

ENDBERICHT
Projektnummer: 24407

IQ-Asphalt

Innovative Qualitätssicherung von Bau- stoffen für Asphaltstraßen

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF 2023)

Autoren:

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

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

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Jan Unterbuchsachner

Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Buchta

Dipl.-Ing. Daniel Steiner

Dipl.-Ing. Dr.techn. Georgi Chankov

Auftraggeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Dieser Projektbericht enthält 38 Seiten.

Im Falle einer Vervielfältigung oder Veröffentlichung des gegenständlichen Projektberichts darf dessen Inhalt nur wort- und formgetreu und ohne Auslassung oder Zusatz wiedergegeben werden. Auszugsweise Vervielfältigung oder Veröffentlichung unter Berufung auf den Projektbericht bedarf der Genehmigung des Projektteams (TU Wien, Labor Nievelt).

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung und Motivation	4
2. Methoden und Prüfverfahren.....	5
2.1. Überblick zu Arbeitspaketen (AP) und Meilensteinen	5
2.1.1. <i>AP1: Projektmanagement</i>	6
2.1.2. <i>AP2: Ermüdungsverhalten</i>	6
2.1.3. <i>AP3: Kälteverhalten.....</i>	7
2.1.4. <i>AP4: Datenanalyse.....</i>	7
2.1.5. <i>AP5: Dimensionierung.....</i>	8
2.1.6. <i>AP6: Berichtlegung.....</i>	8
2.2. Materialien und Prüfmethode Ermüdungsverhalten	8
2.2.1. <i>Materialien.....</i>	8
2.2.2. <i>Beständigkeit gegen Ermüdung - 4-Punkt-Biegebalken (4-PBB)</i>	9
2.2.3. <i>Beständigkeit gegen Ermüdung – Zyklische indirekte Zugprüfung (CIT-CY).....</i>	10
2.2.4. <i>Ermüdungsprüfung am DSR mit hyperbolischem Querschnitt (Mastixprüfung)</i>	12
2.3. Materialien und Prüfmethode Kälteverhalten	12
2.3.1. <i>Materialien.....</i>	12
2.3.2. <i>Beständigkeit gegen Kälterisse – Abkühlprüfung (TSRST)</i>	15
2.3.3. <i>Materialprüfung auf Bitumenebene – 4mm DSR</i>	16
2.3.4. <i>Materialprüfung auf Mastixebene – Scherrelaxationsprüfung.....</i>	17
3. Prüfergebnisse	17
3.1. Prüfung des Ermüdungsverhaltens.....	18
3.1.1. <i>Ergebnisse der 4PB Prüfung.....</i>	18
3.1.2. <i>Ergebnisse der CIT-CY.....</i>	18
3.1.3. <i>Ergebnisse auf der Mastixebene.....</i>	19
3.2. Prüfung des Tieftemperaturverhaltens.....	20
3.2.1. <i>Ergebnisse auf Mischgutebene – TSRST</i>	21
3.2.2. <i>Ergebnisse auf Bindemittellebene – 4mm DSR.....</i>	22

3.2.3.	<i>Ergebnisse auf Mastixebene – Scherrelaxationsversuch</i>	22
4.	Datenanalyse	24
4.1.	Methodik	24
4.1.1.	<i>Spearman Korrelation</i>	24
4.1.2.	<i>Least Absolut Shrinkage and Selection Operator (Lasso) Regression</i>	25
4.1.3.	<i>Mehrfache Lineare Regression</i>	25
4.2.	Datenanalyse Ermüdungsverhalten	26
4.2.1.	<i>Regression CIT-CY 4PBB</i>	26
4.2.2.	<i>Spearman Rangkorrelation – Ermüdung</i>	27
4.2.3.	<i>Lasso Regression – Ermüdung</i>	28
4.2.4.	<i>Erweiterung des Prognosemodells nach Steineder</i>	29
4.3.	Datenanalyse Kälteverhalten	31
4.3.1.	<i>Spearman Rangkorrelation – Kälteverhalten</i>	31
4.3.2.	<i>Lasso Regression – Kälteverhalten</i>	32
5.	Dimensionierung	33
5.1.	Einwirkung	33
5.2.	Widerstand	34
5.3.	Bemessungskonzept	35
5.4.	Überarbeitung des Bemessungskonzept Ermüdung	35
6.	Schlussfolgerung	35
6.1.	Ermüdungsverhalten	35
6.2.	Kälteverhalten	36
6.3.	Dimensionierung	37
7.	Literaturverzeichnis	38

1. Problemstellung und Motivation

Eine dauerhafte und langlebige Straßeninfrastruktur bildet das Rückgrat hochentwickelter Gesellschaften und ist die fundamentale Basis für wirtschaftliche Entwicklung sowie Mobilität. Um diese technische Qualität sicherzustellen, stützt sich der Asphaltstraßenbau in Österreich auf ein umfassendes System zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle (QS/QK) im Rahmen von Typ-, Kontroll- und Abnahmeprüfungen. Bislang wurden dabei primär rezeptorientierte (empirische) Anforderungen an das Asphaltmischgut gestellt. Durch die zunehmende Komplexität der Ausgangsstoffe, insbesondere durch stetig erhöhte Anteile an Recyclingasphalt (RA), den Einsatz vielfältiger Additive und die zukünftige Nutzung biogener Bindemittelalternativen, stößt dieser klassische Ansatz jedoch an seine Grenzen. In Kombination mit steigenden klimatischen und verkehrlichen Belastungen geht der über Jahrzehnte aufgebaute Erfahrungshintergrund zunehmend verloren. Er reicht nicht mehr aus, um die technische Leistungsfähigkeit und Lebensdauer derart innovativer und oft noch wenig praxiserprobter Baustoffe verlässlich zu bewerten.

Um diese Lücke zu schließen, gewinnt der gebrauchsverhaltensorientierte (GVO) bzw. funktionale Ansatz stark an Bedeutung. Dieser stellt sicher, dass Asphaltmischgüter bereits unter Laborbedingungen realitätsnah auf die zu erwartenden Beanspruchungen im Feld geprüft werden können.

Ziele

Für das gegenständliche Vorhaben IQ Asphalt werden folgende Ziele definiert:

- **Entwicklung und Erweiterung von Prognosemodellen:** Das bestehende Mastix-Mischgut-Modell zur Vorhersage des Ermüdungswiderstands (4PB) soll über die Deckschichten hinaus um repräsentative Binder- und Tragschichtmischgüter erweitert werden.
- **Systematische Prüfung von Mischgutvarianten:** Durchführung umfassender Materialprüfungen an mindestens sieben Varianten hinsichtlich des Ermüdungswiderstands und an mindestens acht Varianten hinsichtlich des Kälteverhaltens unter Variation von Bindemittelsystemen, Füllerarten, Füller/Bitumen-Verhältnissen und Größtkorn.
- **Berücksichtigung der Materialrückgewinnung:** Beurteilung des Einflusses der Extraktion auf die Materialeigenschaften durch den direkten Vergleich von Mastix- und Bindemittelprüfungen an frischen sowie aus dem Mischgut rückgewonnenen Materialien.
- **Methodische Verlinkung und Validierung der Prüfverfahren:** Ableitung von Korrelationen zwischen der CIT-CY, welche künftig die 4PB ablösen soll, sowie neuen Prüfmethoden am DSR, wie der 4mm-Geometrie und der Scherrelaxationsprüfung.

- **Kompensation des schwindenden Erfahrungshintergrunds:** Forcierung einer qualitätsgesicherten Materialprüfung mittels realitätsnaher, leistungsorientierter Prüfmethoden (GVO), um die zunehmende Komplexität moderner Asphaltrezepturen (hoher RA-Anteil, Additive, biogene Zusätze) sicher beurteilen zu können.
- **Datenbasierte Korrelationsanalyse:** Durchführung von (multi)-linearen und multivariaten Datenanalysen zur Herstellung fundierter Zusammenhänge zwischen der Bitumen-/Mastixebene und der Mischgutebene für das gesamte Temperaturspektrum.

Als Ergebnisse werden in Konsequenz der obigen Ziele folgende Resultate angestrebt:

- **Präsentation einer intelligenten QS-Methodik:** Etablierung eines effizienten Verfahrens zur Wahl von Mischgutvarianten, welches die technische Gleichwertigkeit unterschiedlicher Konzepte für eine hochwertige Verkehrsinfrastruktur sicherstellt.
- **Modellbasierte Prognosewerte:** Bereitstellung von Regressionen, die es erlauben, komplexe Mischguteigenschaften wie Ermüdung und Kälteverhalten bereits auf Basis zeitsparender Prüfungen auf der Mastix- und Bindemittlebene vorherzusagen.
- **Ableitung von Grenzwerten:** Vorschlag von praxisgerechten Grenzwerten für das Füller/Bitumen-Verhältnis sowie von spezifischen Anforderungswerten für rückgewonnene Bindemittel.
- **Konzept zur rechnerischen Dimensionierung:** Erstellung einer fundierten Basis zur Überarbeitung des Regelwerks der Dimensionierung (RVS 03.08.68), um insbesondere das Kälteverhalten künftig explizit in der mechanistischen Dimensionierung berücksichtigen zu können.
- **Vorbereitung der Umsetzung in das Normenwerk:** Erarbeitung von RVS-Merkblatt-Entwürfen für die neuen Prüfmethoden und deren Übermittlung an die relevanten Arbeitsausschüsse zur Implementierung in das nationale Regelwerk.

2. Methoden und Prüfverfahren

2.1. Überblick zu Arbeitspaketen (AP) und Meilensteinen

Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete (AP) gegliedert, die eine Umsetzung des Prüf- und Analyseprogramms im vorgegebenen Projekt- und Budgetrahmen ermöglichen. Die Struktur ist in der Übersicht in Abbildung 2.1 dargestellt.

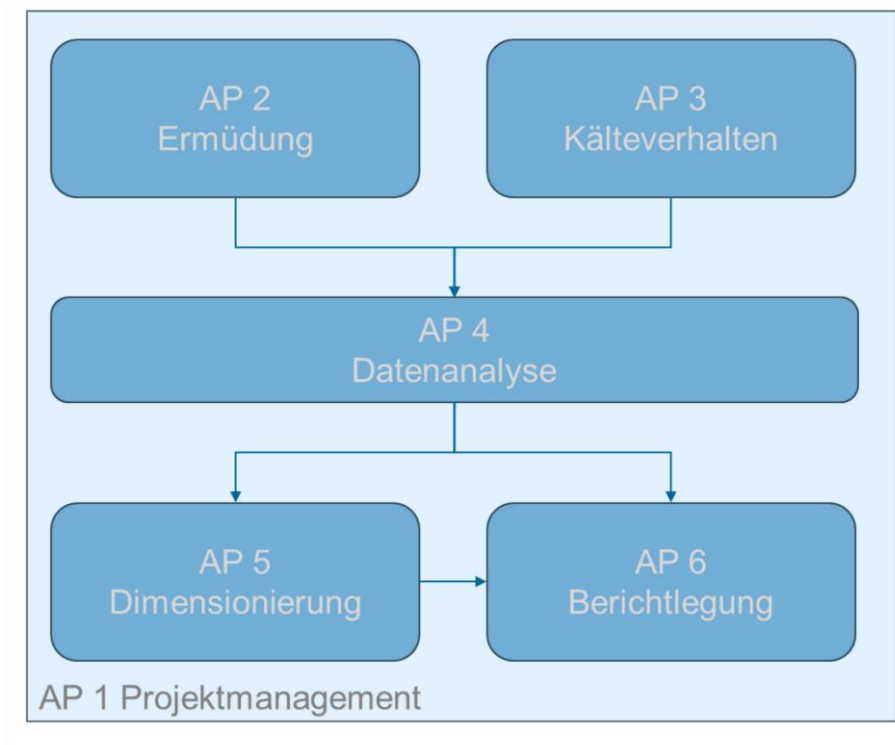


Abbildung 2.1: Projektstruktur und -ablauf

2.1.1. AP1: Projektmanagement

Es wird die klassische Projektmanagement-Methode verfolgt, welche bereits in der Vorprojektphase startet (Finden von Projektpartnern bis Einreichung des Anbots), den Projektfortschritt laufend kontrolliert und steuernd eingreift und schließlich das Projekt abschließt. Projektdiskontinuitäten werden von den Verantwortlichen der AP dem Projektleiter unverzüglich übermittelt, um gemeinsam Lösungsstrategien zu entwickeln und den Zeitplan in angebotener Qualität einhalten zu können. Das Controlling des Leistungsfortschritts erfolgt durch regelmäßigen Informationsaustausch und Meetings.

2.1.2. AP2: Ermüdungsverhalten

Zunächst werden in Abstimmung mit dem AG repräsentative Mischgüter für Binder- und Tragschichtmischgut ausgewählt. Es sind 7 Varianten vorgesehen.

Die Mischgut- und Probekörperherstellung im Labor wird zwischen den Partnern aufgeteilt sowie auch die Prüfung des Ermüdungsverhaltens, da sowohl 4PB, als auch CIT-CY zur Anwendung kommen. Für einzelne Mischgutsorten werden Probekörper von beiden Labors parallel auf Ermüdung untersucht, um die Vergleichbarkeit der Prüfmaschinen darzulegen.

Parallel dazu wird für alle Mischgutvarianten auch die korrespondierende Mastix mit dem DSR-Prüfverfahren (DSR) geprüft. Die korrespondierende Mastix ist eine massenäquivalente

Mischung aus Bindemittel, Füller und ausgesiebttem Anteil $\leq 125 \mu\text{m}$ der feinen und groben Gesteinskörnung. Das Bindemittel wird im RTFOT-Zustand berücksichtigt, da es in diesem kurzzeitgealterten Zustand im Mischgut aktiv ist. Die Herstellung der Mastix erfolgt wie in [1] beschrieben.

Für einzelne Mischgutvarianten wird ein zweiter Weg bei der Mastixprüfung eingeschlagen: Aus dem Mischgut werden die Ausgangsstoffe rückgewonnen. Extrahiertes Bindemittel und Gesteinskomponenten $\leq 125 \mu\text{m}$ werden zu Mastix vermischt und DSR-Prüfungen durchgeführt. So kann analysiert werden, welchen Einfluss die Rückgewinnung auf die Ergebnisse hat um dies bei der Implementierung in der QK/QS berücksichtigen zu können.

2.1.3. AP3: Kälteverhalten

Analog zu AP 2 wird auch hier zunächst repräsentatives Deckschichtmischgut mit dem AG abgestimmt. Vorgeschlagen werden zunächst 8 Mischgut-Varianten.

Für die Mischgüter werden sowohl Abkühlprüfungen (TSRST) nach den einschlägigen Prüfnormen mit den in Österreich festgelegten Prüfbedingungen der ÖNORM B 358x-2 durchgeführt. Gleichzeitig werden Bindemittel mittels 4mm DSR bei tiefen Temperaturen zwischen 0°C und -30°C geprüft, sowie Bindemittel und Mastix mittels DSR-Relaxationsprüfung bei -10°C . Auch in AP 3 werden für einzelne Mischgüter rückgewonnene Ausgangsstoffe berücksichtigt, um den Einfluss der Extraktion analysieren zu können.

