



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transport, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Auslotung Grenzbereich RC-Asphaltgranulat-Einsatz in den AC EME 22 C1/C2

**Limites d'utilisation des agrégats d'enrobés dans les
enrobés AC EME 22 C1/C2**

Limits of use of reclaimed asphalt in AC EME 22 C1/C2

IMP Bautest AG

Christian Angst, Dr., dipl. Ing. ETH
Nicolas Bueche, Dr. ès sc Ing. EPF
Martin Dressler, Dr.-Ing.
Pietro Luraschi, MSc Erdw. ETH

Nibuxs

Mehdi Ould Henia, Dr. ès sc Ing. EPF

Infralab

Pascal Bauer, dipl. DES Sc Phys., DUT

**Forschungsprojekt VSS 2018/329 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen
ASTRA**

Dezember 2025 | 1812

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Auslotung Grenzbereich RC-Asphaltgranulat-Einsatz in den AC EME 22 C1/C2

**Limites d'utilisation des agrégats d'enrobés dans les
enrobés AC EME 22 C1/C2**

Limits of use of reclaimed asphalt in AC EME 22 C1/C2

IMP Bautech AG

Christian Angst, Dr., dipl. Ing. ETH

Nicolas Bueche, Dr. ès sc Ing. EPF

Martin Dressler, Dr.-Ing.

Pietro Luraschi, MSc Erdw. ETH

Nibuxs

Mehdi Ould Henia, Dr. ès sc Ing. EPF

Infralab

Pascal Bauer, dipl. DES Sc Phys., DUT

**Forschungsprojekt VSS 2018/329 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen
ASTRA**

Dezember 2025 | 1812

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Christian Angst, IMP

Mitglieder

Martin Dressler, IMP

Pietro Luraschi, IMP

Nicolas Bueche, IMP

Mehdi Ould Henia, Nibuxs

Pascal Bauer, Infralab

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Hans-Peter Bucheli

Mitglieder

Thomas Arn

Dieter Fux

Yvan Ramel

Andreas Schmid

Felix Solcà

Fabian Traber

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
<https://www.mobilityplatform.ch/>
heruntergeladen werden.

Dezember 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung.....	11
Résumé	17
Summary	23
1 Einführung	29
1.1 Problembeschreibung.....	29
1.2 Stand der Forschung	30
1.2.1 Asphaltmischgut mit hohem Anteil RAP; Grundlagen und offene Fragen.....	30
1.2.2 EME-Mischgut und Asphaltgranulat.....	31
1.3 Projektziele	31
1.4 Vorgehen, Methodik	32
1.4.1 TP 1 Einfluss vollständiger und teilweise runder Körner	32
1.4.2 TP 2 Einfluss von Zusätzen.....	32
1.4.3 TP 3 Andere, potentiell kritische Eigenschaften	32
1.4.4 TP4 Alternative Prüfmethoden.....	33
2 Methoden und Baustoffe	35
2.1 Methoden.....	35
2.2 Baustoffe.....	35
2.2.1 Gesteinskörnungen.....	35
2.2.2 Asphaltgranulat	36
2.2.3 Bindemittel	37
3 TP 1 Einfluss vollständiger und teilweise runder Körner	39
3.1 Vorgehen, Methodik	39
3.2 Modellierung von bituminösen Mischungen.....	39
3.2.1 Theoretische Rezeptierung von Asphaltmischungen	39
3.2.2 Software PradoWeb	39
3.2.3 Ergebnisse.....	42
3.2.4 Fazit	44
3.3 Einfluss Anteil gebrochener Körner	45
3.3.1 Herstellung von Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10	45
3.3.2 Herstellung der Asphalt-Mischungen	48
3.3.3 Untersuchungsergebnisse.....	50

3.4	Einfluss der Mischzeit.....	52
3.5	Einfluss der Zugabemenge an RAP.....	53
4	TP 2 Einfluss diverser Zusätze	57
4.1	Vorgehen, Methodik.....	57
4.2	Wahl der Zusätze / Bindemittel	57
4.3	Rezepturen der untersuchten Mischungen.....	59
4.3.1	Wahl der EME Sorte	59
4.3.2	Rezepturen der Mischungen	59
4.3.3	Mischgutherstellung und Kontrolle	60
4.4	Steifigkeit und Ermüdung.....	61
5	TP 3 Andere potenziell kritische Eigenschaften	65
5.1	Vorgehen, Methodik.....	65
5.2	Einaxialer Druck-Schwellversuch (DSV)	66
5.2.1	Definition neuer Prüfbedingungen	66
5.2.2	Validierung der neuen Prüfbedingungen.....	69
5.2.3	Ergebnisse des DSV mit den neuen Prüfbedingungen.....	72
5.3	Bruchzähigkeit; Semi Circular Bending Test (SCB).....	73
5.3.1	Das Prüfverfahren	73
5.3.2	Ergebnisse des SCB	76
6	TP4 Alternative Prüfmethoden zur Vorselektion.....	79
6.1	Vorgehen, Methodik.....	79
6.2	Ermüdung LAS.....	79
6.3	Bindemittel - Rheologie	82
6.4	E-Modul IT-CY.....	83
6.4.1	Die Ergebnisse.....	85
6.5	Diskussion.....	86
6.5.1	Vorselektion hinsichtlich Ermüdung	88
6.5.2	Vorselektion hinsichtlich Modul.....	88
7	Diskussion und Schlussfolgerungen	89
7.1	TP1 Einfluss der Anteil gebrochener Körner	89
7.1.1	Vorgehen und Methodik	89
7.1.2	Ergebnisse und Folgerungen.....	89
7.2	TP2 Einfluss diverser Zusätze	90
7.2.1	Vorgehen und Methodik	90
7.2.2	Ergebnisse und Folgerungen.....	91
7.3	TP3 Andere potentiell kritische Eigenschaften.....	91
7.3.1	Vorgehen und Methodik	91
7.3.2	Ergebnisse und Folgerungen.....	92
7.4	TP4 Methoden zur Vorselektion	93
7.4.1	Vorgehen und Methodik	93
7.4.2	Ergebnisse und Folgerungen.....	93
7.5	Schlussfolgerungen	94
7.6	Weiterer Handlungsbedarf	95
7.6.1	Normenwesen	95

