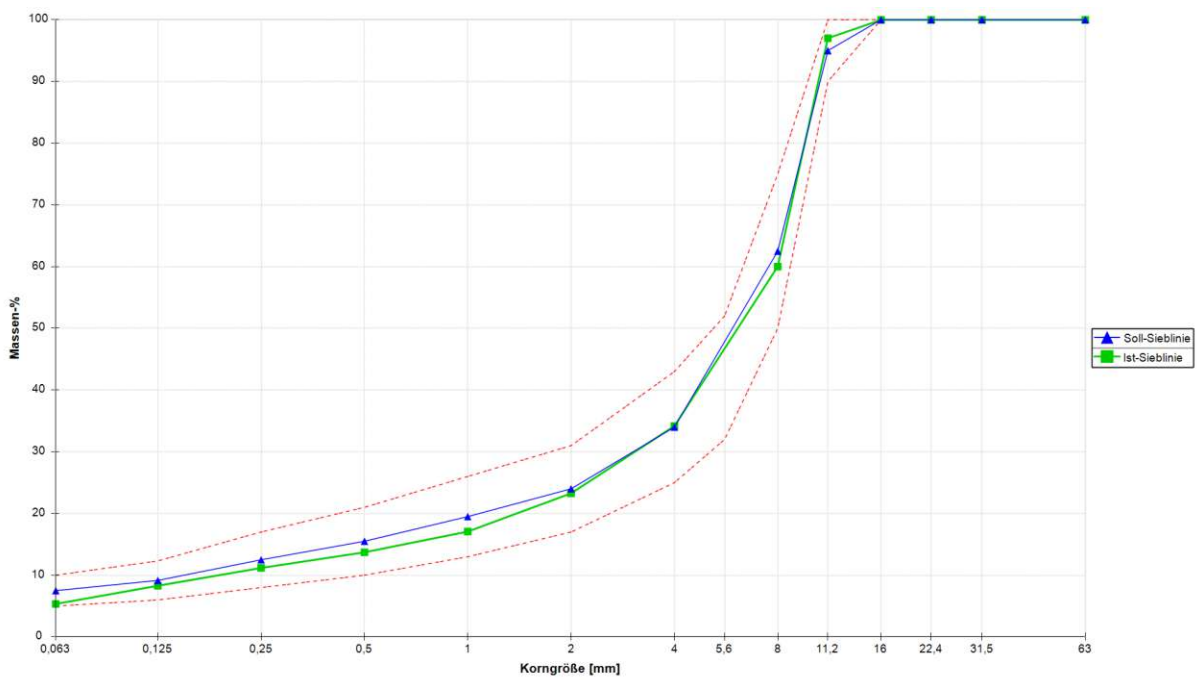


Abb. A.4: Sieblinie des Mischguts A4

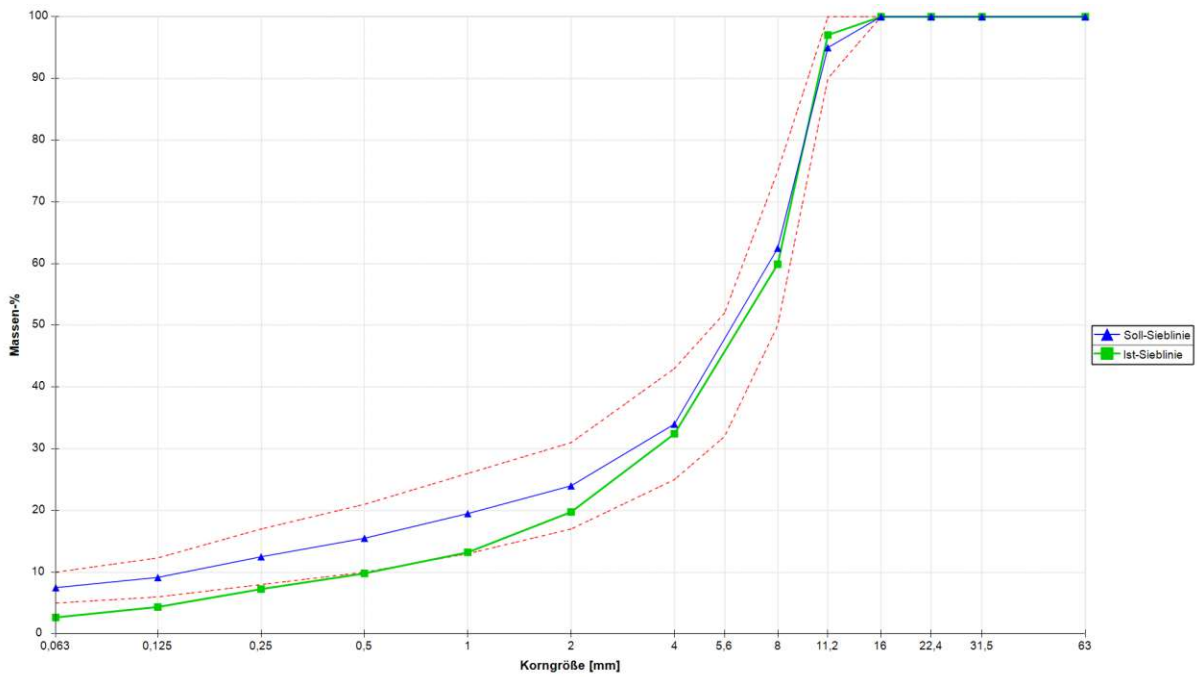


Abb. A.5: Sieblinie des Mischguts A5

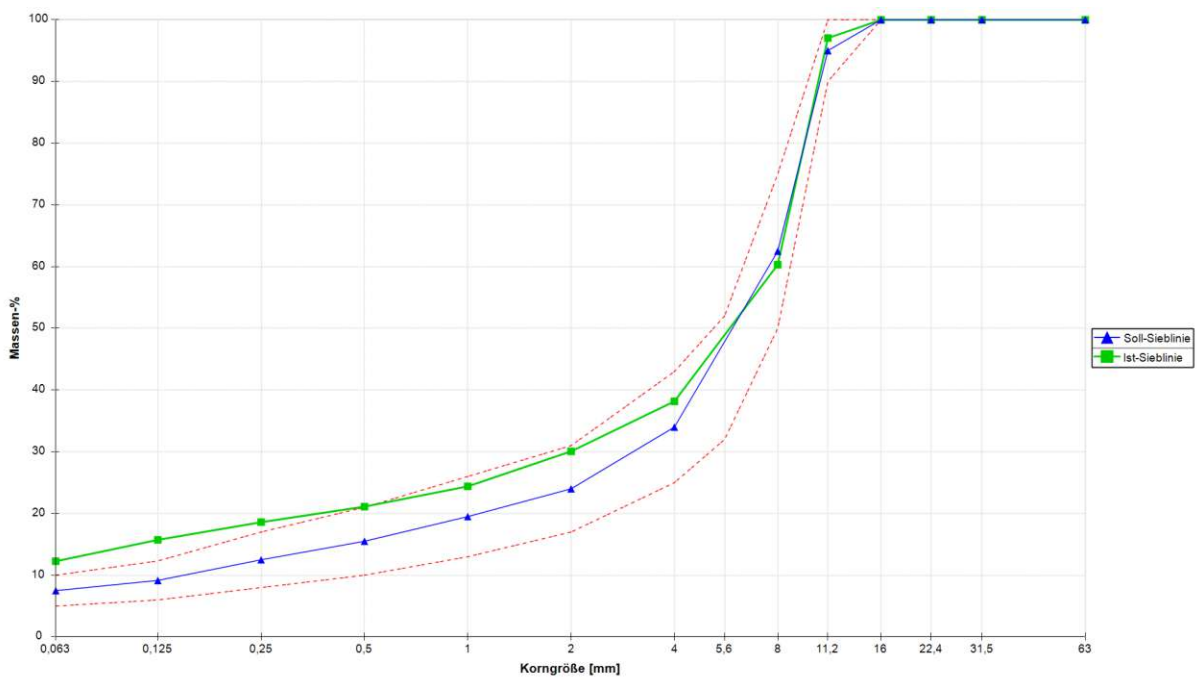


Abb. A.6: Sieblinie des Mischguts A6

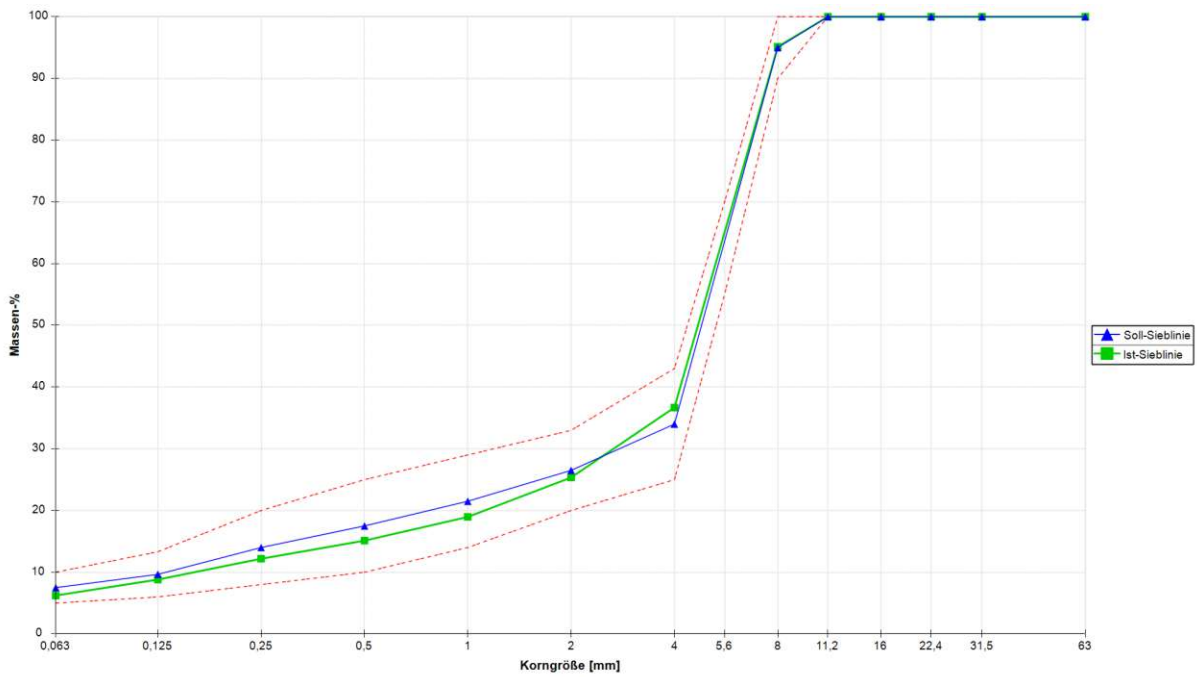


Abb. A.7: Sieblinie des Mischguts A7

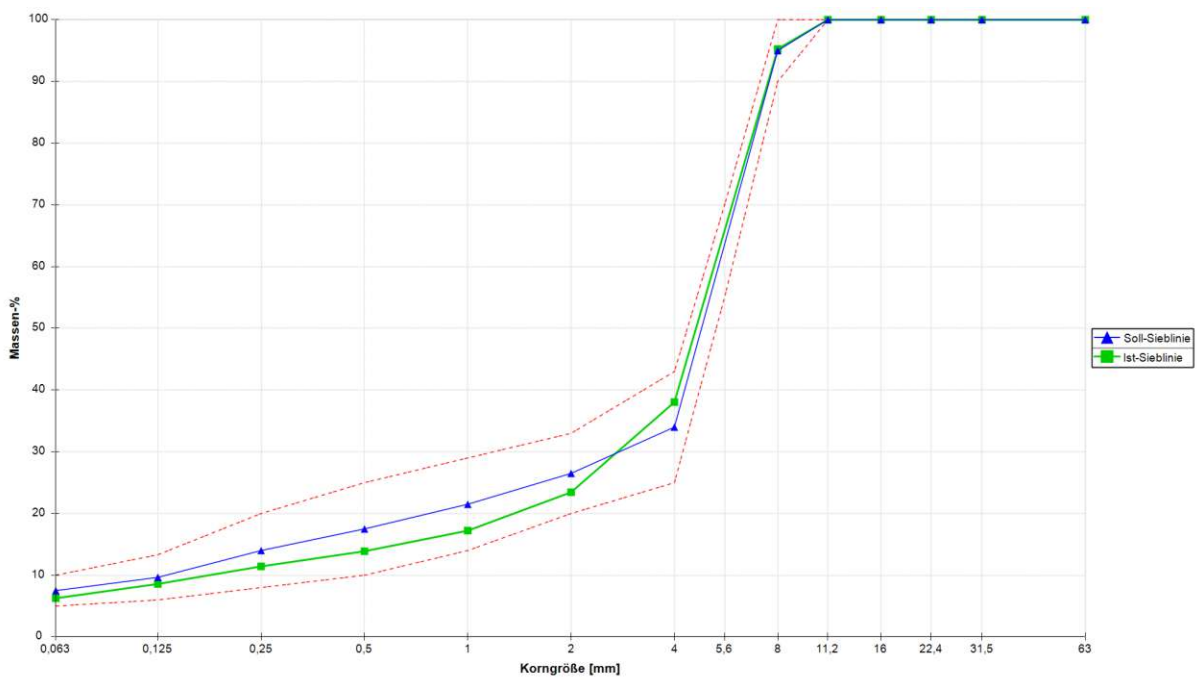


Abb. A.8: Sieblinie des Mischguts A8

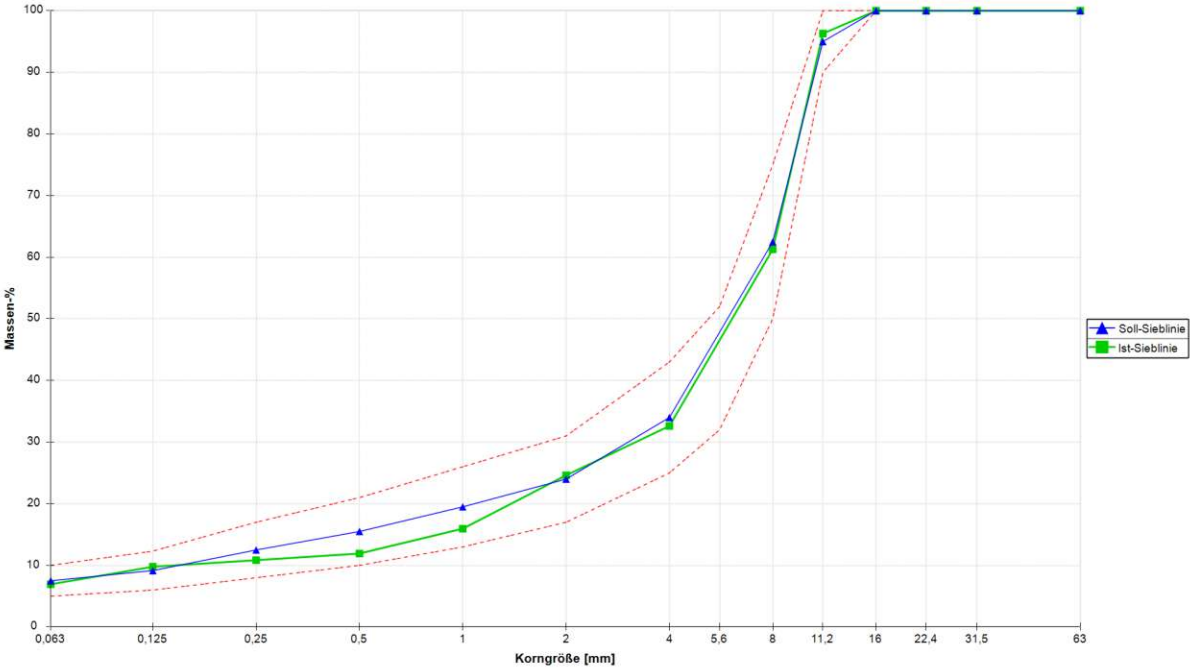


Abb. A.9: Sieblinie des Mischguts A9

Ergänzende Versuchsergebnisse

Tab. B.1: Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
B1	B1673B_LRTF_V1	0	0,03183	13528392	36,9