2.1.4. AP4: Datenanalyse

Aus den Prüfdaten der Ermüdungsprüfung auf Mischgut- und Mastixebene können verschiedene Parameter (siehe Arbeitsplan) abgeleitet werden; ebenso werden Daten zu den Ausgangsstoffen und zum Mischgut berücksichtigt. Auf dieser Basis werden Analysemethoden angewandt, um einen Zusammenhang zwischen den Betrachtungsebenen zu erreichen.

Zunächst wird mit einfachen linearen und multilinearen Korrelationsanalysen gestartet, die sich an bisherige Erkenntnisse in Steineder [1] anlehnen. Sollte damit kein befriedigendes Prognosemodell abgeleitet werden können, so werden komplexere multivariate Analysemethoden (MVA) angewandt, in denen lineare und nichtlineare Methoden verknüpft werden.

Analog dazu werden mit den entsprechenden Kennwerten aus der Kälteprüfung Korrelationsanalysen durchgeführt. Angestrebt werden Korrelationen zwischen Bindemittel- und Mischgutebene; sollte dies nicht erfolgreich sein, so stehen auch Prüfdaten der Mastixebene im Bereich der tiefen Temperaturen zur Verfügung. Ergebnis des Arbeitspakets ist ein erweitertes und validiertes Prognosemodell für Ermüdungsprüfung auf Mastix- und Mischgutebene, sowie ein analoges Modell für die Kälteprüfung. Durch die Berücksichtigung des Bitumen-/Füller-Verhältnisses, sowie der Füllerart können Empfehlungen für diese Parameter abgeleitet werden. Ebenso wird der Einfluss

der Extraktion auf die Ergebnisse im mittleren und tiefen Temperaturbereich prüftechnisch abgehandelt und im Rahmen der Datenanalyse berücksichtigt. So können Empfehlungen für Kennwerte nach Bindemittelrückgewinnung entwickelt werden.

2.1.5. AP5: Dimensionierung

Die Rechnerische Dimensionierung in Österreich nach RVS 03.08.68 berücksichtigt bereits Materialeingangsdaten aus 4PB sowie Klimazonen in Österreich. Aus den Erkenntnissen des umfangreichen Prüfprogramms soll ein Konzept erstellt werden, wie diese Dimensionierung weiterentwickelt werden kann, indem einerseits auch das Kälteverhalten berücksichtigt wird und andererseits auch Prüfdaten aus anderen Ermüdungsprüfungen wie dem CIT-CY in Zukunft Eingang finden.

2.1.6. AP6: Berichtlegung

In diesem Arbeitspaket soll eine Zwischenpräsentation nach 12-14 Monaten Projektlaufzeit erfolgen und der Endbericht, der alle Daten, Ergebnisse und Erkenntnisse aufbereitet und zusammenfasst, erstellt werden.

Ebenso werden Richtlinien vorbereitet, um die für Österreich neuen Prüfmethode in praxisnahen Arbeitsanweisungen für alle Prüflabors anwendbar zu machen. Die Entwürfe werden den entsprechenden Arbeitsausschüssen zur weiteren Bearbeitung übermittelt.

2.2. Materialien und Prüfmethode Ermüdungsverhalten

2.2.1. Materialien

Um die Forschungsziele des Arbeitspakets „Ermüdung“ (AP2) zu bearbeiten, wurde im Vorfeld eine Materialsammlung zusammengestellt, die ein repräsentatives Abbild der in Österreich eingesetzten Mischgüter darstellt. Insgesamt wurden sieben Materialmischungen für die Untersuchungen herangezogen.

Als Referenzmischgut diente AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 mit dolomitischem Kalkgestein. Das Prüfprogramm wurde so abgestimmt, dass Variationen des Größtkorns (AC 16, AC 22, AC 32), des Füller-Bindemittel-Verhältnisses sowie der Bitumensorte (PmB 45/80-65, PmB 25/55-65, 50/70) abgebildet werden konnten. Die Probekörpervorbereitung erfolgte im Labor der Nievelt Labor GmbH gemäß ÖNORM B 3580-2 [2].

In Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 sind die Mischgutkennwerte zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Zusammenstellung der Siebdurchgänge, Hohlraumgehalte und Raumdichten der untersuchten Mischgutvarianten

Mischgut	Code	Siebdurchgang [M%]											mittlerer HR-Gehalt [V%]	mittlere Raumdichte [Mg/m ³]	
		0,063	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2	16	22,4	32			45
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	A1E	5,9	9,9	13,2	19,1	30,1	42,4	57,9	68,8	79,7	97,4	100,0	100,0	3,6	2,47
AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	A2E	5,9	9,9	13,2	19,1	30,1	42,4	57,9	68,8	79,7	97,4	100,0	100,0	2,6	2,49
AC 22 trag 50/70, T1, G4	A3E	5,9	9,9	13,2	19,1	30,1	42,4	57,9	68,8	79,7	97,4	100,0	100,0	3,1	2,48
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4, Füller+	A4E	8,3	13,0	16,3	22,3	33,3	45,5	61,0	71,9	82,6	97,8	100,0	100,0	2,7	2,49
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4, Füller-	A5E	4,5	7,9	10,9	16,2	26,2	40,7	56,6	67,5	78,5	97,2	100,0	100,0	4,6	2,47
AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	A6E	6,4	14,7	22,3	35,1	39,8	48,2	66,0	80,2	97,2	100,0	100,0	100,0	6,5	2,43
AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	A7E	5,7	13,1	19,9	31,2	35,4	42,5	55,2	60,9	71,5	81,6	98,9	100,0	5,6	2,44

Tabelle 2.2: Materialzusammensetzung und Mischgutrezepturen der untersuchten Mischgutvarianten

Mischgut	Code	Gestein	Fremdfüller (KSM)	Eigenfüller	Kalkhydrat	0/2	2/4	4/8	8/11	11/16	16/22	22/32	BM-Gehalt [M%]
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	A1E	Kalkstein	1.2	---	0.0	30.9	8.0	16.9	9.7	9.0	19.6	---	4.7
AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	A2E	Kalkstein	1.2	---	0.0	30.9	8.0	16.9	9.7	9.0	19.6	---	4.7
AC 22 trag 50/70, T1, G4	A3E	Kalkstein	1.2	---	0.0	30.9	8.0	16.9	9.7	9.0	19.6	---	4.7
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4, Füller+	A4E	Kalkstein	4.2	---	0.0	30.9	8.0	16.9	9.7	9.0	16.6	---	4.7
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4, Füller-	A5E	Kalkstein	0.0	---	0.0	27.9	11.0	16.9	9.7	9.0	20.8	---	4.7
AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	A6E	Kalkstein	1.3	---	0.0	36.0	8.0	19.6	12.7	17.6	---	---	4.9
AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	A7E	Kalkstein	1.3	---	0.0	32.0	7.0	14.0	3.8	11.0	8.7	17.5	4.7

Um die Ermüdungsbeständigkeit auf Mischgutebene zu beurteilen, wurden die Probekörper nach den normativen Vorgaben der ÖNORM EN 12697-24 [3] bzw. ÖNORM B 3580-2 [2] vorbereitet und geprüft.

2.2.2. Beständigkeit gegen Ermüdung - 4-Punkt-Biegebalken (4-PBB)

Die Ermüdungsbeständigkeit wird gemäß EN 12697-24, Anhang D [3] ermittelt.

Wesentliches Kriterium bei dieser Prüfung ist die Anzahl der Lastwechsel, bis der Probekörper den Zustand der Ermüdung erreicht hat. Dies ist der Fall, wenn der komplexe Steifigkeitsmodul sich auf die Hälfte des Ausgangswerts verringert hat. Der Ausgangswert der komplexen Steifigkeit

wird nach 100 Lastwechsel als $S_{\max,0}$ angegeben. Die Anzahl der Lastwechsel bei Erreichen der Ermüdung wird als $N_{f/50}$ bezeichnet.

Laut Norm wird die Prüfung bei 20°C und 30 Hz durchgeführt. Dabei zeigte sich jedoch, dass beim Referenzmischgut und weiteren Varianten in keinem Einzelversuch das klassische Versagenskriterium erreicht wurde. Detailanalysen ergaben, dass die laborgemischten Rezepturen höhere viskose Anteile (höhere Phasenwinkel) aufwiesen als vergleichbare Mischanlagenproben. In Abstimmung mit den Auftraggebern wurde die Prüftemperatur für den 4PB-Versuch daher auf +10 °C abgesenkt, um das Materialverhalten in einen vergleichbaren, elastischeren Bereich zu verschieben. Es werden drei Dehnungsstufen ausgewählt, bei jeder Dehnungsstufe werden 6 Probekörper geprüft. Damit ergeben sich 18 Einzelprüfungen pro Mischgut. Die in der Dehnungsstufe angegebene Dehnung bezieht sich auf die maximale horizontale Dehnung an der Unterseite des Probekörpers. Die Dehnungsstufen werden so gewählt, dass die Ermüdung nach 10^4 bis $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel auftritt. Die gewählten Dehnungsstufen sind in Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 2.3: Dehnungsstufen für die Ermüdungsprüfung

Mischgut	Dehnungsstufe [$\mu\text{m}/\text{m}$]		
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	220	280	340
AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	160	220	280
AC 22 trag 50/70, T1, G4	100	160	220
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4, Füller +	220	280	340
AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4, Füller -	220	280	340
AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	220	280	340
AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	160	220	280

Die Daten der mindestens 18 Einzelversuche werden in einem Diagramm dargestellt, bei dem die Dehnungsstufe über der Anzahl an Lastwechsel bis zur Ermüdung für jeden Einzelversuch eingetragen wird. Es ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang, die so genannte Wöhlerkurve, mit deren Hilfe die Dehnungsstufe bei Dauerhaltbarkeit ($N_{f/50} = 10^6$ LW) ermittelt werden kann.

2.2.3. Beständigkeit gegen Ermüdung – Zyklische indirekte Zugprüfung (CIT-CY)

Die Ermüdungsbeständigkeit mittels der CIT-CY wird in Anlehnung an die ÖNORM EN 12697-24 [3] durchgeführt. Im Gegensatz zur 4PB, die verformungsgesteuert abläuft, erfolgt dieser Versuch spannungsgesteuert (kraftgesteuert).

Die äußeren Prüfbedingungen umfassen eine Prüftemperatur von +10 °C sowie eine Belastungsfrequenz von 10 Hz. Als Probekörper dienen zylindrische Bohrkerne, deren Durchmesser auf das jeweilige Größtkorn des Mischguts abgestimmt ist (z. B. 150 mm bei einem AC 32). Die Proben werden in einer speziellen Prüfvorrichtung diametral belastet, wobei eine sinusförmige Druckschwellbelastung ohne Ruhepausen aufgebracht wird, bis Makrorisse (Spaltung der Probe)

entstehen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zum 4PB-Versuch ist das Ermüdungskriterium. Während beim 4PB die Halbierung des Ausgangsmoduls herangezogen wird, basiert die Auswertung beim CIT-CY auf dem Energieverhältnis (Energy Ratio, ER). Der Zustand der Ermüdung ist hierbei durch das Entstehen von Makrorissen definiert, was dem Extrempunkt in der Darstellung der Energie-Ratio über die Lastwechsel entspricht. Zur exakten Bestimmung dieses Punktes wird eine Polynomfunktion 4. Grades über die Messdaten gelegt (siehe auch Abbildung 2.1).

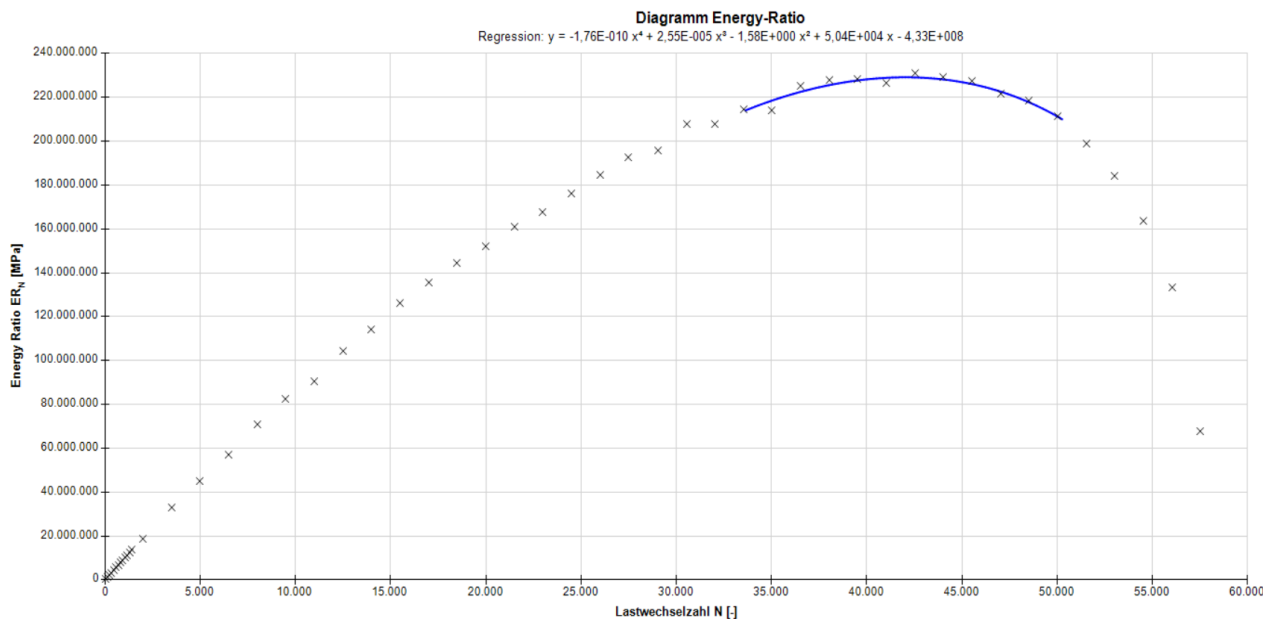


Abbildung 2.2: Beispielhaftes Energy-Ratio Diagramm zur Findung des Maximums im an Lastwechseln bis zur Entstehung von Makrorissen

Pro Mischgutvariante werden mindestens 9 Einzelprüfungen durchgeführt, wobei drei unterschiedliche Spannungsstufen (Oberspannungen) mit jeweils mindestens drei Probekörpern gewählt werden. Die Spannungsstufen werden durch Vorversuche so festgelegt, dass die resultierenden elastischen Anfangsdehnungen im Bereich zwischen $50 \mu\text{m/m}$ und $300 \mu\text{m/m}$ liegen und die Ermüdung zwischen 10^3 und 10^6 Lastwechseln eintritt. Die Prüfdauer beträgt pro Mischgut etwa eine Woche.