7.6.2 Forschung	95
7.7 Dank	95
Literaturverzeichnis	97
Projektabschluss.....	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zitat aus SN EN 12697-26+A1	33
Abbildung 2: Korngrößenverteilung des verwendeten RAP	37
Abbildung 3: Verwendung von PradoWeb bei der theoretischen Formulierung von Asphaltmischgut (Quelle: BRRC).....	40
Abbildung 4: Spezifische Indikatoren, die für die Schätzung der Leistung von Asphaltgemischen erforderlich sind (Quelle: BRRC).....	40
Abbildung 5: Mischung der Gesteinskörnung (a) und die Mischung nach Zugabe des Bindemittels (b) (Quelle: BRRC)	41
Abbildung 6: Einfluss der Kornform der Gesteinskörnungen auf die Hohlräume in der Mischung der Gesteinskörnungen (Quelle: BRRC)	42
Abbildung 7: Beispiel für die Korngrößenverteilung der einzelnen Gesteinskörnungen und des resultierenden Gemisches	43
Abbildung 8: Soll-Siebsummenkurve (rot) der im Labor hergestellten Mischungen AC EME C2; schwarz gestrichelt ist der in der Norm SN EN 13108-1 festgelegte Sollwert-Bereich dargestellt.	50
Abbildung 9: Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen inkl. Vertrauensbereich (± 5) ..	52
Abbildung 10: Typische Korngrößenverteilung KGV der untersuchten Mischungen AC EME C1	60
Abbildung 11: Vergleich des DSV mit dem Spurrinntest bei gleichen Mischgutproben (Quelle: Angst 2006).....	66
Abbildung 12: Typische Verformungskurve im Druckschwellversuch (Quelle: imp Bauwissen; Mpdul 3).....	68
Abbildung 13: Belastungszyklen und fiktives Prüfergebnis für die Bestimmung des Verformungswiderstandes von Asphalt (Quelle: in Anlehnung an Radenberg et al 2024)	68
Abbildung 14: Grafische Darstellung des Vergleichs neuer zu alten Beanspruchungszyklen.....	69
Abbildung 15: Beispiel für die Prüfanordnung der SCB-Prüfung (Quelle IMP)	74
Abbildung 16: Arbeitsschritte zur Herstellung der Probekörper (Quelle: IMP)	74
Abbildung 17: Die Auswertung gem. SN EN berücksichtigt zur Berechnung der Bruchzähigkeit die maximale Kraft.	75
Abbildung 18: alternative Auswertung unter Berücksichtigung der Brucharbeit ...	76
Abbildung 19: Kornbrechender Riss bei einer Prüftemperatur von + 15 °C (Quelle IMP)	76
Abbildung 20: Grafische Darstellung der Prüfergebnisse der SCB-Prüfung bei + 15 °C.....	77
Abbildung 21: Kraft-/Deformationskurve beim LAS (Quelle imp).....	80
Abbildung 22: Korrelation zwischen der Ermüdung am Mischgut-Probekörper (2PB-TR) und am rückgewonnenen Bindemittel (LAS)	82
Abbildung 23: Beispiel für die Prüfeinrichtung (Quelle: SN EN 12697-26)	84
Abbildung 24: Ergebnisse der untersuchten Mischungen (orange) vor dem Hintergrund der Erfahrungswerte des IMP (Quelle: imp)	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Projekt verwendete Prüfmethoden	35
Tabelle 2: Ergebnisse der Siebanalysen der verwendeten Gesteinskörnungen	36
Tabelle 3: Eigenschaften des verwendeten Asphaltgranulates RAP	36
Tabelle 4: Zusammenfassung mittels PradoWeb berechneten theoretischen Asphaltmischungen	44
Tabelle 5: Grobe Übersicht über die Eigenschaften des RAP in der Schweiz	45
Tabelle 6: Anforderungen der EN 13043 an den Anteil gebrochener Körner	46
Tabelle 7: Mögliche Zusammensetzungen der Gesteinskörnungen innerhalb der Kategorie C 70/10	46
Tabelle 8: Festlegung der Zusammensetzung der Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10 für die Modell-Mischungen ohne RAP	47
Tabelle 9: Prinzip der Rezeptierung, um ein Mischgut mit Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10 zu erhalten. Die gebrochenen und der runden Körner wurden von einer Aufbereitungsanlage beschafft, die teilweise gebrochenen Körner im Labor aus gebrochenen Körnern hergestellt.	48
Tabelle 10: Zusammensetzung der Gesteinskörner der Mischungen AC EME 22 C2 K1 bis K4 und K 10.	49
Tabelle 11: Untersuchungsergebnisse der Mischungen AC EME C2 (Penetration am rückgewonnenen Bindemittel)	50
Tabelle 12: Ergebnisse der beiden Mischungen AC EME C2 mit unterschiedlichen Mischzeiten; K5 40 Sekunden / K6 200 Sekunden	53
Tabelle 13: Zusammensetzung und Untersuchungsergebnisse der Mischungen K7 und K8 sowie Gegenüberstellung zu den Anforderungen der SN EN 13108-1.	54
Tabelle 14: Wahl der Zusätze und Bindemittel für die 7 EME-Mischungen	57
Tabelle 15: Eigenschaften des PmB HM I	58
Tabelle 16: Eigenschaften des PmB HM II	58
Tabelle 17: Rezepturen und Mischgutuntersuchungen des im Labor gemischten Mischgutes	60
Tabelle 18: Ergebnisse der Bestimmung der Steifigkeit (Modul) und des Ermüdungsverhaltens	62
Tabelle 19: Vergleich der normierten mit den modifizierten Prüfbedingungen	69
Tabelle 20: Ergebnisse der Prüfungen mit den verlängerten Belastungszyklen bei zwei verschiedenen Temperaturen	70
Tabelle 21: Vergleich der Ergebnisse der neuen mit der bisherigen Prüfmethode ...	71
Tabelle 22: Ergebnisse des modifizierten DSV an den Proben mit Zusätzen	72
Tabelle 23: Ergebnisse der SCB Prüfung; Mittelwerte aus 4 Prüfungen	77
Tabelle 24: Ergebnisse der LAS-Prüfungen an den rückgewonnenen Bindemitteln; die Prüftemperatur lag bei 25 °C	80
Tabelle 25: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen am Mischgut (2PB-TR; SN EN 12697-24) und den Ergebnissen der LAS-Prüfung am rückgewonnenen Bindemittel.	81
Tabelle 26: Ergebnisse der rheologischen Messungen an den rückgewonnenen Bindemitteln	83

Tabelle 27: Gegenüberstellung der durch zwei unterschiedliche Prüfverfahren ermittelten Steifigkeit.....	85
Tabelle 28: Linearer Korrelationskoeffizient verschiedener Gegenüberstellungen zweier Prüfmethoden	87
Tabelle 29: Vergleich der minimalen, theoretischen Bearbeitungsdauer im Labor der Prüfverfahren IT-CY und 2PB-TR.....	88

Abkürzungsverzeichnis

ASTRA	Bundesamt für Strassenbau
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BTSV	Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren
DSR	Dynamisches Scher-Rheometer
DSV	Einaxialer Druck-Schwellversuch gemäss EN 12697-25
EN	Europäische Norm
IT-CY	Spaltzugversuch an Zylindrischem Probekörper gemäss SN EN 12697-26
KGv	Korngrössenverteilung
LAS	Linear Amplitude Sweep Analysis; LAS gemäss AASHTO T 391-20
MPa	Mega Pascal
MPK	Marshall-Prüfkörper
N	Newton
2PB-TR	2-Punkt-Biegeversuch an Trapezförmigen Probekörpern gemäss SN EN 12697-24 und 12697-26
PK	Prüfkörper
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement: die SN-EN 13108-8 [2] (2019) verwendet den Begriff «Ausbauasphalt (Reclaimed Asphalt RA)». In den letzten Jahren hat sich die Abkürzung RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) in der internationalen Literatur durchgesetzt; wir verwenden daher in diesem Bericht die Abkürzung RAP.
S	Sekunde
SCB	Semi Circular Bendingtest gem. EN 12697-44
SHRP	Strategic Highway Research Program
SN	Schweizer Norm
TP	Technische Prüfvorschrift
VSS	Verband Schweizer Strassenbauer

Zusammenfassung

Problembeschreibung:

Die EME-Mischgutsorten gehören heute sowohl beim ASTRA, als auch bei den meisten kantonalen Richtlinien zu den Standardaufbauten bei schwerbeanspruchten Objekten. Im Sinne der Wiederverwendung und der Schliessung der Materialkreisläufe, werden auch bei den EME-Mischgutsorten hohe Dosierungen an Asphaltgranulat AG angestrebt. Wie weit diese Dosierung gehen kann, ohne die typischen Eigenschaften der EME-Beläge negativ zu beeinflussen, ist heute noch zu wenig bekannt.

Bei der letzten Überarbeitung der SN EN 13108-1 im Jahr 2022 wurde die maximal zulässige Dosierung an Ausbauasphalt (Warmzugabe) von 30 auf 60 Masse-% erhöht. Diese Erhöhung erfolgte einerseits auf Druck der Bauindustrie, andererseits auf der Basis einzelner, positiver Erfahrungen. Eine systematische Untersuchung des maximal möglichen Anteils an Ausbauasphalt in einem EME-Mischgut fehlt nach wie vor.

Es besteht Klärungsbedarf bezüglich der Anforderungen, denn es ist klar, dass die heutigen Anforderungen an die Gesteinskörnungen für EME (C90/1) mit hohen Anteilen RAP nicht eingehalten werden können.

Projektziele:

Das Ziel des Projektes besteht darin, eine grössere Prozesssicherheit bei der Zugabe von Asphaltgranulat RAP bei den EME-Mischgutsorten zu erreichen. Das Projekt soll die Grenzen der Beimischung von RAP festlegen und Lösungen zur Anwendung von Recycling-Asphalt aufzeigen.

Vorgehen und Methodik:

Das Projekt wurde in einzelne Teilprojekte TP gegliedert.

- TP 1 Einfluss vollständiger und teilweise runder Körner.
Um Klarheit darüber zu erlangen, ob bei höheren Zugabemengen an RAP die runden Gesteinskörnungen das Gebrauchsverhalten beeinflussen, wird der Einfluss dieser runden/teilweise runden Gesteinskörnungen auf die mechanischen Eigenschaften untersucht.
- TP 2 Einfluss von Zusätzen
Das Bindemittel eines RAP ist in der Regel weicher als das Zielbitumen eines EME-Mischgutes. Infolge der anvisierten, hohen Dosierung an RAP, verbleiben geringe Mengen an frisch zudosiertem Hart-Bitumen, mit welchem das zu weiche Bitumen des RAP korrigiert werden kann. Mit der Verwendung entsprechender Zusätze ist es möglich, eine Verhärtung des Bitumengemisches (Bitumen aus RAP und frisch zudosiertes Bitumen) zu erreichen. Daher wird der Einfluss diverser Zusätze untersucht; nicht nur bezüglich der Verhärtung des Bitumengemisches, sondern insbesondere auch bezüglich der mechanischen Eigenschaften des EME-Mischgutes.
- TP3 Andere, potentiell kritische Eigenschaften
Da die typischen Prüfungen der EME-Mischungen bei mittleren Temperaturen

stattfinden (E-Modul bei 15 °C / Ermüdung bei 10 °C) ist es naheliegend das Verhalten bei hohen und tiefen Temperaturen als «potentiell kritische Eigenschaft» zu untersuchen. Das Kälteverhalten wird in diesem Projekt bewusst ausgeklammert, da zu diesem Thema ein separates Forschungsprojekt [Angst, in Bearbeitung] in Arbeit ist. Zudem wurde die Rissfortpflanzung als kritische Eigenschaft bezeichnet.