		0	0,1	21288470	34,0
		0	0,3	31793169	31,6
		0	1	47634292	29,2
		0	1,592	55229723	28,3
		0	3	67090436	27,1
		0	5	78023622	26,2
		0	8	89229465	25,3
		0	10	94957697	24,9
		0	20	114535981	23,8
		0	40	136760208	23,7
		-6	0,03183	32907409	31,3
		-6	0,1	48180209	28,7
		-6	0,3	67479139	26,4
		-6	1	94589181	24,2
		-6	1,592	106966059	23,4
		-6	3	125637046	22,3
		-6	5	142216259	21,4
		-6	8	158686315	20,6
		-6	10	166853051	20,2
		-6	20	193898232	19,0
		-6	40	222828585	18,5
		-12	0,03183	72993671	26,0
		-12	0,1	100246327	23,5
		-12	0,3	132074416	21,5
		-12	1	173605540	19,4
		-12	1,592	191623290	18,6
		-12	3	217621832	17,6
		-12	5	239815877	16,7

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche (Fortsetzung)

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
		-12	8	261105724	16,0
		-12	10	271489466	15,6
		-18	0,03183	145812403	21,0
		-18	0,1	188742620	18,8
		-18	0,3	234398515	16,8
		-18	1	289357656	14,9
		-18	1,592	311929624	14,1
		-18	3	343262542	13,2
		-18	5	369055750	12,4
		-18	8	392996983	11,8
		-18	10	404499123	11,4
		-24,77	0,03183	239794000	17,1
		-24,65	0,1	302396911	14,6
		-24,45	0,3	356673040	12,9
		-24,37	1	417882871	11,2
		-24,27	1,592	441542540	10,6
		-24,24	3	473941076	9,8
		-24,21	5	499813470	9,2
		-24,19	8	523309091	8,6
		-24,18	10	534347909	8,3
B1	B1673B_LRTF_V2	0	0,03183	13999184	36,3
		0	0,1	21860753	33,4
		0	0,3	32379736	31,0
		0	1	48176610	28,6
		0	1,592	55698216	27,8
		0	3	67419496	26,6
		0	5	78207889	25,7
		0	8	89270019	24,9
		0	10	94944163	24,5
		0	20	114413760	23,3
		0	40	136899248	23,0
		-6	0,03183	33235498	30,8
		-6	0,1	48357683	28,2
		-6	0,3	67307986	26,0
		-6	1	93889847	23,8
		-6	1,592	106053946	23,0
		-6	3	124164420	21,9
		-6	5	140266186	21,0
		-6	8	156254627	20,2
		-6	10	164275979	19,8
		-6	20	190831444	18,7
		-6	40	220054412	18,1