Die Daten der Einzelversuche werden analog zum 4PB-Versuch in einem Diagramm dargestellt, bei dem die elastische Anfangsdehnung über der Anzahl der Lastwechsel bis zur Ermüdung aufgetragen wird. Aus der resultierenden Wöhlerkurve können die Lastwechselzahlen bei definierten Dehnungsstufen abgelesen werden, was einen direkten Vergleich der Ermüdungseigenschaften verschiedener Mischgutkonzepte ermöglicht.

2.2.4. Ermüdungsprüfung am DSR mit hyperbolischem Querschnitt (Mastixprüfung)

Die Ermüdungsbeständigkeit auf Mastixebene wird im DSR in Anlehnung an die Methodik von Hospodka et al. [4] sowie Steineder [1] ermittelt.

Im Gegensatz zu zylindrischen Standardgeometrien kommen bei dieser Prüfung hyperbolische Probekörper zum Einsatz. Diese weisen eine Höhe von 3 mm und eine Einschnürung auf 6 mm auf. Durch diese spezielle Formgebung entsteht eine Spannungskonzentration in der Probekörpermitte, die sicherstellt, dass das Material tatsächlich bis zum Punkt der Ermüdung (Kohäsionsbruch) beansprucht wird.

Die äußeren Prüfbedingungen umfassen eine Prüftemperatur von +10 °C sowie eine Belastungsfrequenz von 10 Hz. Der Versuch wird weggesteuert, also mittels konstanter Amplitudenvorgabe, durchgeführt. Das für die Mastixherstellung verwendete Bitumen wird im Vorfeld einer Kurzzeitalterung (RTFOT) unterzogen, um den gealterten Zustand im Asphaltmischgut realitätsnah abzubilden. Die Zusammensetzung der Mastix entspricht dabei hinsichtlich des Bitumen-Füller-Verhältnisses exakt der Relation der jeweiligen Mischgutrezeptur.

Um die verschiedenen Mastix-Varianten quantitativ vergleichen zu können, wird als zentrales Bewertungskriterium der Parameter DSR- τ_6 herangezogen. Dieser Wert gibt jene nominale Schubspannung an, bei der die Mastix einer zyklischen Belastung von einer Million Lastwechseln bis zum Eintreten der Ermüdung standhält.

Zusätzlich zur Prüfung von im Labor hergestellten Mastixproben werden für ausgewählte Varianten die Ausgangsstoffe (Bitumen und Füller) aus dem Asphaltmischgut extrahiert. Diese rückgewonnene Mastix wird analog im DSR geprüft, um den spezifischen Einfluss des realen Mischprozesses sowie der Materialrückgewinnung auf das Ermüdungsverhalten fundiert beurteilen und mit den frischen Ausgangsstoffen vergleichen zu können.

2.3. Materialien und Prüfmethoden Kälteverhalten

2.3.1. Materialien

Um die Forschungsziele des AP3 „Kälteverhalten“ bearbeiten zu können, wurde im Vorfeld eine Materialsammlung zusammengestellt, die ein Abbild der in Österreich eingesetzten, für die betrachteten Performance-Eigenschaften relevanten Mischgüter darstellt. Dieses Konzept wurde im Zuge der Kick-off-Besprechung mit den Vertretern der Auftraggeber diskutiert und angepasst. Insgesamt wurden zwölf Materialmischungen für die Untersuchungen herangezogen.

Als Referenzmischgut diente ein SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS mit einem Hartgestein der Gesteinsart Porphyrit/Kersantit. Das Prüfprogramm wurde so abgestimmt, dass unterschiedlichste Materialvariationen abgebildet werden konnten. Dazu gehörten Variationen des Größtkorns mit 8 mm und 11 mm, Mischgutkonzepte mit unterschiedlichen Hohlraumgehaltsbandbreiten der Kategorien S2 und S3 sowie diverse Gesteinsarten wie Porphyrit/Kersantit, Basalt und Diabas. Ergänzend wurden der Füllergehalt, der Kalkhydratanteil sowie die Bitumensorten PmB 45/80-80, PmB 45/80-65 und PmB 25/55-65 systematisch variiert.

Für das Referenzmischgut SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS wurde auf Basis der verfügbaren Ausgangsstoffe (Bindemittel, Gesteinskörnungen) eine Mischgutkonzeptionierung durchgeführt. Dabei wurden Bindemittelgehalt, Sieblinie und Zielhohlraumgehalt iterativ optimiert, sodass die Mischung die Vorgaben der jeweils relevanten ÖNORM bzw. RVS erfüllt. Hierzu wurden zumindest zwei bis drei Labormischungen hergestellt und in weiterer Folge entsprechende Mischgutuntersuchungen durchgeführt.

Die Variationen des Kalkhydratanteils, der Bindemittelsorte sowie des Füller-Bindemittel-Verhältnisses wurden in weiterer Folge ausgehend von der Referenzmischung abgeleitet, um eine wissenschaftlich belastbare Vergleichbarkeit der Einflüsse einzelner Parameter zu gewährleisten.

In Tabelle 2.4 und Tabelle 2.5 sind die Mischgutkennwerte zusammengefasst.

Tabelle 2.4: Zusammenstellung der Siebdurchgänge, Hohlraumgehalte und Raumdichten der untersuchten Mischgutvarianten

Mischgut	Code	Siebdurchgang [M%]												mittlerer HR-Gehalt [V%]	mittlere Raumdichte [Mg/m ³]
		0,063	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2	16	22,4	32	45		
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20	A1K	6,0	11,2	13,7	17,1	23,3	34,2	60,0	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,0	2,48
SMA 11 deck PmB 25/55-65, S2, GS, KA20	A2K	6,0	11,2	13,7	17,1	23,3	34,2	60,0	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,4	2,45
SMA 11 deck PmB 45/80-65, S2, GS, KA20	A3K	6,0	11,2	13,7	17,1	23,3	34,2	60,0	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,2	2,44
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS	A4K	5,3	11,2	13,7	17,1	23,3	34,2	60,0	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,9	2,45
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Füller -	A5K	2,7	7,3	9,8	13,2	19,8	32,4	59,9	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,1	2,33
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Füller +	A6K	12,3	18,6	21,1	24,4	30,1	38,2	60,3	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,5	2,44
SMA 8 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20	A7K	6,2	12,2	15,1	19,0	25,3	36,7	95,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,9	2,42
SMA 8 deck PmB 45/80-80, S3, GS, KA25	A8K	6,3	11,4	13,9	17,2	23,4	38,0	95,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	6,8	2,36
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Basalt	A9K	6,9	10,8	11,9	16,0	24,6	32,6	61,3	96,3	100,0	100,0	100,0	100,0	3,6	2,5
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Diabas	A10K	6,5	9,5	11,5	15,0	21,7	32,2	61,7	97,5	100,0	100,0	100,0	100,0	4,1	2,34
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, nur KSM	A11K	5,3	11,7	14,4	17,9	24,3	35,1	61,9	97,2	100,0	100,0	100,0	100,0	4,6	2,38
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, nur Eigenfüller	A12K	5,3	11,7	14,4	17,9	24,3	35,1	61,9	97,2	100,0	100,0	100,0	100,0	4,2	2,45

Tabelle 2.5: Materialzusammensetzung und Mischgutrezepturen der untersuchten Mischgutvarianten

Mischgut	Code	Gestein	Fremdfüller (KSM)	Eigenfüller	Kalkhydrat	0/2	2/4	4/8	8/11	BM-Gehalt [M%]
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20	A1K	Porphyrit/K ersantit	2.8	---	2.6	15.9	8.4	22.5	41.3	6.1
SMA 11 deck PmB 25/55-65, S2, GS, KA20	A2K	Porphyrit/K ersantit	2.8	---	2.6	15.9	8.4	22.5	41.3	6.1
SMA 11 deck PmB 45/80-65, S2, GS, KA20	A3K	Porphyrit/K ersantit	2.8	---	2.6	15.9	8.4	22.5	41.3	6.1
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS	A4K	Porphyrit/K ersantit	5.4	---	0.0	15.9	8.4	22.5	41.3	6.1
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Füller -	A5K	Porphyrit/K ersantit	0.9	---	0.8	15.9	10.4	24.2	41.3	6.1
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Füller +	A6K	Porphyrit/K ersantit	6.3	---	6.1	15.9	5.4	18.5	41.3	6.1
SMA 8 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20	A7K	Porphyrit/K ersantit	2.8	---	2.6	18.5	2.7	66.5	---	6.6
SMA 8 deck PmB 45/80-80, S3, GS, KA25	A8K	Porphyrit/K ersantit	2.8	---	2.8	15.4	7.5	64.9	---	6.3
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Basalt	A9K	Basalt	2.3	---	2.8	19.3	4.5	17.8	46.6	6.5
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, Diabas	A10K	Diabas	2.8	---	2.6	15.0	8.0	23.0	42.5	6.1
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, nur KSM	A11K	Porphyrit/K ersantit	6.4	---	0.0	16,0*	8.0	24.0	39.2	6.1
SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20, nur Eigenfüller	A12K	Porphyrit/K ersantit	0.0	6.4	0.0	16,0*	8.0	24.0	39.2	6.1

* Bei der Gesteinskörnung 0/2 wurden die Feinanteile vorab ausgesiebt.

2.3.2. Beständigkeit gegen Kälterisse – Abkühlprüfung (TSRST)

Mit dem TSRST wird die Temperatur ermittelt, bis zu der ein Asphaltmischgut kältebedingte (kryogene) Zugspannungen aufnehmen kann, bevor es durch Riss versagt. Laut EN 12697-46 [5] wird dieses Reißen als Ausfall bezeichnet. Dafür wird der Probekörper, dessen Länge konstant gehalten wird, einer Temperaturabsenkung mit konstanter Rate unterzogen. Aufgrund des verhinderten thermischen Schrumpfens kommt es im Probekörper zu kryogenen Spannungen, die bis zu seinem Ausfall (Bruch) führen. Die Ergebnisse sind der Verlauf der kryogenen Spannungen über die Temperatur $\sigma_{kry}(T)$, die Ausfalltemperatur $TSRST_{max}$ und die ermittelte Ausfallspannung $\sigma_{kry,Ausfall}$. Abbildung 2.3 zeigt das Schema des TSRST.

Die Abmessung der prismatischen Probekörper betragen 60x60x225 mm. Die Prüfung wird bei einer Starttemperatur von 10°C begonnen und die Abkühlrate beträgt 10 K/h. Das Prüfergebn wird als Mittelwert der Ergebnisse von Einzelprüfungen an drei verschiedenen Probekörpern ermittelt.

Die Prüfung trägt dem Umstand Rechnung, dass es sich bei der Straße um ein Längsbauwerk handelt und in Längsausdehnung eine Einspannung vorherrscht. Bei rascher Temperaturabsenkung in den Abendstunden im Winter kommt es durch die Einspannung zur Ausbildung von kryogenen Spannungen, die bei nicht ausreichender Relaxationsfähigkeit des Mischguts zu Rissbildung führen kann.

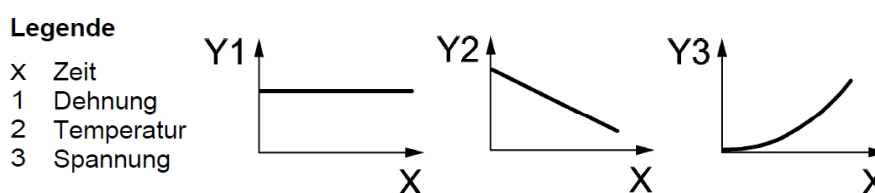


Abbildung 2.3: Prinzip des TSRST nach EN 12697-46

2.3.3. Materialprüfung auf Bitumenebene – 4mm DSR

Zur umfassenden Charakterisierung der Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse über alle Skalenebenen wird eine mehrstufige Prüfmethodik angewandt. Auf Bindemittelsebene kommt hierzu das DSR zum Einsatz, wobei die Durchführung auf der ÖNORM EN 14770 [6] basiert.

Im Gegensatz zu Standardgeometrien für mittlere Temperaturen wird eine spezielle 4-mm-Platten-Geometrie verwendet, die präzise Messungen des komplexen Schermoduls G^* und des Phasenwinkels δ bei Temperaturen bis zu -30 °C ermöglicht. Die Probenvorbereitung umfasst das Gießen des auf 180 °C erhitzten und homogenisierten Bitumens in plattenförmige Kautschuk-Formen mit einem Durchmesser von 4 mm. Nach der Platzierung der Probe im DSR wird der Messspalt zunächst auf 1,05 mm eingestellt, überschüssiges Material plan abgeschnitten und der endgültige Prüfspalt für die Messung auf 1 mm fixiert.

Als Prüfverfahren wird ein Temperatur-Frequenzdurchlauf (T-f-Sweep) durchgeführt, um ein detailliertes rheologisches Profil des Bindemittels zu gewinnen. In Anlehnung an frühere Untersuchungen, insbesondere Primerano et al. [7], wird als zentrale Vergleichsgröße für die Tieftemperatursteifigkeit der komplexe Schermodul G^* bei einer Frequenz von 0,03183 Hz und einer Temperatur von -12 °C herangezogen.

Die Wahl der spezifischen Prüffrequenz von 0,03183 Hz begründet sich in der wissenschaftlich nachgewiesenen Korrelation zwischen den DSR-Ergebnissen und den Versuchsergebnissen des

Biegebalkenrheometers (BBR). Dieser Ansatz erlaubt eine effiziente und materialsparende Beurteilung der Kälteeigenschaften bereits auf der Bindemittelsebene und stellt eine direkte Vergleichbarkeit zu etablierten Tieftemperatur-Kennwerten sicher.

2.3.4. Materialprüfung auf Mastixebene – Scherrelaxationsprüfung

Ergänzend zur Prüfung des komplexen Schermoduls wird das Relaxationsvermögen thermisch induzierter Spannungen im Scherrelaxationsversuch auf Bindemittel- und Mastixebene untersucht. Die Durchführung orientiert sich an der RVS 08.97.07 [8].

Während das Kälteverhalten von Asphaltmischgut klassischerweise durch makroskopische Abkühlprüfungen (wie dem TSRST nach ÖNORM EN 12697-46 [5]) beurteilt wird, ermöglicht dieser DSR-Versuch eine zeiteffiziente Beurteilung der Relaxationsfähigkeit der viskoelastischen Komponenten. Für die Prüfung im DSR kommt eine 8-mm-Platten-Geometrie zum Einsatz. Die Probenvorbereitung umfasst das Gießen des erhitzten Materials in Formschablonen. Nach dem Einsetzen in das auf 65 °C vorgewärmte Gerät wird überschüssiges Material plan abgeschnitten und der finale Messspalt auf 2,0 mm fixiert.