- **TP 4 Alternative Prüfmethoden zur Vorselektion**

Die beiden in der Norm festgelegten Prüfverfahren zur Bestimmung des Moduls sowie der Ermüdungseigenschaften sind aufwendig und zeitraubend, was auch dazu geführt hat, dass in der Schweiz nur 2 Prüfstellen diese Prüfungen durchführen. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen daher alternative (schnellere und kostengünstigere) Prüfmethoden evaluiert werden.

Das Problem ist nicht die Suche nach einer schnelleren Prüfmethode zur normierten Bestimmung des Moduls und der Ermüdungseigenschaften, sondern nach einer schnellen Methode, mit welcher grob geschätzt werden kann, ob das zu prüfende Mischgut gute Chancen hat, die aufwändigen Prüfungen 2 PB-TR zu bestehen. Dabei muss zwischen Modul und Ermüdung unterschieden werden:

Ermüdung:

Aufgrund des heutigen Erkenntnisstandes muss davon ausgegangen werden, dass zwischen den verschiedenen Prüfungen zur Bestimmung der Ermüdungseigenschaften keine genügende Korrelation besteht. [Benedetto 2004].

Es dürfte kaum möglich sein, eine mechanische Prüfung am Mischgut festzulegen, mit welcher bezüglich des Ermüdungsverhalten eine Vorselektion erfolgen kann. Da das Ermüdungsverhalten sehr von den Eigenschaften des Bindemittels abhängt, wurde untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen der Rheologie der rückgewonnenen Bindemittel und dem Ermüdungsverhalten des Asphaltes gibt.

Modul:

Erfahrungsgemäss besteht zwischen den diversen Prüfmethoden zur Bestimmung des Moduls eine Korrelation. Werte aus der Literatur und eigene Untersuchungen der Forschungsstellen (ehemals LAVOC, IMP) mit der Bestimmung des E-Moduls mittel IT-CY (dynamischer Spaltzugversuch) sollen ausgewertet und eingebracht werden.

TP 1 Einfluss vollständiger und teilweise runder Körner

Um den Einfluss der Kornform auf die mechanischen Eigenschaften der AC EME-Mischgüter zu ermitteln, wurden Modell-Mischungen ohne RAP im Labor hergestellt, bei denen die Anteile teilweise gebrochener, vollständig gebrochener und vollständig runder Körner gezielt variiert wurden.

Zudem wurde eine Software verwendet, mit welcher Mischgutrezepte optimiert werden können. Gemäss vorliegenden Informationen sollten mit dieser Software auch die mechanischen Eigenschaften modelliert werden können.

Das Hauptziel des digitalen Designs von Asphaltmischgut ist es, den Prozess der Entwicklung von Asphaltrezepturen zu optimieren, indem der empirische Anteil der Arbeit, der aus zeit- und kostenintensiven Labortests besteht, verringert wird. Der Vorteil des Einsatzes einer Software wie «PradoWeb» zur Unterstützung der Rezeptur besteht darin, dass mehrere Iterationen bei der Suche nach der optimalen Mischung

durchgeführt werden können und die Anzahl der Tests zur Überprüfung der endgültigen Eigenschaften minimiert wird.

PradoWeb, ein Akronym für „Programm for Road Asphalt Design and Optimisation - Web-version“, ist eine Software für das theoretische Design von Asphaltmischungen, die vom belgischen Strassenforschungszentrum BRRC entwickelt wurde.

Leider konnten die mechanischen Eigenschaften der im Rahmen der SN verwendeten EME-Mischungen mit der belgischen Software – trotz Kontaktnahme und intensiven Gesprächen mit den Entwickler - nicht modelliert werden.

Als EME-Mischung wurde der Typ C2 gewählt, da bei diesem Typ die Norm höhere Anforderungen an das komplexe Modul und die Ermüdungseigenschaften fordert, als beim Typ C1.

Mit einer Umfrage bei verschiedenen Asphaltwerken wurden Informationen zur heutigen Qualität des RAP gesammelt. Es konnte festgestellt werden, dass in der Schweiz die Gesteinskörner des RAP der Kategorie C 70/10 entsprechen.

Aus den Untersuchungsergebnissen an Mischungen mit unterschiedlichen Kategorien der Gesteine (C 90/1 bis C 50/50) konnten untenstehende Folgerungen gezogen werden:

- Innerhalb des in der Praxis zu erwartenden Anteils an gebrochenen Körnern in einem EME-Mischgut mit hohem Anteil an RAP, hat die Kornform keinen relevanten Einfluss auf das gemäss SN EN 12697-24 bestimmte komplexe Modul und auf den Widerstand gegen Ermüdung (SN EN 12697-26).
- Bei deutlich höheren Anteilen an Rundkorn (50 %) macht sich die Kornform bemerkbar, allerdings in relativ geringem Ausmass. Im Vergleich zur Mischung mit Gesteinskörnungen C90/1 liegt das Modul bei der Mischung mit C50/50 um ca. 15 % tiefer; die Mikrodehnung um ca. 5 % tiefer.
- Es scheint keine Rolle zu spielen, ob die eher runden Körner (C 70/10) in der feinen Fraktion < 8mm oder in der groben Fraktion > 8 mm enthalten sind.

Grundsätzlich erstaunt die Erkenntnis, dass die Kornform einen sehr geringen Einfluss auf das komplexe Modul hat. Diese Folgerung ist nicht allgemeingültig, es sind folgende Punkte besonders zu beachten:

- Es wurden Gesteinskörnungen untersucht, welche in der Schweiz üblicherweise im RAP vorkommen; diese entsprechen der Kategorie C70/10. Es wurde nicht systematisch untersucht, ob grössere Anteile an runden und teilweise runden Körnern das Modul beeinflussen, da diese Fragestellung für die Praxis nicht relevant ist.
- Das Modul wird bei 15 °C bestimmt. Diese Belastung entspricht nicht den Gegebenheiten bei sommerlichen Temperaturen. Aus der Aussage, die Kornform würde das Modul wenig beeinflussen, kann nicht gefolgert werden, dass das Wärmeverhalten nicht beeinflusst würde.

TP 2 Einfluss von Zusätzen

Neben der Referenzmischung AC EME C1 mit 70 % RAP und B 10/20 wurden 6 weitere Mischungen untersucht:

- 2 unterschiedliche PmB HM
- 2 unterschiedliche Additive
- 1 Naturasphalt
- 1 Gummigranulat

Zusätzlich zur Steifigkeit (Modul) und dem Ermüdungsverhalten wurde auch das Wärmeverhalten untersucht, indem ein modifizierter Druck-Schwellversuch (aus TP3) an 6 der 7 oben aufgeführten Mischgutproben durchgeführt wurde. Leider konnten aus Gründen des Materialmangels nicht alle 7 Proben untersucht werden.

Aus den Untersuchungsergebnissen sind folgende Punkte festzuhalten:

- Alle Mischungen erfüllen die Anforderung der Norm bezüglich des Moduls und Ermüdungsverhalten für die Mischgutsorte AC EME C1. Ausser einer Mischung (K14, Additiv I) werden auch die strengeren Anforderungen für den EME-Typ C2 erfüllt.
- Die Tendenz, dass hohe Module mit niedrigen Ermüdungswerte einhergehen, wird bestätigt. So weisen zum Beispiel die Mischungen K10 und K11 die höchsten Module aus und gehören gleichzeitig zur Gruppe der niedrigsten Ermüdungswerte (Mikrodehnung).
- K 9 (PmB HM I) fällt mit einem sehr hohen Ermüdungswert und einem Modul deutlich oberhalb der Norm-Anforderungen auf. Dies zeigt, dass es möglich ist, die allgemeine Tendenz (hohes Modul/tiefe Ermüdungswerte) mit entsprechender Modifizierung zu durchbrechen und Mischgut herzustellen, welches mit hohem Modul sehr gute Ermüdungswerte zeigt.
- Mittels modifiziertem Druck-Schwellversuch DSV konnte das Wärmeverhalten angesprochen werden. Dabei zeigte das Mischgut mit reinem B 10/20 schlechtere Werte als alle weiteren Mischungen mit Zusätzen. Bemerkenswert ist, dass das EME mit PmB HM II die besten Resultate zeigte; die übrigen Mischungen lagen nahe beieinander.
- Da je nach Verwendung einer EME-Schicht mehr Wert auf die Steifigkeit oder auf den Widerstand gegenüber Ermüdung gelegt wird, kann keine generell gültige Gesamtbeurteilung durchgeführt werden. An dieser Stelle sei der Hinweis angebracht, dass allzu hohe Steifigkeitswerte im Hinblick auf das Kälteverhalten möglicherweise problematisch sein können.
- Es kann festgehalten werden, dass PmB und Zusätze auch EME-Mischgut mit bereits guten Werten noch weiter verbessern können.