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche (Fortsetzung)

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
		-12	0,03183	72743265	25,6
		-12	0,1	99499440	23,3
		-12	0,3	130444065	21,2
		-12	1	170802080	19,1
		-12	1,592	188213185	18,3
		-12	3	213159961	17,3
		-12	5	234642664	16,5
		-12	8	255289670	15,7
		-12	10	265303244	15,4
		-18	0,03183	144461759	20,7
		-18	0,1	185725685	18,5
		-18	0,3	229964141	16,6
		-18	1	283026160	14,6
		-18	1,592	304523937	13,9
		-18	3	334428300	13,0
		-18	5	359236407	12,3
		-18	8	382225880	11,6
		-18	10	393181416	11,3
		-23,36	0,03183	216941302	17,3
		-23,28	0,1	264445218	15,4
		-23,27	0,3	315214843	13,6
		-23,23	1	372951853	11,9
		-23,18	1,592	395339741	11,3
		-23,2	3	426312493	10,5
		-23,22	5	451621096	9,8
		-23,24	8	474702846	9,2
		-23,26	10	485657071	9,0
B2	B1531B_LRTF_V1	0	0,03183	26649642	31,5
		0	0,1	39201166	28,9
		0	0,3	54985482	26,6
		0	1	77222365	24,4
		0	1,592	87410023	23,7
		0	3	102831798	22,6
		0	5	116643638	21,8
		0	8	130455511	21,0
		0	10	137414728	20,7
		0	20	160694237	19,6
		0	40	186945195	19,3
		-6	0,03183	57154387	26,4
		-6	0,1	78809319	24,1
		-6	0,3	104514136	22,1
		-6	1	138457303	20,1

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche (Fortsetzung)

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
		-6	1,592	153366221	19,4
		-6	3	175198473	18,4
		-6	5	194047696	17,7
		-6	8	212473303	16,9
		-6	10	221551752	16,6
		-6	20	251066599	15,6
		-6	40	282553176	15,1
		-12	0,03183	112639516	21,8
		-12	0,1	146580515	19,7
		-12	0,3	184194471	17,9
		-12	1	231107935	16,1
		-12	1,592	250768365	15,4
		-12	3	278512198	14,5
		-12	5	301573250	13,7
		-12	8	323441222	13,1
		-12	10	333976952	12,8
		-18	0,03183	202617544	17,4
		-18	0,1	250212367	15,6
		-18	0,3	299476095	13,9
		-18	1	355905013	12,2
		-18	1,592	378217238	11,6
		-18	3	408878660	10,8
		-18	5	433866386	10,1
		-18	8	456605997	9,6
		-18	10	467306713	9,3
		-22,57	0,03183	270743713	15,1
		-22,71	0,1	327031246	13,2
		-22,77	0,3	380648431	11,6
		-22,78	1	440023495	10,1
		-22,76	1,592	462879353	9,6
		-22,74	3	493736414	8,9
		-22,76	5	518170886	8,3
		-22,77	8	540405881	7,8
		-22,78	10	550786684	7,6
B2	B1531B_LRTRF_V2	0	0,03183	33969312	31,6
		0	0,1	49940390	28,9
		0	0,3	70065556	26,6
		0	1	98388271	24,4
		0	1,592	111311371	23,6
		0	3	130922701	22,6
		0	5	148421786	21,7
		0	8	165861526	21,0

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche (Fortsetzung)

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
		0	10	174651758	20,6
		0	20	203641803	19,6
		0	40	234335285	18,9
		-6	0,03183	72552204	26,7
		-6	0,1	99955053	24,2
		-6	0,3	132595553	22,1
		-6	1	175591913	20,1
		-6	1,592	194362424	19,4
		-6	3	221915287	18,4
		-6	5	245814761	17,7
		-6	8	268950321	17,0
		-6	10	280323412	16,6
		-6	20	316906732	15,6
		-6	40	354521898	14,9
		-12	0,03183	142548067	21,9
		-12	0,1	185931143	19,8
		-12	0,3	233579834	17,9
		-12	1	292911827	16,0
		-12	1,592	317729291	15,4
		-12	3	352869659	14,4
		-12	5	382108971	13,7
		-12	8	409609469	13,1
		-12	10	422907528	12,8
		-18	0,03183	257328265	17,5
		-18	0,1	317405000	15,5
		-18	0,3	378994551	13,8
		-18	1	450342957	12,2
		-18	1,592	478632601	11,6
		-18	3	517576680	10,8
		-18	5	548985966	10,2
		-18	8	577965748	9,6
		-18	10	591526849	9,4
		-24	0,03183	388558988	14,1
		-24	0,1	460835088	12,2
		-24	0,3	529208487	10,8
		-24	1	604129354	9,3
		-24	1,592	632820321	8,8
		-24	3	671098439	8,1
		-24	5	701271437	7,6
		-24	8	728427969	7,1
		-24	10	740998702	6,9
B3	B1161B_LRTF_V1	0	0,03183	13989006	37,7