Der Versuch beginnt mit einer Temperierungsphase, in der die Probe auf die Prüftemperatur von -10 °C abgekühlt und für 45 Minuten bei einer geregelten Normalkraft von 0 N konditioniert wird. Im Anschluss wird die Probe schlagartig einer Scherdeformation von 0,1 % unterzogen, welche mit einer konstanten Rate von 0,1 %/s (innerhalb von einer Sekunde) aufgebracht wird. Darauf folgt die eigentliche Relaxationsphase: Die eingebrachte Verformung wird für 30 Minuten konstant gehalten. Während dieses Zeitraums wird der Abbau der initialen Scherspannung (Relaxation) durch das viskose Materialverhalten kontinuierlich aufgezeichnet.

Die zentrale Bewertungsgröße dieses Versuchs ist die Scherrelaxationsviskosität λ_{rel} . Zur Ermittlung dieses Parameters wird zunächst eine Regressionsfunktion aus den gemessenen Werten der Scherspannung τ gebildet. Durch die mathematische Integration dieser Scherspannungsfunktion über die gesamte Relaxationszeit von 1800 s erhält man den quantitativen Wert für λ_{rel} . Dieser Parameter korreliert sehr gut mit der Rissanfälligkeit der entsprechenden Deckschichten im Feld: Ein kleiner Wert für λ_{rel} steht für einen raschen Spannungsabbau und somit ein günstiges Tieftemperaturverhalten, während ein großer Wert einen langsamen Spannungsabbau indiziert und auf ein erhöhtes Kälterisssrisiko schließen lässt.

3. Prüfergebnisse

In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der Mischgutprüfungen dargestellt. Kapitel 3.1 zeigt die Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen und Kapitel 3.2 für das Verhalten im Tieftemperaturbereich.

3.1. Prüfung des Ermüdungsverhaltens

Die nachfolgend präsentierten Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten basieren teilweise auf den Untersuchungen aus der Diplomarbeit von Aldahi [9], welche für die vorliegende Auswertung durch projektspezifische Zusatzversuche systematisch erweitert wurden.

3.1.1. Ergebnisse der 4PB Prüfung

Die 4PB-Ergebnisse (siehe Tabelle 3.1) bei +10 °C weisen ϵ_6 ($\mu\text{m}/\text{m}$) als maßgebenden Vergleichswert aus, wobei höhere Werte eine bessere Ermüdungsbeständigkeit anzeigen. Die besten Werte erzielten AC 16 bin ($\epsilon_6 = 232$) sowie AC 22 bin mit erhöhtem Füllergehalt ($\epsilon_6 = 227$), knapp gefolgt vom Referenzmischgut AC 22 bin PmB 45/80-65 ($\epsilon_6 = 225$). Im Mittelfeld lagen AC 32 bin ($\epsilon_6 = 215$), AC 22 bin PmB 25/55-65 ($\epsilon_6 = 209$) und die Variante mit reduziertem Füllergehalt ($\epsilon_6 = 204$). Deutlich abgesetzt zeigte das Mischgut mit unmodifiziertem Bitumen (AC 22 trag 50/70) die geringste Ermüdungsbeständigkeit ($\epsilon_6 = 84$).

Tabelle 3.1: Übersicht der 4PB-Ergebnisse sowie der Rangfolge bzw. Klassen gemäß EN 13108-1 bei +10 °C

Typ	ϵ_6 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Rang 4PB	$\epsilon_{6-\text{min}}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Klasse
AC 22 bin PmB 45/80-65	225	3	220	3
AC 22 bin PmB 25/55-65	209	5	190	4
AC 22 trag 50/70	84	7	80	10
AC 22 bin Füller +	227	2	220	3
AC 22 bin Füller -	204	6	190	4
AC 16 bin	232	1	220	3
AC 32 bin	215	4	190	4

3.1.2. Ergebnisse der CIT-CY

Die in Abbildung 3.1 dargestellten Ergebnisse der CIT-CY Prüfungen auf Asphaltenebene belegten zunächst den positiven Einfluss der Polymermodifikation des Bitumens.

Das Referenzmischgut sowie die Varianten mit modifiziertem Bindemittel zeigten einen hohen Ermüdungswiderstand (Einstufung in die Klassen 15/200 bis 25/400 laut EN 13108-1 [10], siehe auch Tabelle 3.2). Im direkten Vergleich fiel die Variante mit dem unmodifizierten Straßenbaubitumen (50/70) ab. Bei einem anfänglichen Dehnungsniveau von $\epsilon_{\text{el,anf}} = 50 \mu\text{m}/\text{m}$ ertrug diese 36.229 Lastwechsel (Klasse 3/30), während die PmB-Varianten Werte zwischen 250.000 und über 400.000 Zyklen erreichten. Eine Erhöhung des Füllergehaltes resultierte in 618.639 Lastwechseln (bei $50 \mu\text{m}/\text{m}$). Ursächlich hierfür dürfte die versteifende Wirkung des zugegebenen Fremdfüllers auf das PmB-Netzwerk sein. Eine Reduktion des Fülleranteils bewirkte hingegen keine signifikante Abnahme der Ermüdungsbeständigkeit. Die Modifikationen des Größtkorns zeigten keine systematischen Tendenzen zur Änderung des Ermüdungswiderstands.

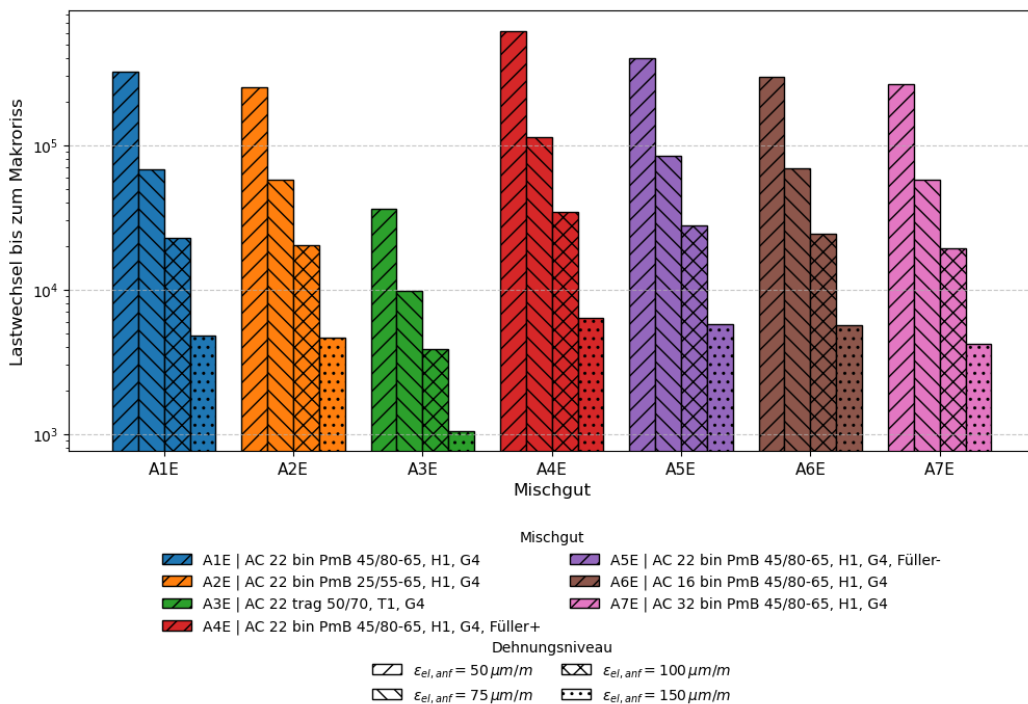


Abbildung 3.1: Anzahl der Lastwechsel bis zum Makroriss bei unterschiedlichen Anfangsdehnungen

Tabelle 3.2: Einordnung der Mischgüter laut EN 13108-1 [10]

Nr.	Mischgut	LW bis zur Ermüdung bei ε _{el,anf} = 50 μm/m	LW bis zur Ermüdung bei ε _{el,anf} = 75 μm/m	LW bis zur Ermüdung bei ε _{el,anf} = 100 μm/m	LW bis zur Ermüdung bei ε _{el,anf} = 150 μm/m	Klasse lt. EN 13108-1
A1E	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4	320 882	68 172	22 714	4 826	N _{macro,min} 15/200
A2E	AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4	250 760	57 550	20 254	4 648	N _{macro,min} 15/200
A3E	AC 22 trag 50/70, H1, G4	36 229	9 778	3 861	1 042	N _{macro,min} 3/30
A4E	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller +	618 639	114 018	34 345	6 330	N _{macro,min} 25/400
A5E	AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4 Füller -	403 207	84 186	27 706	5 785	N _{macro,min} 25/400
A6E	AC 16 bin PmB 45/80-65, H1, G4	295 440	68 810	24 471	5 699	N _{macro,min} 15/200
A7E	AC 32 bin PmB 45/80-65, H1, G4	265 885	57 531	19 419	4 202	N _{macro,min} 15/200

3.1.3. Ergebnisse auf der Mastixebene

Auf der Mastixebene (Abbildung 3.2) spiegeln die Ergebnisse das makroskopische Verhalten wider. Der Einfluss der Bitumensorte war auch im Mastixverhalten deutlich erkennbar. Mastixvarianten mit einem härteren PmB ertrugen deutlich höhere Schubspannungen ($\tau_6 = 354 \text{ MPa}$) als

das klassische Straßenbaubitumen ($\tau_6 = 281 \text{ MPa}$). Übereinstimmend mit den Erkenntnissen am Mischgut bewirkte ein höherer Füllergehalt eine signifikante Versteifung und Erhöhung des Ermüdungswiderstand, was im Spitzenwert von $\tau_6 = 376 \text{ MPa}$ für diese Variante resultierte.

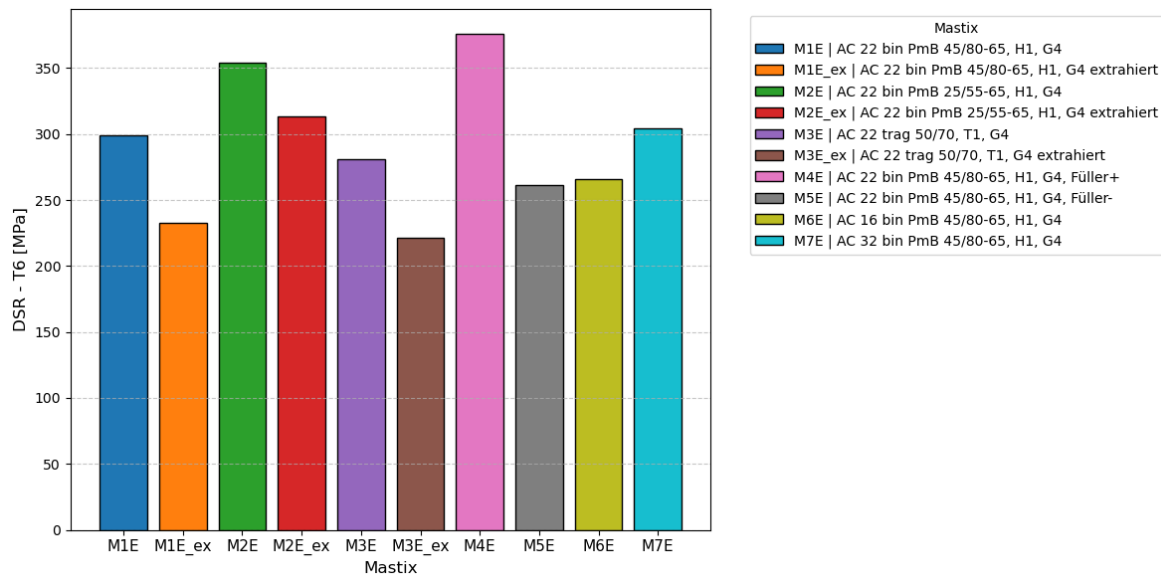


Abbildung 3.2: DSR-T₆ Ergebnisse der untersuchten Mastix

Die Gegenüberstellung der frisch im Labor hergestellten Varianten mit den rückgewonnenen (extrahierten) Mastixproben lieferte weitere Erkenntnisse. Die Untersuchungen zeigten, dass die grundsätzliche Rangfolge der Bindemittelsorten auch beim rückgewonnenen Material erhalten bleibt. Jedoch wiesen die extrahierten Varianten im Vergleich zu den Frischproben durchgehend geringere ertragene Schubspannungen auf (die τ_6 -Werte fielen bei den extrahierten Varianten auf Werte zwischen 221 und 313 MPa ab). Dies deutet darauf hin, dass der Extraktions- und Rückgewinnungsprozess sowie die vorausgehende RTFOT-Alterung die Materialstruktur nicht vollständig realitätsnah abbilden. Für die Bewertung des Ermüdungsverhaltens kann eine Interpretation auf Basis rückgewonnener Mastix nicht empfohlen werden.

3.2. Prüfung des Tieftemperaturverhaltens

Die Datengrundlage zur Beurteilung des Kälteverhaltens setzt sich aus den Resultaten der Diplomarbeit von Kohl [11] zusammen, wobei die Analyse systematisch um zusätzliche Mischgüter erweitert wurde.

3.2.1. Ergebnisse auf Mischgutebene – TSRST

Im TSRST (Abbildung 3.3) zeigten die meisten PmB-Varianten eine hohe Kälteresistenz mit Bruchtemperaturen zwischen -29,9 °C und -31,8 °C. Die Variante mit dem härteren PmB 25/55-65 versagte hingegen bereits bei -26,4 °C und wies damit die ungünstigste Tieftemperaturbeständigkeit auf. Ein reduzierter Füllergehalt verschlechterte die Bruchtemperatur ebenfalls auf -27,1 °C, wobei auch die Zugfestigkeit des Mischguts auf 2,82 MPa sank.