TP3 Andere, potentiell kritische Eigenschaften

Die bei EME-Mischgut normierten Prüfungen der Steifigkeit und des Ermüdungsverhaltens vermögen es nicht das Praxisverhalten vollumfänglich abzubilden, denn sie liefern keine Hinweise zu folgenden Themen:

- Verhalten bei hohen Temperaturen:
Da beide normierten Prüfverfahren (Modul/Ermüdung) bei Temperaturen von +15 bzw. +10 °C durchgeführt werden, kann das Wärmeverhalten von EME-Belägen mit diesen Prüfverfahren nicht abgebildet werden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der bei Typprüfungen geforderte Spurbildungstest keine aussagekräftigen Ergebnisse liefert.

In Anlehnung an [Radenberg M., et al (2024)] wurden die Prüfbedingungen beim Druck-Schwellversuch verschärft, indem die Prüftemperatur von 50 auf 60 °C erhöht und die Belastungszyklen verlängert wurden. In einer Vergleichsuntersuchung alte/neue Prüfbedingungen wurde die deutlich verbesserte Aussagekraft an 11 unterschiedlichen Mischgutsorten nachgewiesen.

- Rissfortpflanzung:
Die Entstehung eines Risses wird in der Prüfung des Ermüdungsverhaltens angesprochen. Der Widerstand eines Belages gegenüber der Ausbreitung eines bereits entstandenen Risses wurde bei EME-Belägen noch nicht untersucht. Zu diesem Zweck wurde der Halbkreisbiegeversuch SCB (Semi Circular Bendingtest) angewendet.
Eine deutliche Differenzierung zwischen den verschiedenen Mischungen konnte mit der SCB-Prüfung bei 15 °C nicht erreicht werden. Möglicherweise liegt dies darin begründet, dass der Anteil RAP mit 70 % in allen Mischungen eine Differenzierung verunmöglichte. Die Ergebnisse schliessen nicht aus, dass bei anderen Prüftemperaturen eine bessere Spreizung der Ergebnisse zu erreichen wäre.

TP4 Alternative Prüfmethode zur Vorselektion

Um eine alternative Prüfmethode am Bindemittel (aus dem Mischgut rückgewonnen) zu finden, mit welcher eine Aussage zum Ermüdungsverhalten des Mischgutes möglich wäre, wurden folgende rheologische Kennwerte bestimmt:

- komplexer Schermodul G^* bei 60 °C; Phasenwinkel δ bei 60 °C; $G^*/\sin \delta$
- BTSV-Kennwerte T_{BTSV} und δ_{BTSV}
- LAS – Ermüdung

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten der einzelnen Bindemittel-Prüfungen zur Ermüdung am Asphalt-Probekörper 2PB-TR ergab Werte zwischen 0.01 und 0.32, es besteht somit keine Korrelation. Obwohl die Anzahl der Wertepaare mit 5 klein ist, kann festgehalten werden, dass keine der angewendeten rheologischen Messungen zur Vorselektion hinsichtlich der Ermüdungsprüfung verwendet werden kann.

Die Prüfung IT-CY wurde als brauchbare alternative Prüfmethode zur Bestimmung des Moduls erkannt. Zwischen den beiden Prüfungen IT-CY und 2PB-TR besteht eine recht gute Korrelation. Für die im Rahmen des Projektes untersuchten 5 Wertepaare beträgt R^2 0.75. Aus der laborinternen Statistik des IMP sind 34 Wertepaare bekannt, welche einen Wert R^2 von 0.48 ausweisen. Dass dieser Wert – trotz der grösseren Anzahl

Wertepaare – tiefer liegt, ist darauf zurückzuführen, dass in der Statistik auch Ergebnisse anderer Labors eingeflossen sind.

Da die Module IT-CY generell tiefer liegen als die Module 2PB-TR, entsteht eine «Sicherheitsreserve» welche zu folgendem pragmatischen Ansatz führt: Erfüllt ein Mischgut die Anforderungen an das Modul in der IT-CY-Prüfung, wird es mit grosser Wahrscheinlichkeit die Anforderungen auch in der normierten Prüfung 2PB-TR erfüllen.

Der Nutzen einer Vorselektion mittels IT-CY ist vor allem in jenen Fällen gross, bei denen ein Termindruck besteht, denn die IT-CY-Prüfung ist 4 bis 5 Mal schneller.

Schlussfolgerungen:

Für das in der Schweiz üblicherweise verwendete RAP gibt es für EME-Mischungen bezüglich des Anteils gebrochener Körner keine Begrenzung der zudosierten Menge.

Die Anforderungen an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sind (Kategorie C90/1) sehr streng und können bei der Verwendung von RAP nicht eingehalten werden. Das Projekt hat aufgezeigt, dass die EME-typischen Anforderungen Modul und Ermüdung auch mit Gesteinskörnungen der Kategorie C70/10 erfüllt werden können. Auch das Wärmeverhalten – mittels DSV untersucht - kann mit Gesteinskörnungen C70/10 problemlos sichergestellt werden, wenn PmB oder Zusätze verwendet werden. Die Anforderungen der heutigen SN EN 13043 [SN 670 103b; EN 13043: 2002 / AC 2004] an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sollten überprüft werden.

Es kann festgehalten werden, dass PmB und Zusätze auch EME-Mischgut mit bereits guten Werten noch weiter verbessern können.

Zur Prüfung des Verhaltens bei sommerlichen Temperaturen wurde der Druck-Schwellversuch mit Erfolg derart modifiziert, dass aussagekräftige Ergebnisse auch bei hochstandfesten Mischgutsorten möglich wurden.

Die Ergebnisse der SCB-Prüfung zur Beurteilung des Widerstandes gegenüber der Rissfortpflanzung waren nicht sehr ergiebig. Zu diesem Thema sind weitere Arbeiten erforderlich.

Mit rheologischen Prüfungen am rückgewonnenen Bindemittel konnte keine Korrelation zu den Ergebnissen der Ermüdungsversuche 2PB-TR gefunden werden.

Für die Bestimmung des Moduls steht mit der Prüfung IT-CY eine recht verlässliche, schnellere alternative Prüfmethode zur Verfügung.

Résumé

Description du problème :

Les types d'enrobés EME font aujourd'hui partie des structures standard pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations, tant dans les directives de l'OFROU que dans la plupart des directives cantonales. Dans un souci de réutilisation et de bouclage des cycles de matériaux, on vise également à utiliser des doses élevées de granulats d'asphalte RAP dans les enrobés EME. On ne sait pas encore très bien jusqu'où ces doses peuvent aller sans nuire aux propriétés typiques des revêtements EME.

Lors de la dernière révision de la norme SN EN 13108-1 en 2022, le dosage maximal autorisé de granulats d'enrobés (ajout à chaud) a été augmenté de 30 à 60 % en masse. Cette augmentation a été motivée d'une part par la pression exercée par l'industrie de la construction et d'autre part par des expériences individuelles positives. Une étude systématique de la proportion maximale possible de granulats d'enrobés dans un EME fait toujours défaut.

Les exigences doivent être clarifiées, car il est évident que les exigences actuelles relatives aux granulats pour EME (C90/1) ne peuvent être respectées avec des proportions élevées de RAP.

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est d'améliorer la sécurité du processus lors de l'ajout de granulats d'enrobés RAP dans les types d'enrobés EME. Le projet vise à définir les limites de l'ajout de RAP et à proposer des solutions pour l'utilisation d'asphalte recyclé.

Approche et méthodologie :

Le projet a été divisé en plusieurs sous-projets (TP).

- TP 1 Influence des granulats entièrement ou partiellement ronds.
Afin de déterminer clairement si les granulats ronds influencent le comportement à l'usage lorsque les quantités de RAP ajoutées sont plus importantes, l'influence de ces granulats ronds/partiellement ronds sur les propriétés mécaniques est étudiée.
- TP 2 Influence des additifs
Le liant d'un RAP est généralement plus mou que le bitume cible d'un enrobé EME. En raison du dosage élevé prévu de RAP, il reste de faibles quantités de bitume dur fraîchement ajouté, qui permettent de corriger le bitume trop mou du RAP. L'utilisation d'additifs appropriés permet d'obtenir un durcissement du mélange bitumineux (bitume provenant du RAP et bitume fraîchement ajouté). C'est pourquoi l'influence de divers additifs est étudiée, non seulement en ce qui concerne le durcissement du mélange bitumineux, mais aussi et surtout en ce qui concerne les propriétés mécaniques du mélange EME.
- TP3 Autres propriétés potentiellement critiques
Étant donné que les essais typiques des mélanges EME sont effectués à des températures moyennes (module d'élasticité à 15 °C / fatigue à 10 °C), il est logique

d'étudier le comportement à des températures élevées et basses en tant que « propriété potentiellement critique ». Le comportement à froid est délibérément exclu de ce projet, car un projet de recherche distinct [Angst, en cours] est en cours sur ce sujet. En outre, la propagation des fissures a été désignée comme une propriété critique.

- **TP 4 Méthodes d'essai alternatives pour la présélection**

Les deux méthodes d'essai définies dans la norme pour déterminer le module et les propriétés de fatigue sont complexes et prennent beaucoup de temps, ce qui a conduit à ce que seuls deux laboratoires d'essai effectuent ces essais en Suisse. Dans le cadre du projet de recherche, des méthodes d'essai alternatives (plus rapides et moins coûteuses) doivent donc être évaluées.