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche (Fortsetzung)

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
		0	0,1	22307632	35,0
		0	0,3	33701981	32,5
		0	1	51108739	29,9
		0	1,592	59495682	29,0
		0	3	72627656	27,7
		0	5	84734379	26,7
		0	8	97171874	25,8
		0	10	103542799	25,4
		0	20	125194441	24,2
		0	40	149138030	23,5
		-6	0,03183	34331599	32,4
		-6	0,1	50895041	29,5
		-6	0,3	72119906	27,2
		-6	1	102132919	24,8
		-6	1,592	115817288	23,9
		-6	3	136490707	22,7
		-6	5	154835190	21,8
		-6	8	173111341	20,9
		-6	10	182211859	20,5
		-6	20	212241076	19,2
		-6	40	243875610	18,4
		-12	0,03183	76320040	27,0
		-12	0,1	106177446	24,4
		-12	0,3	141165264	22,2
		-12	1	187109908	19,9
		-12	1,592	207025663	19,1
		-12	3	235829860	18,0
		-12	5	260368606	17,1
		-12	8	283943628	16,2
		-12	10	295468515	15,8
		-18	0,03183	154812391	21,8
		-18	0,1	201683498	19,5
		-18	0,3	252282338	17,3
		-18	1	313386443	15,2
		-18	1,592	338322105	14,5
		-18	3	372825302	13,4
		-18	5	401366792	12,6
		-18	8	427756760	11,9
		-18	10	440280013	11,6
		-24	0,03183	272183158	17,0
		-24	0,1	334096376	14,9
		-24	0,3	395564224	13,0
		-24	1	464045995	11,2

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche (Fortsetzung)

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
		-24	1,592	490605522	10,5
		-24	3	526149289	9,6
		-24	5	554202693	8,9
		-24	8	579387577	8,3
		-24	10	591119344	8,1
B3	B1161B_LR1F_V2	0	0,03183	12215562	37,6
		0	0,1	19409215	34,7
		0	0,3	29255504	32,3
		0	1	44268337	29,8
		0	1,592	51483104	28,8
		0	3	62780939	27,6
		0	5	73247705	26,6
		0	8	83997139	25,7
		0	10	89500475	25,2
		0	20	108504336	24,0
		0	40	131171094	23,7
		-6	0,03183	30033281	31,9
		-6	0,1	44386578	29,4
		-6	0,3	62623766	27,0
		-6	1	88449012	24,7
		-6	1,592	100295441	23,8
		-6	3	118095169	22,6
		-6	5	133936359	21,7
		-6	8	149656273	20,8
		-6	10	157495662	20,4
		-6	20	183686128	19,1
		-6	40	212764788	18,5
		-12	0,03183	67035203	26,7
		-12	0,1	93067178	24,2
		-12	0,3	123287235	22,0
		-12	1	163002395	19,7
		-12	1,592	180129348	18,9
		-12	3	204937743	17,8
		-12	5	226077285	16,9
		-12	8	246338381	16,0
		-12	10	256212253	15,6
		-18	0,03183	135303567	21,7
		-18	0,1	175904254	19,2
		-18	0,3	219647597	17,1
		-18	1	272105645	15,1
		-18	1,592	293437639	14,3
		-18	3	323067143	13,3

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Detaillierte Ergebnisse der DSR-Versuche (Fortsetzung)

Nr.	Laborcode	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	$ G^* $ [Pa]	δ [°]
		-18	5	347505102	12,4
		-18	8	370023764	11,7
		-18	10	380859379	11,4
		-24	0,03183	238057984	16,8
		-24	0,1	291313576	14,6
		-24	0,3	344006931	12,8
		-24	1	402837955	11,0
		-24	1,592	425208298	10,3
		-24	3	455405156	9,4
		-24	5	479418542	8,7
		-24	8	500842991	8,1
		-24	10	510861927	7,8