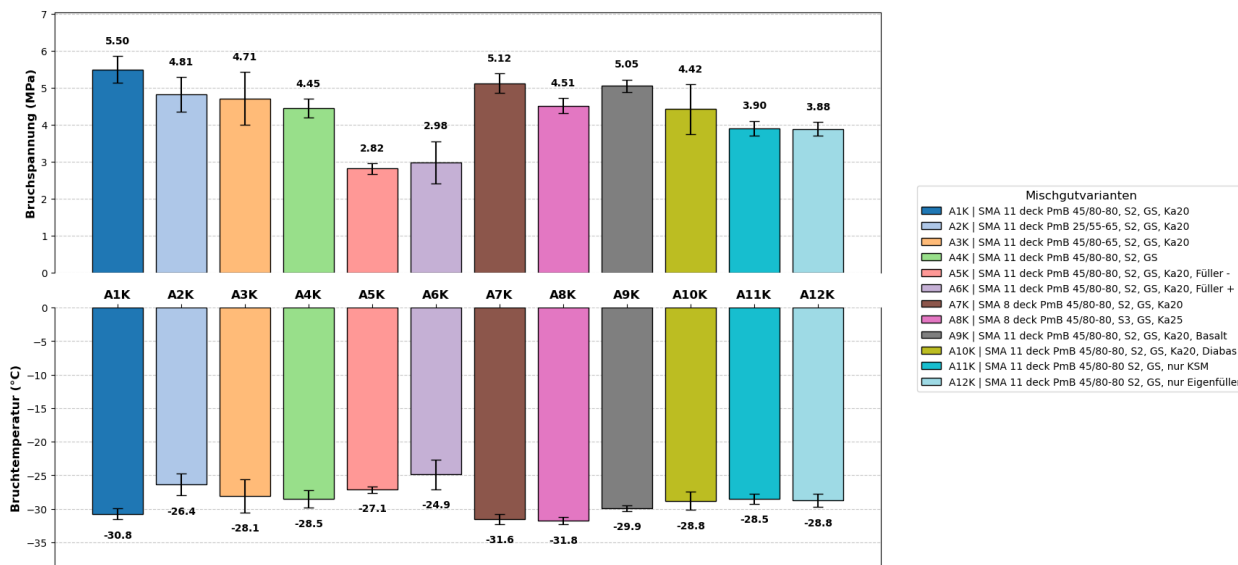


Abbildung 3.3: Ergebnisse der Mischgüter aus dem TSRST

Innerhalb der Versuchsreihe wurden zudem spezifische Einflüsse der Gesteinsart und der Füllerszusammensetzung im TSRST detailliert untersucht. Eine Variante mit Diabas erreichte dabei eine mittlere Bruchtemperatur von -28,8 °C bei einer mittleren Bruchspannung von 4,4 MPa. Bei der Verwendung von reinem Kalksteinmehl als Fremdfüller wurde eine mittlere Bruchtemperatur von -28,5 °C bei einer Spannung von 3,9 MPa dokumentiert. Darüber hinaus wurde der Einfluss eines auf SMA 8 reduzierten Größtkorns analysiert. Hierbei zeigte der Asphalttyp SMA 8 S2 eine Bruchtemperatur von -31,6 °C bei einer hohen mittleren Bruchspannung von 5,12 MPa. Ein Wechsel auf einen SMA 8 S3 führte mit -31,8 °C zu einer nahezu identischen Kälteresistenz, reduzierte die aufnehmbare Bruchspannung jedoch auf 4,51 MPa.

Hinsichtlich der angestrebten Grenzwertableitung zeigte sich, dass auf Asphaltebene sowohl eine Erhöhung als auch eine Reduktion des Füller-Bitumen-Verhältnisses zu einer Verschlechterung der Kälteresistenz führte. Daraus lässt sich schließen, dass der empirisch festgelegte Sieblinienbereich für den Fülleranteil, der im aktuellen Normen- und Richtlinienwerk für SMA-Mischgüter angeführt wird, in einem bezüglich des Kälteverhaltens optimalen Bereich liegt.

3.2.2. Ergebnisse auf Bindemittlebene – 4mm DSR

Auf Bindemittlebene wurden insgesamt vier unterschiedliche Prüfverfahren durchgeführt. Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Zur Erleichterung der Vergleichbarkeit wird für den komplexen Schermodul und den Phasenwinkel jeweils ein repräsentativer Wert bei definierten Prüfbedingungen angeführt.

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Bitumen-Versuche

Nr.	Bitumenklasse	$ G^* ^1$ [MPa]	δ^1 [°]	λ_{rel} [MPa*s]
B1	PmB 45/80-80 (RTFOT)	72,9	25,8	9,64
B2	PmB 25/55-65 (RTFOT)	127,6	21,8	19,47
B3	PmB 45/80-65 (RTFOT)	71,7	26,8	10,15
B4	PmB 45/80-80			6,09
B5	PmB 25/55-65			15,52
B6	PmB 45/80-65			6,73

¹Prüfbedingungen: 0,03183 Hz; -12°C

Die Analyse der Daten zeigt erwartungsgemäß, dass die rheologischen Eigenschaften der Bindemittel PmB 45/80-80 (B1 bzw. B4) und PmB 45/80-65 (B3 bzw. B6) eine hohe Übereinstimmung aufweisen.

Deutliche Unterschiede weisen hingegen die Ergebnisse des PmB 25/55-65 (B2 bzw. B5) auf. Im Vergleich zu den beiden weicheren Bindemitteln fällt der komplexe Schermodul annähernd doppelt so hoch aus.

Ein weiterer prägnanter Unterschied zeigt sich in den Ergebnissen des Scherrelaxationsversuchs: Die ermittelten Werte für die Scherrelaxationsviskosität von B2 und B5 fallen in etwa doppelt so hoch aus wie die der weicheren Bindemittel. Dieser Versuch wurde sowohl am ungealterten als auch am kurzzeitgealterten Bindemittel (RTFOT) durchgeführt. Der direkte Vergleich dieser Zustände belegt für alle drei Bindemittelsysteme eine signifikante Zunahme der Scherrelaxationsviskosität infolge der Alterung. Zusammenfassend bestätigen die vorliegenden Kennwerte, dass das PmB 25/55-65 ein deutlich steiferes Materialverhalten sowie eine signifikant geringere Relaxationsfähigkeit im Vergleich zu den Varianten der Sorte PmB 45/80-xx aufweist.

3.2.3. Ergebnisse auf Mastixebene – Scherrelaxationsversuch

Die Ergebnisse der Scherrelaxationsprüfung zeigen, wie in Abbildung 3.4: Ergebnisse der Scherrelaxationsversuche auf Mastixebene zu sehen, Unterschiede zwischen den Mastixvarianten. Das harte Bindemittel (MK2 (PmB 25/55-65)) weist mit 55,3 MPa*s eine mehr als doppelt so hohe Scherrelaxationsviskosität auf wie die weichere Referenz (MK1 (PmB 45/80-80)) mit 26,2 MPa*s. Auch der Füllergehalt beeinflusst das Relaxationsverhalten deutlich: Gegenüber der reinen Kalksteinmehl-Variante (MK4) mit 17,6 MPa*s steigt der Kennwert bei der Referenzmastix MK1 auf

das etwa 1,5-Fache. Eine Reduktion des Fülleranteils (MK5) führt zu einer nahezu halbierten Viskosität von 14,1 MPa·s, während eine Erhöhung (MK6) eine deutliche Versteifung mit 42,6 MPa·s bewirkt. Die Varianten mit alternativen Füllern (MK7 bis MK9) bewegen sich mit 25,1 bis 28,3 MPa·s im Bereich der Referenz.

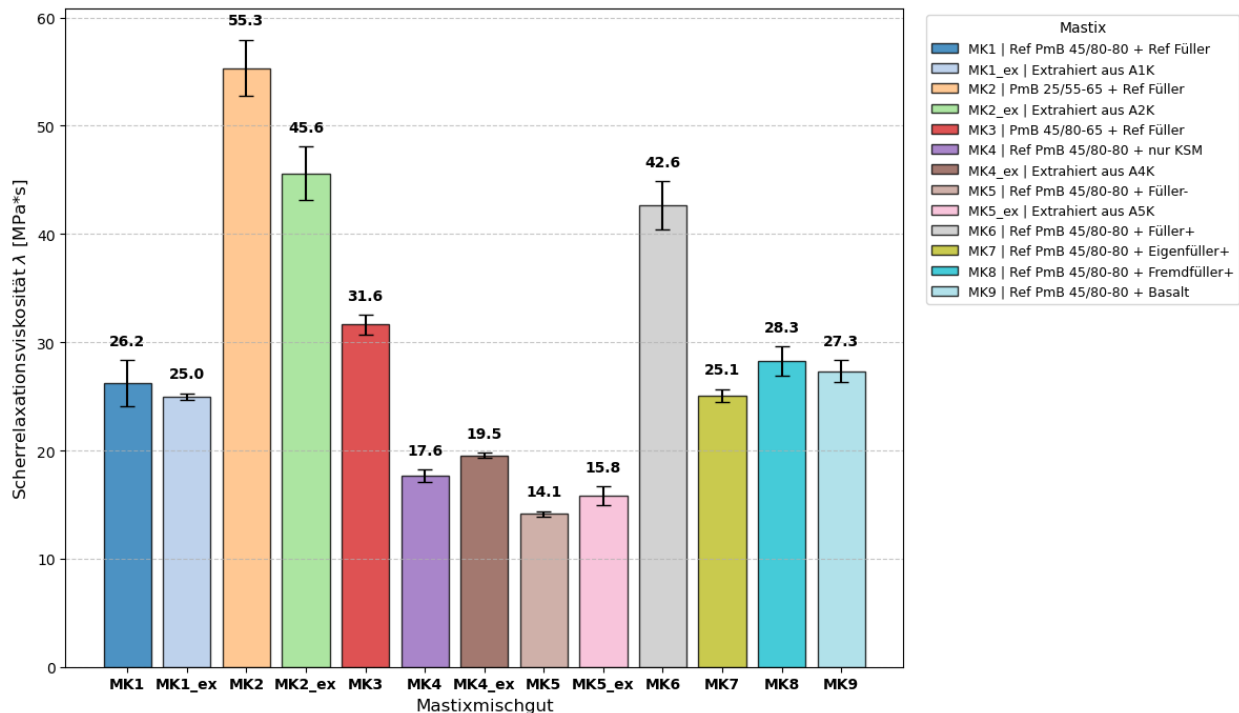


Abbildung 3.4: Ergebnisse der Scherrelaxationsversuche auf Mastixebene

Die aus Asphalt extrahierten Proben zeigen ein ähnliches, jedoch nicht deckungsgleiches Verhalten. MK1_ex liegt mit 25,0 MPa·s nahezu auf dem Niveau der laborseitig hergestellten Referenzmastix MK1. Die Extraktion bei MK2_ex zu einer deutlichen Verringerung auf 45,6 MPa·s. Bei den rückgewonnenen Proben MK4_ex und MK5_ex führt die Rückgewinnung zu einer leichten Versteifung des Materials. Dies weist darauf hin, dass der Rückgewinnungsprozess die Materialantwort messbar beeinflusst und Tieftemperaturprüfungen an rückgewonnenen Mastixproben nicht zur Bewertung empfohlen werden.

4. Datenanalyse

4.1. Methodik

4.1.1. Spearman Korrelation

Zur fundierten Analyse des Ermüdungs- und Kälteverhaltens über die verschiedenen Material-ebenen (Bindemittel, Mastix und Asphaltmischgut) hinweg wird im Rahmen der Datenauswertung eine Kombination aus explorativer Statistik und weiterführenden multivariaten Methoden angewendet. Den fundamentalen Einstieg in die Datenanalyse und die Überprüfung multikollinearer Zusammenhänge bildet dabei die Spearman-Rangkorrelation [12].

Bei diesem Ansatz handelt es sich um ein robustes, nicht-parametrisches statistisches Verfahren zur Identifikation und Quantifizierung monotoner Zusammenhänge zwischen zwei Variablen. Im Gegensatz zur klassischen Pearson-Korrelation, welche ausschließlich lineare Abhängigkeiten misst und normalverteilte Datensätze voraussetzt, transformiert die Spearman-Korrelation die absoluten Messwerte zunächst in Ränge. Der Korrelationskoeffizient ρ berechnet sich anschließend über die Rangdifferenzen, wobei d_i die Differenz der Ränge der gepaarten Beobachtungen und n die Stichprobengröße darstellt:

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum d_i^2}{n * (n^2 - 1)} \quad 1$$

Diese rangbasierte Methodik bringt für die spezifische Datenstruktur des vorliegenden Projekts entscheidende Vorteile mit sich. Erstens ist sie unempfindlich gegenüber Ausreißern (extremen Messwerten), die bei bruch- und verformungsmechanischen Materialprüfungen (wie beispielsweise bei den Tieftemperaturprüfungen (TSRST) oder den zyklischen Ermüdungsversuchen (CIT-CY, 4PB)) methodisch bedingt vereinzelt auftreten können.

Zweitens erfordert die Spearman-Korrelation keine Normalverteilung der Daten. Da im Rahmen des Prüfprogramms bewusst eine ausgewählte, begrenzte Anzahl an repräsentativen Mischgutvarianten (sieben bzw. acht Rezepturen) mit gezielt variierenden Parametern (wie unterschiedlichen Füller/Bitumen-Verhältnissen oder Modifikationen) untersucht wird, liegen naturgemäß kleinere Stichprobengrößen vor. Bei derart konzipierten Versuchsmatrizen ist die Annahme einer Normalverteilung oft nicht belastbar, weshalb nicht-parametrische Verfahren die statistische Belastbarkeit der Aussagen signifikant erhöhen.

Die Spearman-Rangkorrelation dient im Projektverlauf somit als essenzielles Filterwerkzeug. Sie ermöglicht es, aus der Vielzahl der generierten Kennwerte auf Bindemittel- und Mastixebene sowie den Zielgrößen auf Mischgutebene jene Parameterpaare zu identifizieren, die einen eindeutigen, systematischen Zusammenhang aufweisen. Auf Basis dieser robusten Vorauswahl können

in einem weiteren Schritt zielgerichtet komplexere, multivariate Analysen angewandt werden, um die finalen Prognosemodelle zwischen den Materialebenen aufzubauen.

4.1.2. Least Absolut Shrinkage and Selection Operator (Lasso) Regression

Ergänzend zu den explorativen Verfahren kommt für die prädiktive Modellierung und die Verknüpfung der Materialebenen die Lasso-Regression (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator; [13]) zum Einsatz. Diese etablierte Methode aus dem Bereich des maschinellen Lernens erweitert die klassische multilineare Regression um einen sogenannten Regularisierungsterm (L1-Norm). Die Zielfunktion der Lasso-Regression minimiert dabei nicht nur die Summe der quadrierten Abweichungen, sondern bestraft gleichzeitig die absolute Größe der Regressionskoeffizienten.

Das herausragende Merkmal dieser L1-Regularisierung, gesteuert durch den Strafterm λ , ist ihre Fähigkeit, eine integrierte Feature-Selektion (Merkmalsauswahl) durchzuführen. Während herkömmliche Regressionsmodelle bei einer großen Anzahl an Eingangsvariablen schnell zu einer Überanpassung (Overfitting) neigen, reduziert die Lasso-Regression die Koeffizienten weniger relevanter Parameter exakt auf null. In dem vorliegenden Projektkontext ist dieser Mechanismus von entscheidender Bedeutung: Aus einer Vielzahl potenzieller Rezeptur- und Materialparameter auf Bindemittel- und Mastixebene (wie beispielsweise Bindemittelgehalt, Füllermenge, Füllerart, komplexer Schermodul, Phasenwinkel oder Relaxationsviskosität) können so algorithmisch die tatsächlich maßgebenden Einflussfaktoren isoliert werden, um das Ermüdungs- und Kälteverhalten des Mischguts zuverlässig zu prognostizieren.

Da im experimentellen Straßenbau in der Regel eine im Verhältnis zur Parameteranzahl begrenzte Stichprobengröße (kleines n) vorliegt, birgt die Modellbildung stets das Risiko, dass Ergebnisse nicht auf neue Materialien übertragbar sind. Um die statistische Belastbarkeit und Generalisierbarkeit der gefundenen Zusammenhänge bestmöglich abzusichern, wird die Lasso-Regression methodisch zwingend mit einer Leave-One-Out Cross-Validation (LOO-CV) gekoppelt.