Le problème n'est pas de trouver une méthode d'essai plus rapide pour la détermination normalisée du module et des propriétés de fatigue, mais une méthode rapide permettant d'estimer grossièrement si l'enrobé à tester a de bonnes chances de passer les essais complexes 2 PB-TR. Il convient ici de faire la distinction entre le module et la fatigue :

Fatigue :

Sur la base des connaissances actuelles, il faut partir du principe qu'il n'existe pas de corrélation suffisante entre les différents essais visant à déterminer les propriétés de fatigue [Benedetto 2004].

Il semble pratiquement impossible de définir un essai mécanique sur le mélange permettant d'effectuer une présélection en fonction du comportement à la fatigue.

Comme le comportement à la fatigue dépend fortement des propriétés du liant, on a cherché à savoir s'il existait un lien entre la rhéologie des liants récupérés et le comportement à la fatigue de l'asphalte.

Module :

L'expérience montre qu'il existe une corrélation entre les différentes méthodes d'essai utilisées pour déterminer le module. Les valeurs issues de la littérature et des propres recherches des centres de recherche (anciennement LAVOC, IMP) avec la détermination du module d'élasticité au moyen du CIT-CY (essai dynamique de traction par fendage) doivent être évaluées et intégrées.

TP 1 Influence des granulats entiers et partiellement ronds

Afin de déterminer l'influence de la forme des granulats sur les propriétés mécaniques des enrobés AC EME, des mélanges modèles sans RAP ont été réalisés, dans lesquels les proportions de granulats partiellement concassés, entièrement concassés et entièrement ronds ont été variées de manière ciblée.

De plus, un logiciel permettant d'optimiser les formulations des enrobés a été utilisé. Selon les informations disponibles, ce logiciel devrait également permettre de modéliser les propriétés mécaniques.

L'objectif principal de la conception numérique des enrobés bitumineux est d'optimiser le processus de développement des formulations d'enrobés en réduisant la part empirique du travail, qui consiste en des essais en laboratoire longs et coûteux. L'avantage d'utiliser un logiciel tel que « PradoWeb » pour aider à la formulation est qu'il permet

d'effectuer plusieurs itérations dans la recherche du mélange optimal et de minimiser le nombre de tests nécessaires pour vérifier les propriétés finales.

PradoWeb, acronyme de « Programm for Road Asphalt Design and Optimisation - Web-version », est un logiciel de conception théorique de mélanges bitumineux développé par le Centre de recherche routière belge BRRC.

Malheureusement, malgré des contacts et des discussions intensives avec les développeurs, les propriétés mécaniques des mélanges EME utilisés dans le cadre de la norme SN n'ont pas pu être modélisées avec le logiciel belge.

Le mélange EME de type C2 a été choisi, car pour ce type, la norme impose des exigences plus élevées en matière de module complexe et de propriétés de fatigue que pour le type C1.

Une enquête menée auprès de différentes usines d'enrobés a permis de recueillir des informations sur la qualité actuelle des RAP. Il a été constaté qu'en Suisse, les granulats des RAP correspondent à la catégorie C 70/10.

Les résultats des analyses effectuées sur des mélanges contenant différentes catégories de granulats (C 90/1 à C 50/50) ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Dans la proportion de granulats concassés attendue dans la pratique dans un enrobé EME à forte teneur en RAP, la forme des granulats n'a pas d'influence significative sur le module complexe déterminé selon la norme SN EN 12697-24 et sur la résistance à la fatigue (SN EN 12697-26).
- Lorsque la proportion de grains ronds est nettement plus élevée (50 %), la forme des grains a une influence notable, mais relativement faible. Par rapport au mélange avec des granulats C90/1, le module du mélange avec C50/50 est inférieur d'environ 15 % et la micro-allongement d'environ 5 %.
- Le fait que les grains plutôt ronds (C 70/10) se trouvent dans la fraction fine < 8 mm ou dans la fraction grossière > 8 mm ne semble pas avoir d'importance.

Il est surprenant de constater que la forme des grains a une influence très faible sur le module complexe. Cette conclusion n'est pas universelle, il convient de tenir compte des points suivants :

- Les granulats étudiés sont ceux que l'on trouve habituellement dans les RAP en Suisse ; ils correspondent à la catégorie C70/10. Il n'a pas été systématiquement étudié si des proportions plus importantes de grains ronds et partiellement ronds influencent le module, car cette question n'est pas pertinente dans la pratique.
- Le module est déterminé à 15 °C. Cette charge ne correspond pas aux conditions climatiques estivales. L'affirmation selon laquelle la forme des grains aurait peu d'influence sur le module ne permet pas de conclure que le comportement à haute température ne serait pas influencé.

TP 2 Influence des additifs

Outre le mélange de référence AC EME C1 avec 70 % de RAP et B 10/20, 6 autres mélanges ont été étudiés :

- 2 PmB HM différents
- 2 additifs différents
- 1 asphalte naturel
- 1 granulat de caoutchouc

Outre la rigidité (module) et le comportement à la fatigue, le comportement à haute température a également été étudié en réalisant un essai de compression cycliques modifié (issu du TP3) sur 6 des 7 échantillons de mélange mentionnés ci-dessus. Malheureusement, en raison d'un manque de matériaux, les 7 échantillons n'ont pas tous pu être étudiés.

Les résultats de l'étude permettent de retenir les points suivants :

- Tous les mélanges satisfont aux exigences de la norme en matière de module et de comportement à la fatigue pour le type de mélange AC EME C1. À l'exception d'un mélange (K14, additif I), les exigences plus strictes pour le type EME C2 sont également satisfaites.
- La tendance selon laquelle des modules élevés s'accompagnent de faibles valeurs de fatigue est confirmée. Ainsi, les mélanges K10 et K11 présentent les modules les plus élevés et appartiennent en même temps au groupe des valeurs de fatigue les plus faibles (microallongement).
- Le K 9 (PmB HM I) se distingue par une valeur de fatigue très élevée et un module nettement supérieur aux exigences de la norme. Cela montre qu'il est possible de rompre avec la tendance générale (module élevé/faibles valeurs de fatigue) grâce à une modification appropriée et de produire un enrobé qui présente de très bonnes valeurs de fatigue avec un module élevé.
- Le comportement à haute température a pu être évalué à l'aide d'un essai compression cycliques DSV modifié. Le mélange avec du B 10/20 pur a présenté des valeurs moins bonnes que tous les autres mélanges avec additifs. Il est à noter que l'EME avec PmB HM II a obtenu les meilleurs résultats ; les autres mélanges étaient très proches les uns des autres.
- Étant donné que, selon l'utilisation d'une couche EME, l'accent est mis davantage sur la rigidité ou sur la résistance à la fatigue, il n'est pas possible de procéder à une évaluation globale valable de manière générale. Il convient de noter ici que des valeurs de rigidité trop élevées peuvent poser problème en ce qui concerne le comportement à froid.
- On peut retenir que le PmB et les additifs peuvent encore améliorer les enrobés EME qui présentent déjà de bonnes valeurs.

TP3 Autres propriétés potentiellement critiques

Les essais normalisés de rigidité et de comportement à la fatigue des enrobés EME ne permettent pas de refléter entièrement le comportement pratique, car ils ne fournissent aucune indication sur les points suivants :

- Comportement à des températures élevées :
Comme les deux méthodes d'essai (module et fatigue) sont réalisées à des températures de +15 et +10 °C, elles ne permettent pas de refléter le comportement à haute températures des revêtements EME. Il faut également tenir compte du fait que le test d'ornièr requis lors des épreuves de formulation ne fournit pas de résultats significatifs.

Sur la base de [Radenberg M., et al (2024)], les conditions de l'essai de compression cycliques ont été renforcées en augmentant la température d'essai de 50 à 60 °C et en prolongeant les cycles de charge. Une étude comparative entre les anciennes et les nouvelles conditions d'essai a démontré une amélioration significative de la pertinence pour 11 types de mélanges différents.

- Propagation des fissures :
La formation d'une fissure est abordée dans l'essai de comportement à la fatigue. La résistance d'un revêtement à la propagation d'une fissure déjà formée n'a pas encore été étudiée pour les revêtements EME. À cette fin, l'essai de flexion semi-circulaire SCB (Semi Circular Bendingtest) a été utilisé.
Le test SCB à 15 °C n'a pas permis d'obtenir une différenciation claire entre les différents enrobés. Cela s'explique peut-être par le fait que la proportion de RAP de 70 % dans tous les enrobés a rendu toute différenciation impossible. Les résultats n'excluent pas la possibilité d'obtenir une meilleure répartition des résultats à d'autres températures d'essai.