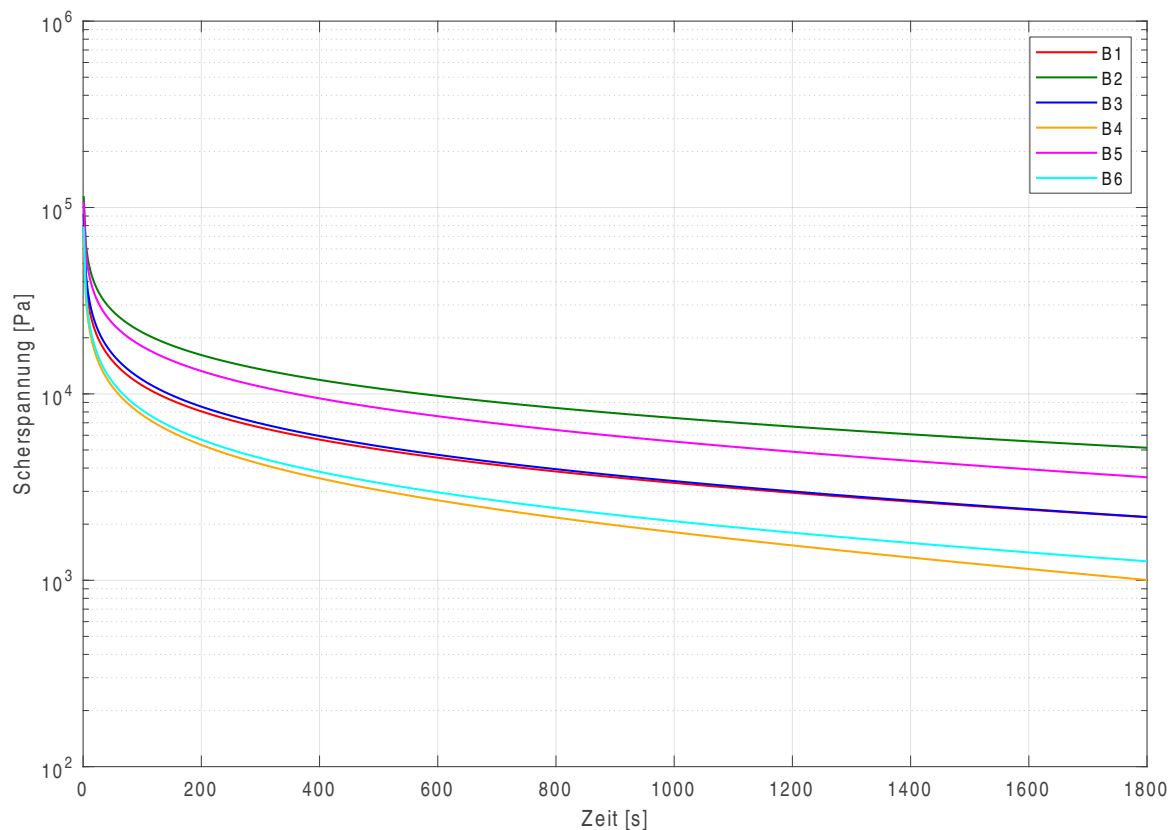


Abb. B.1: Approximierter Spannungsverlauf der Bitumen-Relaxationsversuche

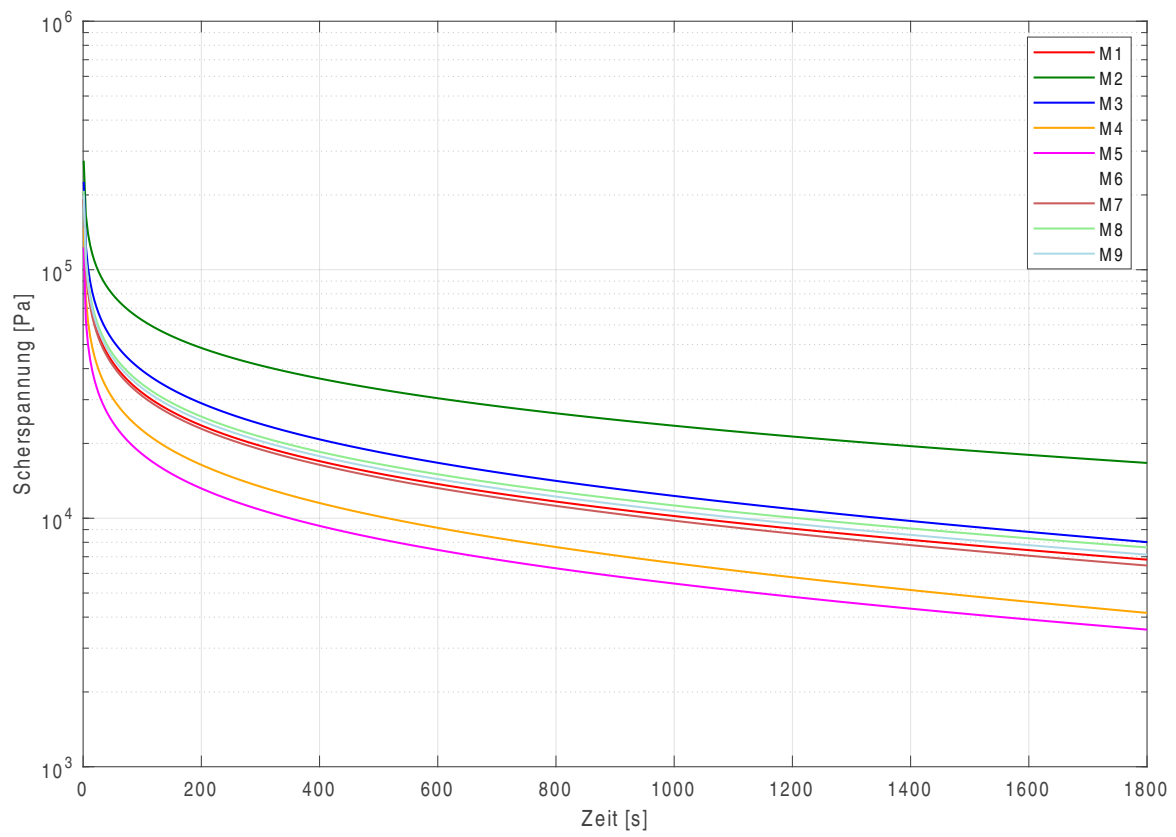


Abb. B.2: Approximierter Spannungsverlauf der Mastix-Relaxationsversuche

Anhang C

Eingabedaten für die Regressionsanalyse

Tab. C.1: Werte der Matrix TSRST_Ergebnisse

Nr.	T_{Ausfall} [°C]	$\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ [N/mm ²]	k_5 [N/mm ² /K]	T_t [°C]	L_{Lin} [-]
A1	-30,07	5,805	-0,01979	-22,70	7,747
A2	-25,93	4,641	-0,02919	-25,66	0,273
A3	-30,20	5,280	-0,01714	-27,92	2,376
A4	-29,53	4,669	-0,01230	-28,77	0,782
A5	-27,13	2,813	-0,00972	-26,33	0,809
A7	-31,57	5,121	-0,01591	-31,01	0,574
A8	-31,80	4,510	-0,01627	-31,37	0,436
A9	-29,93	5,061	-0,02322	-28,89	1,072

Tab. C.2: Werte der Matrix Relax_Ergebnisse

Nr.	$\lambda_{\text{Rel,M}}$ [MPa · s]
A1	27,94
A2	58,57
A3	33,72
A4	18,99
A5	15,57
A7	27,00
A8	30,51
A9	29,19

Tab. C.3: Werte der Matrix Asphalt_Parameter

Nr.	GK [mm]	HR _B [V-%]	HR _D [V-%]
A1	11	2,21	3,02
A2	11	2,29	3,43
A3	11	3,16	6,75
A4	11	2,85	5,86
A5	11	8,13	11,4
A7	8	2,93	6,38
A8	8	6,76	8,33