Bei dieser strengen Kreuzvalidierungsmethode wird das Modell iterativ mit allen bis auf eine Beobachtung ($n-1$) trainiert und anschließend an dem exkludierten Datenpunkt getestet. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis jede einzelne Mischgutvariante exakt einmal, als unabhängiger Testdatensatz fungiert hat. Die LOO-CV wird genutzt, um den optimalen Regularisierungsparameter λ unverzerrt zu bestimmen.

4.1.3. Mehrfache Lineare Regression

Für die mathematische Modellbildung und die quantitative Vorhersage des Ermüdungsverhaltens auf Mischgutebene wird ergänzend die Multiple Lineare Regression (MLR) eingesetzt. Während

die Spearman-Rangkorrelation lediglich die Stärke und Richtung monotoner Zusammenhänge zwischen zwei Variablen identifiziert, erlaubt die MLR die Abbildung einer Zielgröße Y als lineare Funktion mehrerer unabhängiger Prädiktoren X_i . Das Modell folgt der allgemeinen Gleichung:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad 2$$

Hierbei stellen β_i die Regressionskoeffizienten dar, die den Einfluss der jeweiligen Eingangsvariablen gewichten, während ϵ den unerklärten Fehlerterm beschreibt. Ziel der MLR im Projekt IQ Asphalt ist es, eine belastbare Brücke zwischen den effizient zu ermittelnden Kennwerten der Bindemittel- und Mastixebene und dem komplexen Gebrauchsverhalten des Asphaltmischguts zu schlagen.

Eine kritische Herausforderung bei der Anwendung der MLR liegt in der im Verhältnis zur Parameteranzahl begrenzten Stichprobengröße der untersuchten Mischgutvarianten. Bei einer zu hohen Anzahl an Prädiktoren besteht das mathematische Risiko einer Überanpassung (Overfitting). In einem solchen Fall „lernt“ das Modell die spezifischen Rauschanteile und Zufallsvariationen des Trainingsdatensatzes auswendig, verliert jedoch die Fähigkeit, allgemeingültige physikalisch-mechanische Zusammenhänge auf neue, unbekannte Asphaltrezepturen zu übertragen. Ein hoher Bestimmtheitsmaß R^2 im Training ist daher allein kein hinreichendes Maß für die Prognosequalität. Um die statistische Belastbarkeit und die Generalisierbarkeit des MLR-Modells objektiv sicherzustellen, wurde die Prognosegüte ebenfalls strikt mittels einer LOO-CV überprüft.

4.2. Datenanalyse Ermüdungsverhalten

4.2.1. Regression CIT-CY 4PBB

Zur Absicherung der CIT-CY-Methodik wurde zunächst ein einfacher Vergleich mit den Ergebnissen des 4-Punkt-Biegeversuchs (4PB) durchgeführt. Die Korrelation zwischen beiden Prüfverfahren hängt, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, deutlich vom betrachteten Dehnungsniveau ab. Bei einem niedrigen Dehnungsniveau von $50 \mu\text{m/m}$ ist die Übereinstimmung nur begrenzt, während bei $150 \mu\text{m/m}$ eine sehr hohe Korrelation erreicht wird. Dies zeigt, dass der CIT-CY insbesondere im höheren Dehnungsbereich eine sehr gute Übertragbarkeit zum Referenzverfahren aufweist, während bei niedrigen Dehnungen die Unterschiede in Belastungsart und Steuerungsprinzip stärker zum Tragen kommen.

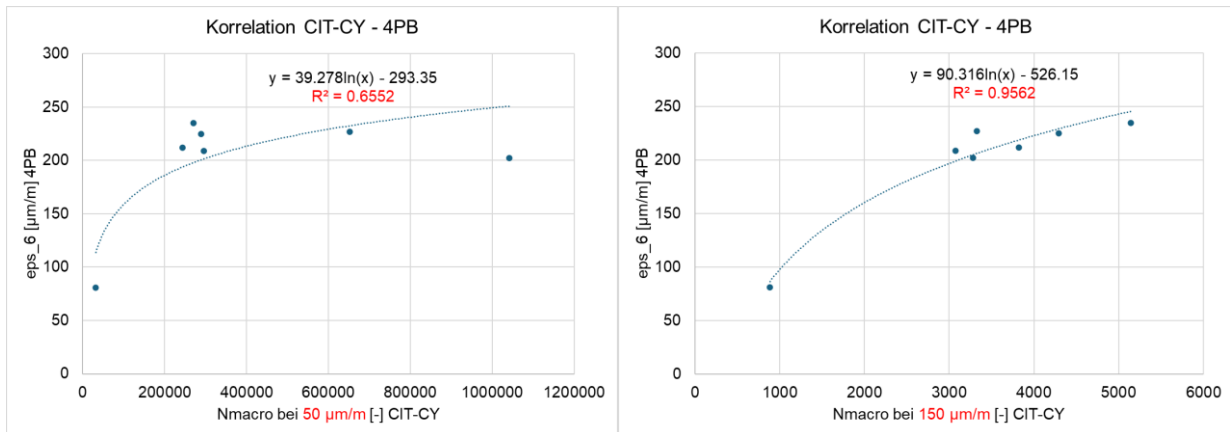


Abbildung 4.1: Korrelation zwischen CIT-CY und 4PB

4.2.2. Spearman Rangkorrelation – Ermüdung

Die Spearman-Auswertung (Abbildung 4.2) bestätigt darüber hinaus klare Zusammenhänge zwischen den materialtechnischen Kennwerten. Besonders deutlich ist die negative Korrelation zwischen Rohdichte und Asphaltsteifigkeit sowie der Zusammenhang zwischen Steifigkeitsparametern und der Ermüdungslbensdauer. Die elastischen Anfangsdehnungen weisen dabei eine stärkere Beziehung zur Lebensdauer auf als spätere Dehnungszustände, was darauf hindeutet, dass frühe Deformationsphasen im CIT-CY einen besonders aussagekräftigen Indikator für das Versagen darstellen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere Asphaltsteifigkeit, Bitumenanteil und Polymermodifikation maßgeblich zur Ermüdungsperformance beitragen.

Besonders hervorzuheben ist das Verhalten der elastischen Dehnungen (ϵ_{el}). Es ist festzustellen, dass $\epsilon_{el,10^6}$ mit einem Koeffizienten von 0,89 deutlich stärker mit der Lebensdauer ($N_{macro,75}$ bis $N_{macro,150}$) korreliert als die elastische Dehnung nach 10^4 Lastwechseln (0,45). Dies legt nahe, dass die Dehnung im fortgeschrittenen Stadium ein präziserer Indikator für die Ermüdungslbensdauer im CIT-CY ist. Ein interessantes Detail zeigt sich beim Bitumenanteil. Dieser korreliert mit 0,62 mit der frühen Dehnung ($\epsilon_{el,10^4}$), verliert diesen statistischen Einfluss jedoch bei den Dehnungswerten der höheren Lastwechselstufen.

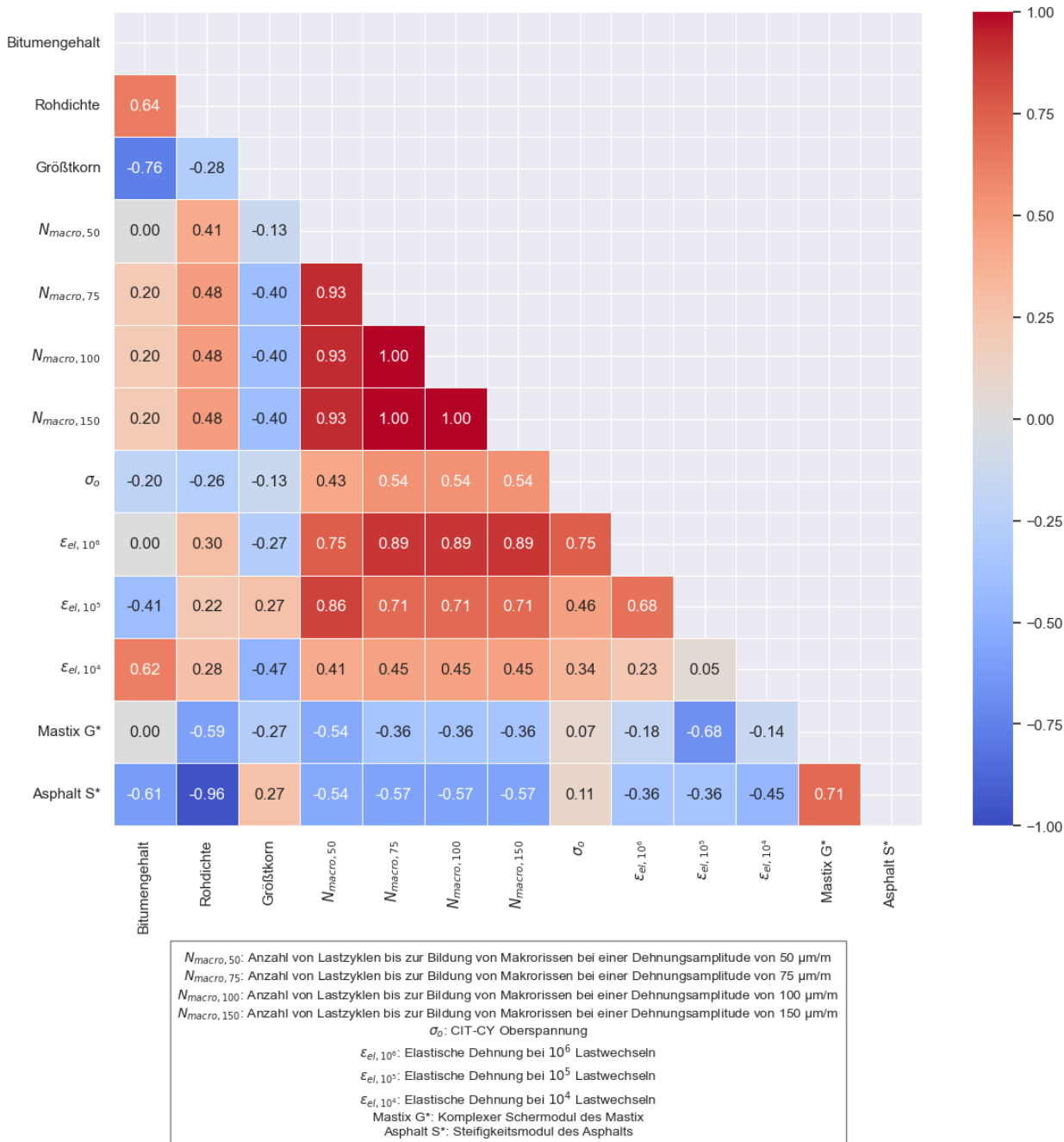


Abbildung 4.2: Spearman-Korrelationsmatrix mit den Ermüdungsparametern

4.2.3. Lasso Regression – Ermüdung

Die Lasso-Regression (Abbildung 4.3) liefert für die Zielvariable eine sehr gute Anpassungsgüte mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$ (inklusive LOO-Validierung). Die Feature-Importance identifiziert dabei die Asphaltsteifigkeit als den Faktor mit dem stärksten negativen Einfluss, da eine höhere Steifigkeit im kraftgesteuerten Versuch zu einer schnelleren Ermüdung führt. Der Bitumenanteil zeigt ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Modellstabilität, wobei die

Polymermodifikation das Ermüdungsverhalten gegenüber nicht modifizierten Bitumen verbessert. Das Größtkorn gehört zu den selektierten strukturellen Parametern, obwohl die alleinige Variation des Größtkorns in den Rohdaten keine eindeutige Tendenz ergab. Schließlich trägt der Füllerteil positiv zur Prädiktion bei, wobei insbesondere die Erhöhung des Fremdfülleranteils zu einer Steigerung der Lastwechselzahlen und der Mastix-Schubspannung führte.

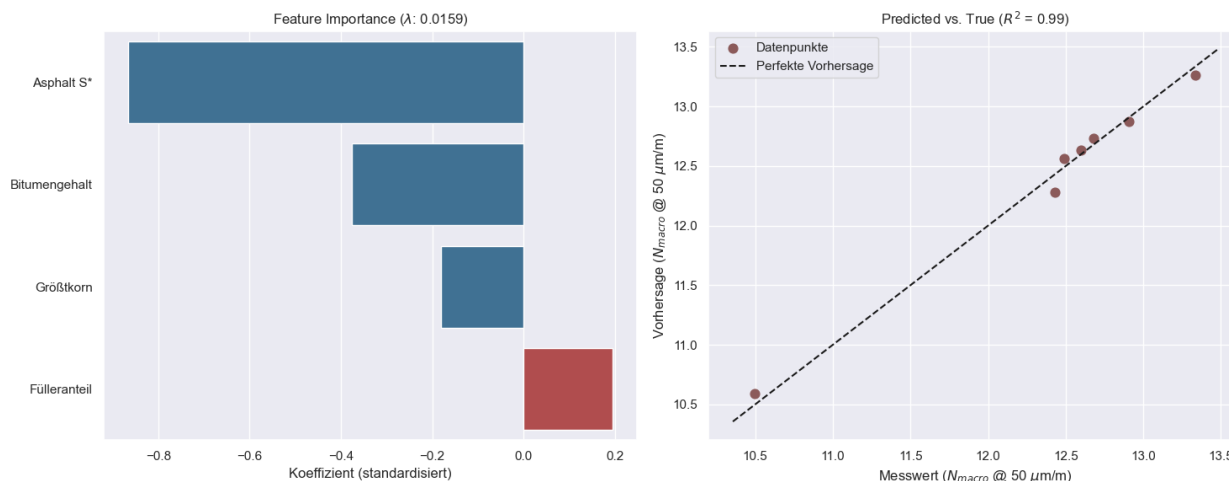


Abbildung 4.3: Darstellung der Lasso-Regression und den wichtigsten Parametern zur Bestimmung von N_{macro}

Die Analyse unterstützt damit die Annahme, dass sich das Ermüdungsverhalten der untersuchten Mischgutvarianten mit einer Kombination aus rheologischen und volumetrischen Kennwerten sehr gut beschreiben lässt. Die hohe Modellgüte ist jedoch im Kontext der begrenzten Stichprobengröße zu interpretieren. Eine gewisse Überanpassung kann daher nicht vollständig ausgeschlossen werden.

4.2.4. Erweiterung des Prognosemodells nach Steineder

Zur Erweiterung des Prognosemodells nach Steineder [1], das für Deckschichten eine hohe Güte ($R^2=0,919$) aufweist, wurde dessen Übertragbarkeit auf Trag- und Binderschichten geprüft. Die Anwendung des Originalmodells auf die neuen Daten zeigte keine ausreichende Prognosegüte ($R^2=-3,261$). Eine Neukalibrierung mit dem kombinierten Datensatz verbesserte das Bestimmtheitsmaß auf $R^2=0,623$ (mit LOO-Validierung: $R^2=0,506$). Um die Vorhersagegenauigkeit für eine schichtübergreifende Betrachtung zu steigern, wurde das Größtkorn (GK) als Parameter in die Regression integriert. Dieses erweiterte Modell erzielt nun unter strenger LOO-Validierung ein robustes R^2 von 0,708.