TP4 Méthode d'essai alternative pour la présélection

Afin de trouver une méthode d'essai alternative pour le liant (récupéré à partir du mélange) permettant d'évaluer le comportement à la fatigue du mélange, les paramètres rhéologiques suivants ont été déterminés :

- module de cisaillement complexe G^* à 60 °C ; angle de phase δ à 60 °C ; $G^*/\sin \delta$
- Caractéristiques BTSV T_{BTSV} et δ_{BTSV}
- LAS – Fatigue

Le calcul des coefficients de corrélation des différents essais de liant pour la fatigue sur l'échantillon d'asphalte 2PB-TR a donné des valeurs comprises entre 0,01 et 0,32, il n'y a donc pas de corrélation. Bien que le nombre de paires de valeurs soit faible (5), on peut affirmer qu'aucune des mesures rhéologiques utilisées ne peut être employée pour la présélection en vue de l'essai de fatigue.

L'essai IT-CY a été reconnu comme une méthode d'essai alternative utile pour déterminer le module. Il existe une assez bonne corrélation entre les deux essais IT-CY et 2PB-TR. Pour les 5 paires de valeurs examinées dans le cadre du projet, R^2 est égal à 0,75. Les statistiques internes du laboratoire IMP font état de 34 paires de valeurs présentant une valeur R^2 de 0,48. Le fait que cette valeur soit inférieure, malgré le nombre

plus important de paires de valeurs, s'explique par le fait que les statistiques incluent également les résultats d'autres laboratoires.

Comme les modules IT-CY sont généralement inférieurs aux modules 2PB-TR, il en résulte une « réserve de sécurité » qui conduit à l'approche pragmatique suivante : si un enrobé répond aux exigences du module dans le test IT-CY, il répondra très certainement aussi aux exigences du test normalisé 2PB-TR.

La présélection à l'aide d'IT-CY est particulièrement utile dans les cas où les délais sont serrés, car le contrôle IT-CY est 4 à 5 fois plus rapide.

Conclusions finales :

Pour le RAP couramment utilisé en Suisse, il n'y a pas de limite à la quantité ajoutée dans les mélanges EME en ce qui concerne la proportion de grains concassés.

Les exigences relatives aux granulats pour les enrobés EME (catégorie C90/1) sont très strictes et ne peuvent être respectées lors de l'utilisation de RAP. Le projet a montré que les exigences typiques des EME en matière de module et de fatigue peuvent également être satisfaites avec des granulats de la catégorie C70/10. Le comportement à haute température, testé à l'aide du DSV, peut également être garanti sans problème avec des granulats C70/10 si du PmB ou des additifs sont utilisés.

Les exigences de la norme actuelle SN EN 13043 [SN 670 103b ; EN 13043 : 2002 / AC 2004] relatives aux granulats pour les enrobés EME devraient être révisées.

On peut retenir que les PmB et les additifs peuvent encore améliorer les enrobés EME qui présentent déjà de bonnes valeurs.

Afin de tester le comportement à des températures estivales, l'essai de seuil de compression cycliques a été modifié avec succès de manière à obtenir des résultats significatifs, même avec des types d'enrobés à haute stabilité.

Les résultats de l'essai SCB visant à évaluer la résistance à la propagation des fissures n'ont pas été très concluants. Des travaux supplémentaires sont nécessaires sur ce sujet.

Les essais rhéologiques effectués sur le liant récupéré n'ont pas permis de trouver de corrélation avec les résultats des essais de fatigue 2PB-TR.

Pour déterminer le module, l'essai IT-CY constitue une méthode alternative assez fiable et plus rapide.

Summary

Problem description:

EME mix types are now standard for heavy-duty structures in both ASTRA and most cantonal guidelines. In the interests of reuse and closing material cycles, high dosages of asphalt granulate RAP are also being sought for EME mix types. The extent to which this dosage can be increased without negatively affecting the typical properties of EME pavements is still not sufficiently known.

In the latest revision of SN EN 13108-1 in 2022, the maximum permissible dosage of recycled asphalt (hot addition) was increased from 30 to 60 % by mass. This increase was made partly in response to pressure from the construction industry and partly on the basis of individual positive experiences. A systematic investigation of the maximum possible proportion of reclaimed asphalt in an EME mix is still lacking.

There is a need for clarification regarding the requirements, as it is clear that today's requirements for aggregates for EME (C90/1) with high proportions of RAP cannot be met.

Project objectives:

The aim of the project is to achieve greater process reliability when adding asphalt granulate RAP to EME mix types. The project aims to define the limits of RAP addition and identify solutions for the use of recycled asphalt.

Approach and methodology:

The project was divided into individual sub-projects (TP).

- TP 1 Influence of completely and partially round grains.
In order to clarify whether the round aggregates influence the performance of the material when higher quantities of RAP are added, the influence of these round/partially round aggregates on the mechanical properties is being investigated.
- TP 2 Influence of additives
The binder in RAP is generally softer than the target bitumen in an EME mix. As a result of the targeted high dosage of RAP, small amounts of freshly added hard bitumen remain, which can be used to correct the overly soft bitumen in the RAP. By using appropriate additives, it is possible to achieve hardening of the bitumen mixture (bitumen from RAP and freshly added bitumen). Therefore, the influence of various additives is being investigated, not only with regard to the hardening of the bitumen mixture, but also with regard to the mechanical properties of the EME mixture.
- TP3 Other potentially critical properties
Since the typical tests of EME mixtures are carried out at medium temperatures (modulus of elasticity at 15 °C / fatigue at 10 °C), it makes sense to investigate the behaviour at high and low temperatures as a 'potentially critical property'. Cold behaviour is deliberately excluded from this project, as a separate research project

[Angst, in progress] is currently aimed on this topic. In addition, crack propagation was identified as a critical property.

- **TP 4 Alternative test methods for pre-selection**

The two test methods specified in the standard for determining the modulus and fatigue properties are complex and time-consuming. This has led to only two testing laboratories in Switzerland performing these tests. The research project therefore aims to evaluate alternative (faster and more cost-effective) test methods.

The problem is not to find a faster test method for the standardised determination of the modulus and fatigue properties, but rather a quick method that can be used to roughly estimate whether the mix to be tested has a good chance of passing the complex 2 PB-TR tests. A distinction must be made between modulus and fatigue:

Fatigue:

Based on current knowledge, it must be assumed that there is insufficient correlation between the various tests used to determine fatigue properties [Benedetto 2004].

It is unlikely to one would able to define a mechanical test for the mixture that can be used to make a pre-selection with regard to fatigue behaviour.

Since fatigue behaviour is highly dependent on the properties of the binder, it was investigated whether there is a correlation between the rheology of the recovered binders and the fatigue behaviour of the asphalt.

Modulus:

Experience has shown that there is a correlation between the various test methods used to determine the modulus. Values from the literature and our own investigations at the research centres (formerly LAVOC, IMP) using the CIT-CY (dynamic split tensile test) to determine the modulus of elasticity are to be evaluated and included.

TP 1 Influence of complete and partially round grains

In order to determine the influence of grain shape on the mechanical properties of AC EME mixtures, model mixtures without RAP were produced in which the proportions of partially broken, completely broken and completely round grains were specifically varied.

In addition, a software programme was used to optimise mixture recipes. According to the information available, this software should also be able to model the mechanical properties.

The main objective of the digital design of asphalt mixes is to optimise the process of developing asphalt recipes by reducing the empirical part of the work, which consists of time-consuming and costly laboratory tests. The advantage of using software such as PradoWeb to support the formulation process is that multiple iterations can be carried out in the search for the optimal mix, minimising the number of tests required to verify the final properties.

PradoWeb, an acronym for 'Programme for Road Asphalt Design and Optimisation - Web version', is a software programme for the theoretical design of asphalt mixtures developed by the Belgian Road Research Centre (BRRC).

Unfortunately, despite contacting the developers and holding intensive discussions with them, it was not possible to model the mechanical properties of the EME mixtures used in the SN with the Belgian software.

Type C2 was chosen as the EME mixture because the standard places higher demands on the complex modulus and fatigue properties of this type than on type C1.

A survey of various asphalt plants was conducted to gather information on the current quality of RAP. It was found that in Switzerland, the aggregate grains of RAP correspond to category C 70/10.

The following conclusions were drawn from the test results on mixtures with different categories of aggregates (C 90/1 to C 50/50):

- Within the proportion of crushed grains to be expected in practice in an EME mixture with a high proportion of RAP, the grain shape has no relevant influence on the complex modulus determined in accordance with SN EN 12697-24 and on the resistance to fatigue (SN EN 12697-26).
- With significantly higher proportions of round grains (50 %), the grain shape becomes noticeable, but to a relatively small extent. Compared to the mixture with C90/1 aggregates, the modulus of the mixture with C50/50 is approx. 15 % lower and the micro-elongation approx. 5 % lower.
- It does not seem to matter whether the more rounded grains (C 70/10) are contained in the fine fraction < 8 mm or in the coarse fraction > 8 mm.