A9	11	3,59	6,37

Tab. C.4: Werte der Matrix Mastix_Parameter

Nr.	FF _M [M-%]	EF _M [M-%]	B _M [M-%]	B : F [-]	λ _{Rel,M} [MPa · s]
A1	40,94	7,034	52,03	0,9221	27,94
A2	40,94	7,034	52,03	0,9221	58,57
A3	40,94	7,034	52,03	0,9221	33,72
A4	37,66	7,453	54,88	0,8220	18,99
A5	18,82	10,30	70,87	0,4110	15,57
A7	39,02	7,792	53,19	0,8802	27,00
A8	41,58	6,631	51,79	0,9311	30,51
A9	40,94	7,034	52,03	0,9221	29,19

Tab. C.5: Werte der Matrix Bitumen_Parameter

Nr.	G* [Pa]	δ [°]	λ _{Rel,A} [MPa · s]	λ _{Rel,B} [MPa · s]	Pen [1/10 mm]	EP [°C]
A1	72868468	25,8	9,64	6,09	57	82,0
A2	127593791	21,8	19,5	15,5	37	77,4
A3	71677621	26,8	10,1	6,73	51	81,0
A4	72868468	25,8	9,64	6,09	57	82,0
A5	72868468	25,8	9,64	6,09	57	82,0
A7	72868468	25,8	9,64	6,09	57	82,0
A8	72868468	25,8	9,64	6,09	57	82,0
A9	72868468	25,8	9,64	6,09	57	82,0

Tab. C.6: Werte der Matrix Fueller_Parameter

Nr.	\mathbf{FF}_F [M-%]	\mathbf{EF}_F [M-%]	$\mathbf{FF} : \mathbf{EF}$ [-]
A1	85,34	14,66	5,82
A2	85,34	14,66	5,82
A3	85,34	14,66	5,82
A4	83,48	16,52	5,05
A5	64,62	35,38	1,83
A7	83,36	16,64	5,01
A8	86,25	13,75	6,27
A9	85,34	14,66	5,82