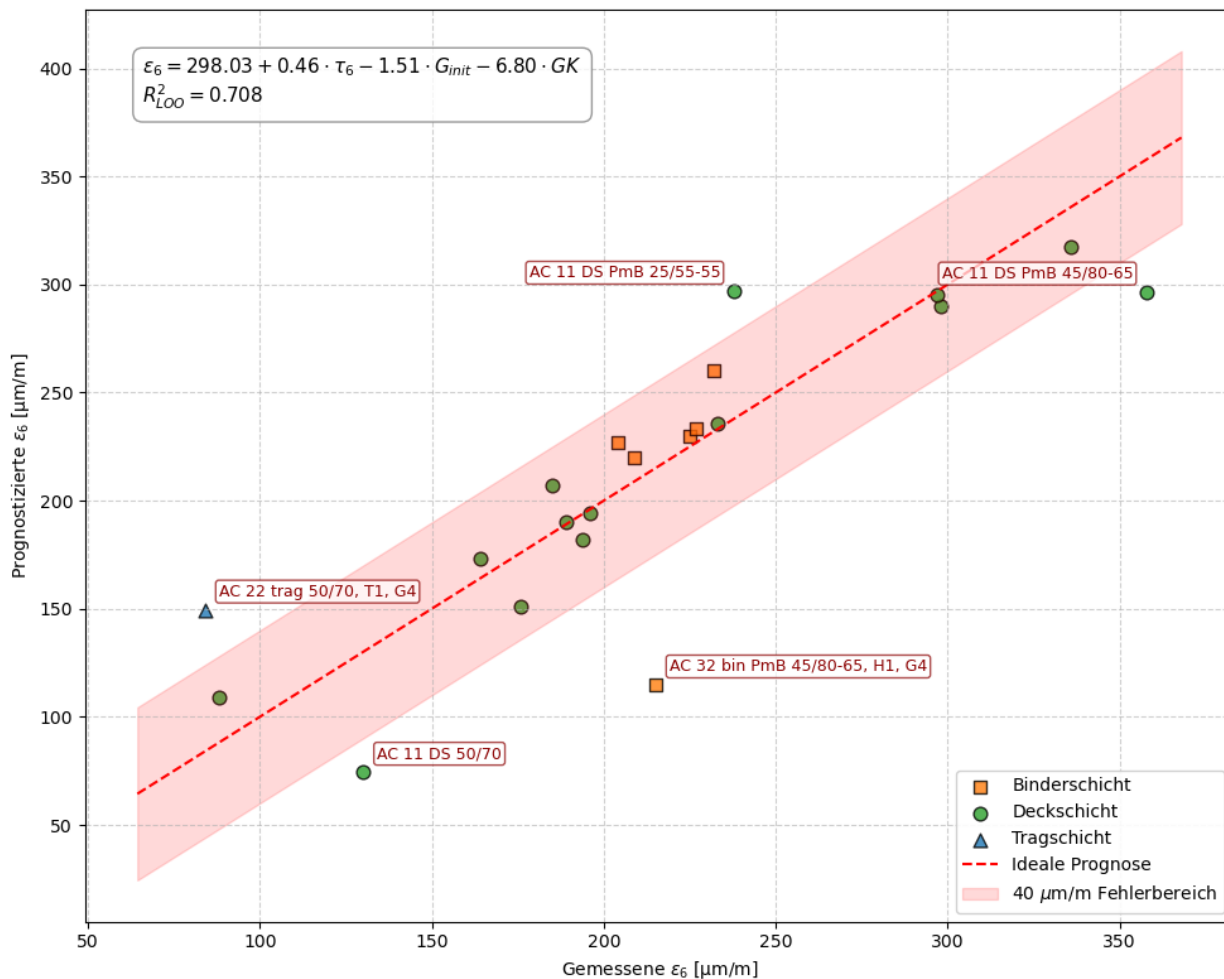


Abbildung 4.4: Erweiterung des Prognosemodells auf Trag- und Binderschichten unter Miteinbeziehung des Parameters Größtkorn

Trotz dieser statistisch guten Kennwerte offenbart eine detaillierte Betrachtung der Abweichungen zwischen Messwert und Prognose wesentliche Einschränkungen in der praktischen Zuverlässigkeit des Modells. Abbildung 4.4 zeigt das Modell inklusive einem Fehlerbereich, der sich aus der typischen Streuung von Prüfergebnissen im 4PB ableitet. Eine Gefahr für die rechnerische Dimensionierung besteht bei jenen Mischgütern, deren Ermüdungswiderstand durch das Modell systematisch überschätzt wird. Wenn das Modell rechnerisch eine höhere technische Qualität suggeriert, als das Material im realen Ermüdungsversuch (wie dem 4PB oder CIT-CY) tatsächlich leistet, birgt dies das Risiko einer Unterdimensionierung von Asphaltaufbauten. In der Baupraxis kann dies zu frühzeitigen Ermüdungsrissen und einer drastisch verkürzten Nutzungsdauer der Straßeninfrastruktur führen. Im Gegensatz dazu stellen Materialien, die vom Modell schlechter eingestuft werden, als sie tatsächlich sind, aus Sicht der baulichen Dauerhaftigkeit ein weitaus geringeres Problem dar. Dennoch ist eine solche konservative Abweichung ökonomisch ineffizient, da das Potenzial hochwertiger und oftmals teurerer Mischgüter dadurch bei der Bemessung nicht voll ausgeschöpft wird.

Als problematisch erweist sich darüber hinaus das Auftreten signifikanter, nicht identifizierbarer Ausreißer, wie es exemplarisch beim Mischgut AC 32 bin der Fall ist. Trotz der methodischen Berücksichtigung des Größtkorns und der Mastixsteifigkeit gelingt es dem Modell bei diesem Materialtyp nicht annähernd, die tatsächliche Performance präzise abzubilden. Es bleibt auf Basis der aktuellen Datenlage ungeklärt, welche physikalischen Faktoren diese massiven Abweichungen verursachen.

4.3. Datenanalyse Kälteverhalten

4.3.1. Spearman Rangkorrelation – Kälteverhalten

Die in Abbildung 4.5 dargestellte Spearman-Korrelationsmatrix liefert erste wichtige Hinweise auf die mechanischen Zusammenhänge bei tiefen Temperaturen. Ein dominanter Zusammenhang zeigt sich zwischen dem Größtkorn (GK) und der Ausfalltemperatur ($TSRST_{max}$) mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,67. Dies deutet darauf hin, dass ein gröberes Korngefüge in diesem Datensatz tendenziell zu höheren Ausfalltemperaturen führt. Im Bereich der Bitumen- und Mastixparameter zeigt sich eine hohe negative Korrelation zwischen dem komplexen Schermodul und dem Phasenwinkel (-1,00), was die physikalische Kopplung dieser Kenngrößen bei den gewählten Versuchsbedingungen bestätigt. Interessanterweise korreliert das Bitumen-Füller-Verhältnis (B:F) mit -0,30 moderat negativ mit $TSRST_{max}$, was darauf hindeutet, dass ein höherer Bitumenanteil im Verhältnis zum Füller die Kälteresistenz durch ein Absenken der Versagenstemperatur tendenziell verbessert. Das Relaxationsvermögen der Mastix ($\lambda_{rel,m}$) weist hingegen kaum eine direkte Korrelation mit der Ausfalltemperatur auf (-0,04), zeigt aber starke statistische Verbindungen zum B:F-Verhältnis und zum FF:EF-Verhältnis.

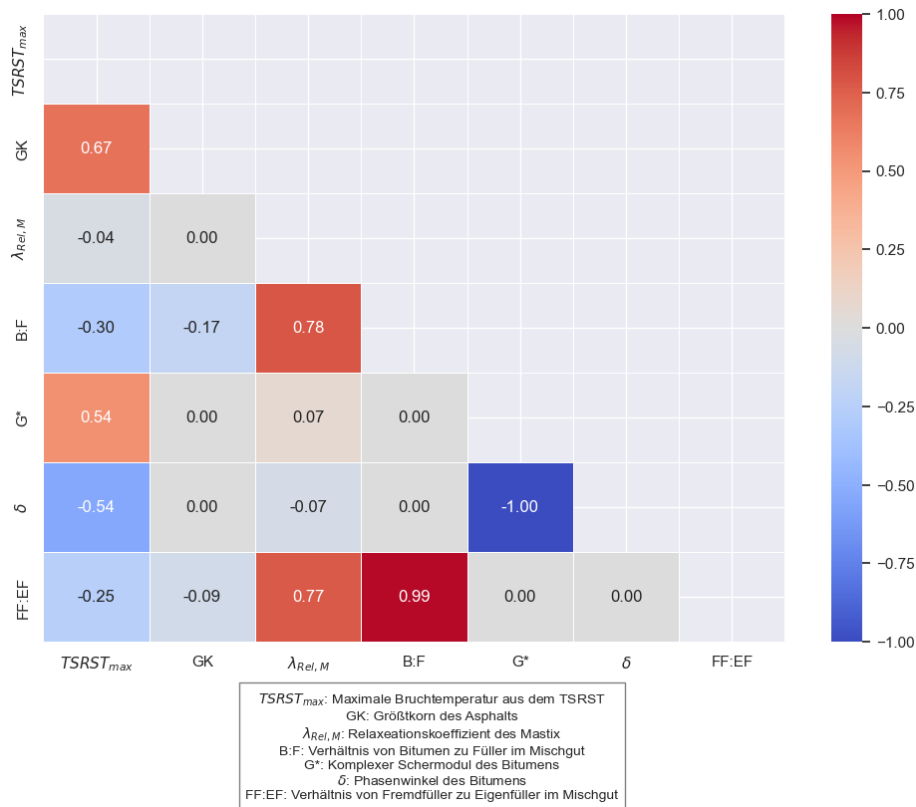


Abbildung 4.5: Spearman-Korrelationsmatrix mit den Parametern des Kälteverhaltens

4.3.2. Lasso Regression – Kälteverhalten

Um die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Kälterissemphindlichkeit präzise zu identifizieren, wurde eine Lasso-Regression (Abbildung 4.6) für die Zielvariable $TSRST_{max}$ durchgeführt. Das Modell erzielt eine sehr gute Anpassungsgüte von $R^2=0,92$ (inklusive LOO-Validierung). Die extrahierten Koeffizienten der Feature Importance zeigen eine klare Priorisierung der Variablen, wobei das Größtkorn (GK) den stärksten positiven Koeffizienten aufweist. Dies bedeutet, dass ein größeres Gesteinsgerüst die Ausfalltemperatur direkt anhebt und somit das Risiko für Kälterisse vergrößert. Im Gegensatz dazu weisen der Phasenwinkel (δ) und das B:F-Verhältnis negative Koeffizienten auf, was physikalisch mit einer verbesserten Flexibilität korrespondiert. Insbesondere ein höheres Bindemittelangebot relativ zum Füller wirkt der kryogenen Rissbildung entgegen.

Die Analyse zeigt damit, dass sich das Tieftemperaturverhalten der untersuchten Mischgutgruppen mit hoher Güte modellieren lässt, wobei insbesondere die Kombination aus Rezepturparametern und Bitumenkennwerten entscheidend ist. Aufgrund der begrenzten Zahl an Varianten ist die Aussagekraft der Modelle jedoch auf die untersuchten Systeme beschränkt. Eine Verallgemeinerung auf andere Mischguttypen ist nur eingeschränkt möglich.

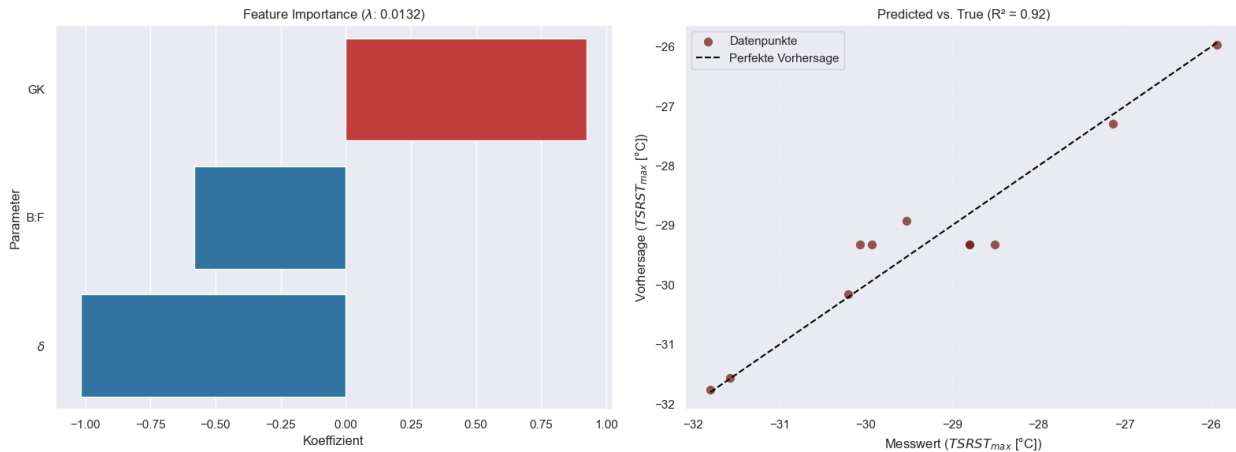


Abbildung 4.6: Darstellung der Lasso-Regression und den wichtigsten Parametern zur Bestimmung von $TSRST_{max}$

5. Dimensionierung

Im derzeitigen Dimensionierungskonzept nach RVS 03.08.68 wird ausschließlich auf strukturelles Versagen durch Ermüdung der bituminösen Tragschicht bemessen. Andere Schadensformen wie Spurrinnenbildung oder Kälterisse bleiben unberücksichtigt. Daher soll in AP5 ein Konzept zur Abbildung des Tieftemperaturverhaltens im Bemessungskonzept entwickelt werden.

Im Winter vorkommende Abkühlraten der Lufttemperatur führen zum Aufbau von Zugspannungen in der Deckschichte. Zusätzlich treten bei der Überfahrt durch LKWs Zugspannungen an der Oberseite des Straßenaufbaus auf. Die kumulierten Spannungen führen zu einer potenziellen Überschreitung der (temperaturabhängigen) Zugfestigkeit des Deckschichtasphalts. Daraus ergibt sich das in Abbildung 5.1 dargestellte Ermüdungskonzept.