It is surprising to note that the grain shape has very little influence on the complex modulus. This conclusion is not universally valid; the following points should be noted in particular:

- Aggregates commonly found in RAP in Switzerland were examined; these correspond to category C70/10. No systematic investigation was carried out to determine whether larger proportions of round and partially round grains influence the modulus, as this question is not relevant in practice.
- The modulus is determined at 15 °C. This load does not correspond to the conditions at summer temperatures. The statement that the grain shape has little influence on the modulus does not exclude the thermal behaviour potentially being affected.

TP 2 Influence of additives

In addition to the reference mixture AC EME C1 with 70 % RAP and B 10/20, six other mixtures were investigated:

- 2 different PmB HM
- 2 different additives
- 1 natural asphalt
- 1 rubber granulate

In addition to stiffness (modulus) and fatigue behaviour, thermal behaviour was also investigated by performing a modified pressure threshold test (from TP3) on 6 of the 7 mixture samples listed above. Unfortunately, not all 7 samples could be tested due to a lack of material.

The following points can be noted from the test results:

- All mixtures meet the requirements of the standard with regard to modulus and fatigue behaviour for the AC EME C1 mix type. With the exception of one mixture (K14, additive I), the more stringent requirements for EME type C2 are also met.
- The tendency for high moduli to be associated with low fatigue values is confirmed. For example, mixtures K10 and K11 have the highest moduli and at the same time belong to the group with the lowest fatigue values (microstrain).
- K 9 (PmB HM I) stands out with a very high fatigue value and a modulus well above the standard requirements. This shows that it is possible to break the general trend (high modulus/low fatigue values) with appropriate modification and to produce mixes that exhibit very good fatigue values with a high modulus.
- The thermal behaviour was addressed using a modified cyclic compression test (German DSV). The mix with pure B 10/20 showed poorer values than all other mixes with additives. It is noteworthy that the EME with PmB HM II showed the best results; the other mixes were close together.
- Since, depending on the use of an EME layer, more importance is attached to stiffness or resistance to fatigue, it is not possible to make a generally valid overall assessment. At this point, it should be noted that excessively high stiffness values may be problematic in terms of cold behaviour.
- It can be concluded that PmB and additives can further improve EME mixes that already have good values.

TP3 Other potentially critical properties

The standardised tests for stiffness and fatigue behaviour in EME mixes do not fully reflect practical behaviour, as they do not provide any information on the following topics:

- Behaviour at high temperatures:
As both test methods are carried out at temperatures of +15 and +10 °C, respectively, the thermal behaviour of EME coatings cannot be reproduced using these test methods. It should also be noted that the rutting test required for type testing does not provide meaningful results.

Based on [Radenberg M., et al (2024)], the test conditions were made more stringent by increasing the test temperature from 50 to 60 °C and extending the load cycles. In a comparative study of old/new test conditions, the markedly improved significance was demonstrated on 11 different types of mix.

- Crack propagation:
The formation of a crack is addressed in the fatigue behaviour test. The resistance of a pavement to the propagation of an existing crack has not yet been investigated for EME pavements. For this purpose, the semi-circular bending test (SCB) was used.
The SCB test at 15 °C did not reveal any significant differences between the various mixtures. This may be due to the fact that the 70 % RAP content in all mixtures made it impossible to differentiate between them. The results do not rule out the possibility that a better spread of results could be achieved at other test temperatures.

TP4 Alternative test method for pre-selection

In order to find an alternative test method for the binder (recovered from the mixture) that would allow conclusions to be drawn about the fatigue behaviour of the mixture, the following rheological parameters were determined:

- Complex shear modulus G^* at 60 °C; phase angle δ at 60 °C; $G^*/\sin \delta$
- BTSV parameters T BTSV and δ BTSV
- LAS – fatigue

The calculation of the correlation coefficients of the individual binder tests for fatigue on the 2PB-TR asphalt test specimen yielded values between 0.01 and 0.32, meaning that there is no correlation. Although the number of value pairs is small at 5, it can be concluded that none of the rheological measurements applied can be used for pre-selection with regard to the fatigue test.

The IT-CY test was recognised as a useful alternative test method for determining the modulus. There is a fairly good correlation between the two tests, IT-CY and 2PB-TR. For the 5 value pairs examined in the project, R_2 is 0.75. The IMP's internal laboratory statistics show 34 value pairs with an R_2 value of 0.48. The fact that this value is lower, despite the larger number of value pairs, is due to the fact that the statistics also include results from other laboratories.

Since the IT-CY modules are generally lower than the 2PB-TR modules, this creates a 'safety reserve' which leads to the following pragmatic approach: if a mixture meets the requirements of the module in the IT-CY test, it will almost certainly also meet the requirements in the standardised 2PB-TR test.

The benefits of pre-selection using IT-CY are particularly significant in cases where there is time pressure, as the IT-CY test is 4 to 5 times faster.

Conclusions:

For the RAP commonly used in Switzerland, there is no limit to the amount of crushed grains that can be added to EME mixtures.

The requirements for aggregates for EME mixes (category C90/1) are very strict and cannot be met when using RAP. The project has shown that the typical EME requirements for modulus and fatigue can also be met with aggregates of category C70/10. The thermal behaviour – tested using DSV – can also be easily ensured with C70/10 aggregates if PmB or additives are used.

The requirements of the current SN EN 13043 [SN 670 103b; EN 13043: 2002 / AC 2004] for aggregates for EME mixes should be reviewed.

It can be stated that PmB and additives can further improve EME mixes that already have good values.

In order to test the behaviour at summer temperatures, the cyclic compression test (German DSV) was successfully modified in such a way that meaningful results were also possible for highly stable mix types.

The results of the SCB test to assess resistance to crack propagation were not very productive. Further work is required on this topic.

Rheological tests on the recovered binder did not reveal any correlation with the results of the 2PB-TR fatigue tests.

The IT-CY test is a reliable, faster alternative method for determining the modulus.

1 Einführung

1.1 Problembeschreibung

Die EME-Mischgutsorten gehören heute sowohl beim ASTRA, als auch bei den meisten kantonalen Richtlinien zu den Standardaufbauten bei schwerbeanspruchten Objekten. Im Sinne der Wiederverwendung und der Schliessung der Materialkreisläufe, werden auch bei den EME-Mischgutsorten hohe Dosierung an Asphaltgranulat RAP angestrebt. Wie weit diese Dosierung gehen kann, ohne die typischen Eigenschaften der EME-Beläge negativ zu beeinflussen, ist heute noch zu wenig bekannt.

Bei der letzten Überarbeitung der SN EN 13108-1 im Jahr 2022 wurde die maximal zulässige Dosierung an Ausbauasphalt (Warmzugabe) von 30 auf 60 Masse-% erhöht. Diese Erhöhung erfolgte einerseits auf Druck der Bauindustrie, andererseits auf der Basis einzelner, positiver Erfahrungen. Eine systematische Untersuchung des maximal möglichen Anteils an Ausbauasphalt in einem EME-Mischgut fehlt nach wie vor. Die geltende Norm für Asphaltgranulat (SN EN 13108-8 [2]) legt unterschiedliche Anforderungen an die Gesteinskörnung des RAP fest, je nachdem ob dieser für Trag-schichten (Gesteinskörnungen C50/30) oder für Binderschichten (Gesteinskörnungen C50/10) verwendet wird. In der Praxis führen die wenigsten Anlagen zwei verschiedene Qualitäten von Asphaltgranulat (C50/30 und C50/10). Trotzdem werden in der Regel die Normanforderungen erfüllt, denn die Gesteinskörnungen des üblicherweise verwendeten RAP erfüllen die höheren Anforderungen (C50/10).

Um die Verwendung von Asphaltgranulat zu fördern, wurde in der SN EN 13108-8 die Anforderung an Kornform- / Rundung der Gesteinskörnung des RAP vergleichsweise niedrig gehalten. Diese Anforderungen sind generell deutlich tiefer als für neue Gesteinskörnungen im Asphaltbeton; für EME-Mischgut gelten noch strengere Anforderungen (C 90/1). Je höher der Anteil RAP ist, desto mehr können Rundkörner im Mischgut enthalten sein.

Es besteht Klärungsbedarf bezüglich der Anforderungen, denn es ist klar, dass die heutigen Anforderungen an die Gesteinskörnungen für EME (C90/1) mit hohen Anteilen RAP nicht eingehalten werden können.

Neben den oben beschriebenen Fragen zur Qualität der Gesteinskörnungen, beeinflusst auch das Bindemittel des RAP die Eigenschaften des Mischgutes. Je höher der Anteil Asphaltgranulat im Mischgut ist, desto schwieriger wird es die Anforderungen an die Eigenschaften des resultierenden Bindemittels einzuhalten. Beim EME-Mischgut führt das Bindemittel des Asphaltgranulates dazu, dass das resultierende Bindemittel zu weich wird. Um die Anforderungen an das Bindemittel des EME-Mischgutes bezüglich Penetrationswerte zu erfüllen, reicht es in der Regel nicht aus, normierte Hartbitumen beizumischen. Zu diesem Zweck werden unterschiedliche Zusätze beigegeben. Es sind keine systematischen Untersuchungen des Einflusses dieser Zusätze auf die typischen Eigenschaften der EME-Beläge (Modul und Ermüdung) bekannt.