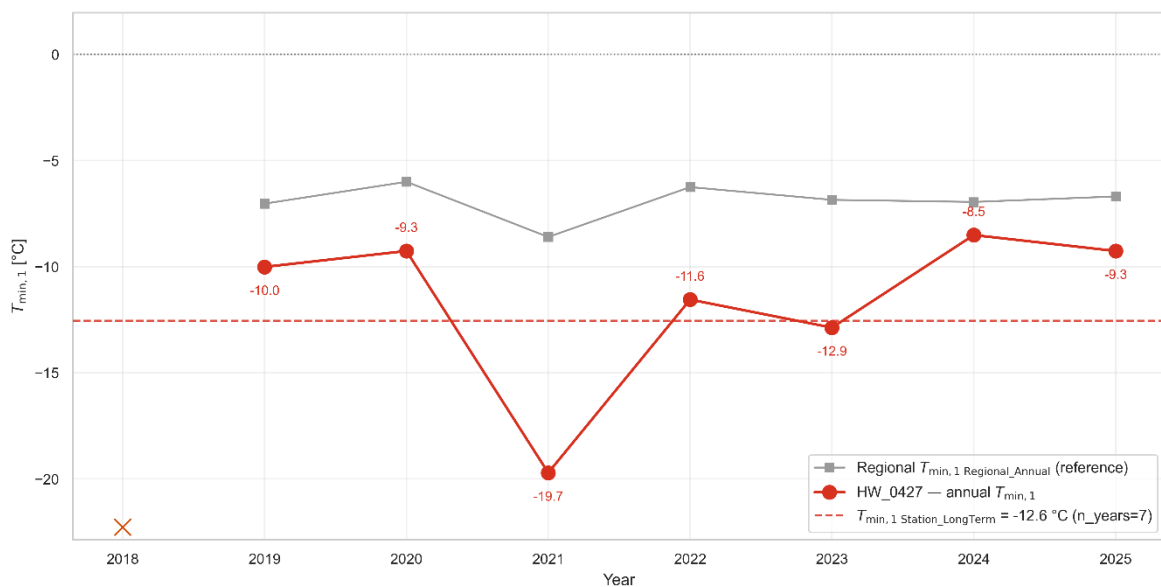
Abbildung 5.1: Bemessungskonzept Kälteverhalten

5.1. Einwirkung

Das Abkühlverhalten von Asphaltmischgütern wird im Abkühlversuch (TSRST gemäß ÖNORM EN 12697-46 [5]) simuliert (siehe auch Kapitel 2.3.2). Dabei werden die kryogenen Zugspannungen während der Abkühlung aufgezeichnet, die als Einwirkung an der Oberfläche der Deckschichte wirken.

Bei der Überfahrt von Schwerfahrzeugen entstehen Zugspannungen an der Oberseite der Deckschicht rund um die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Diese Verkehrslastspannungen werden mit Hilfe der Mehrschichtentheorie nach Burmister [14] berechnet. Für die Simulation wird die Asphaltsteifigkeit bei Temperaturen von 0 °C bis -30 °C sowie die maximale Achslast von 11,5 t gemäß StVO [15] berücksichtigt.

Zur Abschätzung realistischer maßgeblicher Temperaturen wurden Oberflächentemperaturen von 220 Frostwächtern am Autobahn- und Schnellstraßennetz aus den Jahren 2018 bis 2025 ausgewertet. Um Extremwerte zu berücksichtigen, wurde das 1%-Quantil jeden Jahres ausgewertet (siehe rote Linie in Abbildung 5.2). Die geringste Temperatur wurde im Jahr 2021 mit -19,7 °C erreicht.



Red line = HW_0427's per-calendar-year 1% quantile of daily surface minima, computed only when the year passed both QC gates (Rule A & Rule B). Dashed red = that station's long-term aggregate over all valid years. Grey line = regional 1% quantile across the full valid GreenRoad network, for context. Yellow crosses at the plot floor flag invalid years: 2018.

Abbildung 5.2: Jährliche Temperaturminima

5.2. Widerstand

Die Zugfestigkeit wird im UTST-Versuch (Uniaxial Tension Stress Test) gemäß ÖNORM EN 12697-46 [5] ermittelt. Dabei wird ein prismatischer Probekörper im einachsigen Zugversuch bei tiefen Temperaturen axial belastet und die Zugfestigkeit bei Versagen der Probe bestimmt.

5.3. Bemessungskonzept

Als Einwirkung werden die temperaturabhängigen Verkehrslastspannungen und die kryogenen Zugspannungen überlagert und der Zugfestigkeit gegenübergestellt. Dies ist beispielhaft für ein übliches Deckschichtmischgut (SMA 11 deck PmB 45/80-65, S3) in Abbildung 5.3 dargestellt.

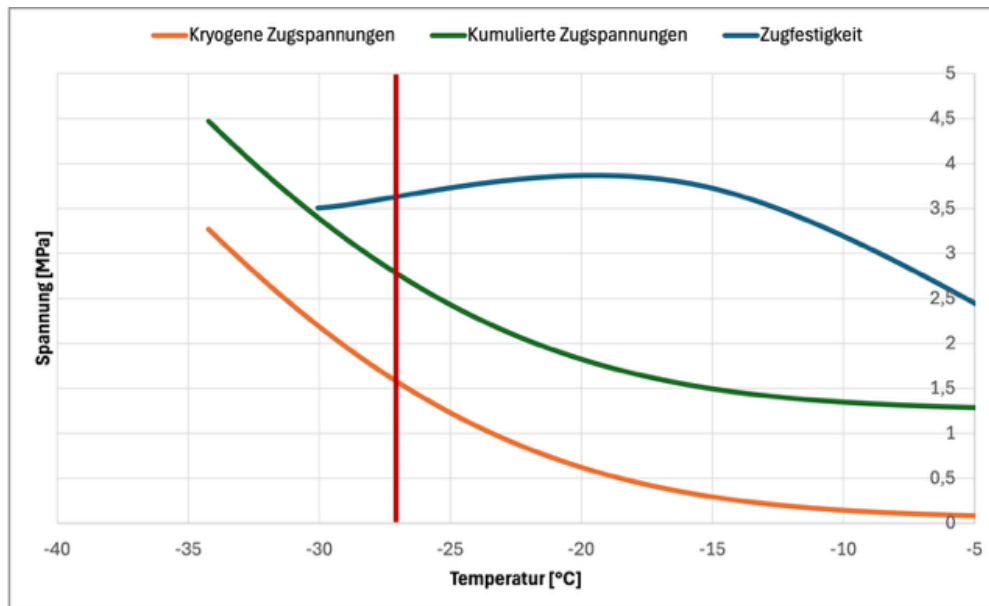


Abbildung 5.3: Bemessung für ein Deckschichtmischgut (SMA 11 deck PmB 45/80-65, S3)

Für die geringste Temperatur von $-19,7\text{ °C}$ wird der Bemessungsnachweis für dieses Mischgut erfüllt. Vor der Implementierung in die rechnerische Dimensionierung sind weitere Untersuchungen mit typischen Deck- und Bindermischgütern erforderlich.

5.4. Überarbeitung des Bemessungskonzept Ermüdung

Aufgrund des begrenzten Umfangs der CIT-CY-Prüfungen (siehe Kapitel 3.1.2), lassen sich keine sinnvollen Wöhler-Kurven für die Ermittlung eines Schadenskriteriums für die strukturelle Bemessung auf Ermüdung der bituminösen Tragschicht ableiten. Daher wird die Umrechnung von ε_6 und N_{macro} gemäß dem Zusammenhang in Abbildung 4.1 empfohlen.

6. Schlussfolgerung

6.1. Ermüdungsverhalten

Im Zuge des Forschungsprojekts „IQ-Asphalt“ konnte die zyklische Schwellzugprüfung (CIT-CY) nach ÖNORM EN 12697-24 erfolgreich, als Prüfmethode implementiert werden. Sie liefert für die

sieben geprüften, repräsentativen Mischgutsorten eine gute Wertespreizung. Eine entsprechende Richtlinie (RVS) wurde erarbeitet und steht kurz vor der Veröffentlichung.

Hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens wurde ein direkter Zusammenhang zwischen Ergebnissen der 4-Punkt-Biegeprüfung (4PB, ϵ_6) und der CIT-CY ($N_{macro,150}$) nachgewiesen. Es zeigte sich zudem ein prognostischer Zusammenhang zwischen Asphaltkennwerten (insbesondere der anfänglichen Steifigkeit aus dem CIT-CY nach 100 Lastwechseln), Mischgutkennwerten (Bindemittelgehalt, Größtkorn, Fülleranteil) und der Asphaltermüdung im CIT-CY. Demgegenüber konnte kein Zusammenhang mit den Mastixkennwerten festgestellt werden. Um die genannten Prognosemodelle statistisch weiter abzusichern, wird ein Ausbau des Datenhintergrunds empfohlen.

Das bestehende Prognosemodell von Steineder [1] für die Ermüdung im 4PB aus Kennwerten der Mastix wurde im Rahmen der Arbeiten erfolgreich erweitert, weist jedoch weiterhin signifikante Abweichungen auf.

Bei der Untersuchung der Mastix aus rückgewonnen Materialien stellte sich heraus, dass diese zwar dieselbe Rangfolge wie die frisch hergestellte Mastix aufweist, jedoch signifikant andere Absolutwerte liefert. Eine Anwendung oder Ableitung von Kennwerten aus rückgewonnener Mastix wird daher – speziell im Hinblick aufzunehmend komplexer werdende Mischgüter – nicht empfohlen.

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse können erste Anforderungswerte für den CIT-CY abgeleitet und für die Implementierung in eine Produktnorm herangezogen werden.

6.2. Kälteverhalten

Das Kälteverhalten von Asphalt wurde auf Mischgutebene mittels der Abkühlprüfung (TSRST) nach ÖNORM EN 12697-46. sowie auf Bindemittel- und Mastixebene mittels der Scherrelaxationsprüfung (SRP) umfassend untersucht. Insgesamt wurden 12 SMA-Mischgutvarianten berücksichtigt. Für die Kälteprüfung auf Bindemittelsebene steht die SRP bereits im Rahmen der RVS 08.97.07 zur Verfügung, die im Rahmen des Projekts erarbeitet wurde.

Durch die Variation des Füllergehalts im Mischgut deutlich über und unter die aktuellen Grenzen der österreichischen Produktnorm für SMA-Mischgut (ÖNORM B 3584-1) konnte anhand der Ergebnisse nachgewiesen werden, dass die aktuellen Sieblinien im Füllerbereich ein Optimum in Bezug auf das Kälteverhalten darstellen und eine Über- und Unterschreitung zu einer ungünstigen Entwicklung des Widerstands gegen Rissbildung führen kann.

Die Auswertungen zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Asphaltkennwerten (Größtkorn, Verhältnis von Bitumen zu Füller), den Bindemittelparametern (insbesondere dem Phasenwinkel des RTFOT-gealterten Bindemittels) und dem Kälteverhalten auf Mischgutebene

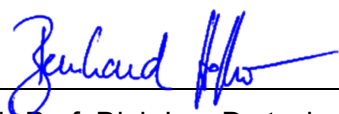
(TSRST_{max}). Auch hier wird empfohlen, den Datenhintergrund sukzessive auszubauen. Analog zu den Ergebnissen der Ermüdungsprüfungen ist die Verwendung von rückgewonnener Mastix für die Beurteilung des Kälteverhaltens nicht empfehlenswert, da sie im Vergleich zur Mastix aus den Ausgangsstoffen nicht dieselbe Rangfolge abbildet.

6.3. Dimensionierung

Das derzeitige Dimensionierungskonzept nach RVS 03.08.68 berücksichtigt nur die Ermüdung der bituminösen Tragschicht, nicht jedoch Kälterisse. Daher wurde ein Konzept entwickelt, das das Tieftemperaturverhalten von Asphalt in die Bemessung integriert. Dabei werden kryogene Zugspannungen aus winterlicher Abkühlung und Verkehrslastspannungen durch Schwerfahrzeuge der temperaturabhängigen Zugfestigkeit des Asphalts gegenübergestellt. Die Spannungen und Materialkennwerte werden mithilfe standardisierter Prüfverfahren gemäß ÖNORM EN 12697-46 und Temperatúrauswertungen ermittelt. Erste Ergebnisse zeigen, dass ein übliches Deckschichtmischgut den Nachweis bei extremen Temperaturen erfüllt, für die praktische Umsetzung jedoch weitere Untersuchungen erforderlich sind. Zudem zeigt die Temperatúrauswertung die Möglichkeit zur Anpassung der Anforderungen zum Widerstand gegen Rissbildung (TSRST_{max}).

Für die Berücksichtigung der CIT-CY-Prüfung im bisherigen Ermüdungsbemessungskonzept wird auf den im Rahmen des Projekts abgeleiteten statistischen Zusammenhang zwischen ϵ_6 und $N_{\text{macro},150}$ verwiesen. Für die Ableitung eines Schadenskriteriums für Ermüdung nach der CIT-CY-Prüfung wird die Erweiterung der Datenbasis empfohlen.

Wien, im Juni 2026



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

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

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Jan
Unterbuchschachner

Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Buchta

Dipl.-Ing. Daniel Steiner

7. Literaturverzeichnis

1. Steineder, M., *A simplified test procedure for assessing the fatigue performance of asphalt mixes*, in *Institute of Transportation*. 2023, TU Wien: Vienna, Austria.
2. International, A.S., *ÖNORM B 3580-2: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Asphaltbeton - Teil 2: Gebrauchsverhaltensorientierte Anforderungen - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1* 2024.
3. Institute, A.S., *ÖNORM EN 12697-24: „Asphalt - Prüfverfahren - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung.“*. 2019: Wien.
4. Hospodka, M., B. Hofko, and R. Blab, *Introducing a new specimen shape to assess the fatigue performance of asphalt mastic by dynamic shear rheometer testing*. *Materials and Structures*, 2018. **51**(2).
5. CEN, *EN 12697-46 Bituminous mixtures - Test methods - Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests*. 2020.
6. CEN, *EN 14770 Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. 2012.
7. Primerano, K., et al., *Low-temperature characterization of bitumen and correlation to chemical properties*. *Construction and Building Materials*, 2023. **366**: p. 130202.
8. FSV, *RVS 08.97.06: Anforderungen an Asphaltmischgut - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz*. 2013, Forschungsgesellschaft Straße-Schienen-Verkehr: Vienna, Austria.
9. Aldhahi, T., *Prüfung des Gebrauchsverhaltens von Asphaltmischgut und Asphaltmastix*. 2025, Technische Universität Wien.
10. CEN, *EN 13108-1 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 1: Asphalt Concrete*. 2016.
11. Kohl, L., *Prüfung des Tieftemperaturverhaltens von Asphalt und Mastix unter Einbeziehung von Korrelationsanalysen*. 2026, Technische Universität Wien.
12. Spearman, C., *The proof and measurement of association between two things*. *The American Journal of Psychology*, 1904. **15**(1): p. 72–101.
13. Tibshirani, R., *Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso*. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1996. **58**(1): p. 267–288.
14. Burmister, D.M., *The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I*. *Journal of Applied Physics*, 1945. **16**(2): p. 89–94.
15. Österreich, R., *Straßenverkehrsordnung 1960 idgF*. 1960: Österreich.