In der Praxis ist es manchmal nicht einfach im Rahmen der Typprüfung von EME-Mischgut die Anforderungen sowohl bezüglich E-Modul als auch bezüglich Ermüdung gleichzeitig zu erfüllen. Oft wird im Try and Error-Verfahren gearbeitet, bis die oben genannten Anforderungen erfüllt sind. Inwieweit sich nach der bestandenen Typprüfung die Streuungen im Asphaltgranulat auf die Eigenschaften des EME-Mischgutes auswirken, ist völlig unbekannt, da nach der Typprüfung in der Regel keine weiteren Untersuchungen (Modul/Ermüdung) durchgeführt werden. Aufgrund aktueller Erfahrungen muss jedoch angenommen werden, dass die Schwankungen der Zusammensetzung des Asphaltgranulates einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Asphaltmischgut mit hohem Anteil RAP; Grundlagen und offene Fragen

Das Beimischen von RAP in bituminösem Mischgut wird seit Ende der 70-iger Jahre des letzten Jahrhunderts im Asphaltstrassenbau praktiziert; heute werden in vielen Asphaltwerken standardmässig alte Asphaltsschichten in Form von RAP wiederverwendet. Ende der 70-iger Jahre sind erstmals Richtlinien zur Verwendung von RAP erschienen [FHWA 1978, NCHRP 1978]. In der Praxis liegen die Dosierungen an RAP in der Schweiz oft im Bereich von bis zu 60 %. Gegenüber einer Untersuchung aus dem Jahre 2013 [Kalman B. et al 2013], wonach die Anteile im Bereich von 10 bis 30 % lagen, bedeutet dies eine enorme Steigerung. In Frankreich sind für Dosierungen grösser als 10 % bei Trag- und Deckschichten separate Typprüfungen erforderlich [De la Roche C. et al. 2013], wie dies auch in den Schweizer Normen SN festgehalten ist. In den USA haben die Arbeiten des SHRP-Programmes die Verwendung von RAP etwas gebremst, lag doch bei SHRP der Fokus auf die mechanischen Eigenschaften des Mischgutes [Bressi, S 2015].

In Europa wurden mehrere Forschungsarbeiten zum Asphalt-Recycling durchgeführt. Hierzu seien folgende bedeutende Projekte erwähnt: [PARAMIX, 2002], [SAMARIS, 2005], [De la Roche C. et al. 2013], [Direct-Mat, 2011], NR2C [Bueche N. et al 2008], ASTRA-Forschungspaket Recycling [Caprez M., Rabaiotti, 2017], Mischgutoptimierung von Recyclingbelägen [Bueche N., et al 2015], ReRoad [Kalman B. et al 2013] sowie das französische Grossprojekt MURE [Mure 2013]. Bei letzterem wird unter Einbezug von Bauherren, Unternehmungen und Forschungsinstituten das Mehrfachrecycling mit hohen RAP-Dosierungen in der Warmasphalttechnologie untersucht. Der maximal mögliche Anteil an RAP in einem Mischgut wird einerseits durch technologische aber auch durch ökonomische Grenzen (Senkung der Leistung) der heutigen Aufbereitungsanlagen definiert. Dabei steht das Problem der Zugabetemperatur des RAP im Zentrum. Moderne Anlagen setzen heute praktisch keine Grenzen in der Menge des zudosierten RAPs.

In der Schweiz beschäftigte sich das Forum Strasse an zwei Tagungen mit der allgemeinen Problematik: 2007 mit dem Thema «Asphalt-Recycling» [Forum 2007] und 2017 mit dem Thema «Alterung/Verjüngung und Recycling von Asphalt» [Forum 2017].

Unabhängig von den Problemen der Aufbereitung sind bei der Wiederverwendung von RAP in EME-Mischgut folgende Fragen von Bedeutung:

- Die normierten Anforderungen bezüglich der volumetrischen Eigenschaften sind ebenso zu erfüllen wie die leistungsorientierten Anforderungen, unabhängig davon, ob RAP verwendet wird oder nicht.
- Die Streuungen der Zusammensetzung und der Eigenschaft des RAP und somit auch des Endproduktes müssen beherrscht werden.
- Das Zusammenspiel verschiedener Baustoffe bezüglich chemischer (Bindemittel) wie auch physikalischer (Gesteinskörnungen) Interaktion muss beherrscht werden.

1.2.2 EME-Mischgut und Asphaltgranulat

Die EME-Mischgutsorten für Trag- und Binderschichten wurden in den 80-iger Jahren in Frankreich mit dem Ziel entwickelt, bessere Eigenschaften bezüglich Spurbildung, Ermüdung und Steifigkeit zu erlangen [Perret J. et al, 2001]. Die Zusammensetzung dieser Mischgutsorte ist durch eine kontinuierliche Sieblinie und der Verwendung eines harten, nicht modifizierten Bitumens (Penetrationswerte zwischen 10 und 25 1/10 mm) gekennzeichnet.

Um die Vorteile der EME-Mischgutsorten und des Recyclings zu nutzen, wurden bereits vor vielen Jahren erste Versuche gefahren, so auf der französischen Autobahn APRR A5 Langes-Chaumont, wo 1994 ein EME mit 50 % RAP eingebaut wurde. Im Projekt NR2C [Bueche N. et al 2008] wurde die Machbarkeit eines EME mit 40 % RAP untersucht. Auch im ASTRA Forschungspaket «Recycling» [Caprez M., Rabaiotti, 2017], wurde in den Teilprojekten EP1 und EP5 die Rezeptierung von EME mit hohem Anteil RAP untersucht. Diese Arbeiten, insbesondere das ASTRA-Projekt, haben aufgezeigt, dass es nicht in jedem Falle möglich ist, hohe Anteile RAP zu verwenden, und trotzdem die Anforderungen an das EME-Mischgut zu erfüllen. Die Qualität des RAP, insbesondere dessen Gesteinskörnungen, spielen eine dominante Rolle. Dass es trotzdem (mit zusätzlichem Aufwand) möglich ist in Einzelfällen EME mit hohem Anteil herzustellen, zeigt das Beispiel der französischen Autobahn A26 Calais-Reims, bei welcher 65 % RAP verwendet wurde [Olard F. et al 2008].

Mehrere Publikationen weisen auf die Fragestellungen hin, bei welchen weitere Forschungsarbeiten zur Rezeptierung von EME-Mischgut erforderlich sind. Dies betrifft die Einhaltung der Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften, trotz der Schwankungen des RAP, der Eigenschaften des Bindemittels und der Kornform der Gesteinskörnungen. Die Verwendung von harten, polymermodifizierten Zugabe-Bindemitteln ist eine Tendenz [Leiva-Villacorta F. et al 2017], welche teilweise auch in der Schweiz (Kanton ZH) zu erkennen ist.

1.3 Projektziele

Das Ziel des Projektes besteht darin, eine grössere Prozesssicherheit bei der Zugabe von Asphaltgranulat RAP bei den EME-Mischgutsorten zu erreichen. An das EME-Mischgut werden leistungsorientierte Anforderungen gestellt, namentlich E-Modul und Ermüdungsverhalten. Wird RAP in hohen Dosierungen (40 % und mehr)

beigegeben, werden die Eigenschaften des Endproduktes beträchtlich beeinflusst. Das Projekt soll die Grenzen der Beimischung von RAP - unter Berücksichtigung der Qualität und der Streuung des RAP - festlegen und Lösungen zur Anwendung von Recycling-Asphalt aufzeigen.

1.4 Vorgehen, Methodik

1.4.1 TP 1 Einfluss vollständiger und teilweise runder Körner

Um die Verwendung von Asphaltgranulat RAP zu fördern, wurden im Rahmen der Normierungsarbeit die Anforderungen an die Gesteinskörnungen des RAP in der SN EN 13108-8 [SN EN-13108-8] weniger streng formuliert, als für die frisch zudosierten Gesteinskörnungen. So haben die Gesteinskörnungen aus dem RAP für Deck- und Binderschichten der Klasse C 50/10 zu entsprechen und für Tragschichten der Klasse C 50/30. Bei frischen Gesteinskörnungen gelten für EME-Beläge die Anforderungen der Klasse C 90/1. Dies bedeutet, dass mit dem RAP runde und teilweise runde Körner in das Mischgut gelangen können, welche bei Mischungen ohne RAP ausgeschlossen werden.

Um Klarheit darüber zu erlangen, ob bei höheren Zugabemengen an RAP die runden Gesteinskörnungen das Gebrauchsverhalten beeinflussen, wird der Einfluss dieser runden/teilweise runden Gesteinskörnungen auf die mechanischen Eigenschaften untersucht.

1.4.2 TP 2 Einfluss von Zusätzen

Das Bindemittel eines RAP ist in der Regel weicher als das Zielbitumen eines EME-Mischgutes. Infolge der anvisierten, hohen Dosierung an RAP, verbleiben geringe Mengen an frisch zudosiertem Hart-Bitumen, mit welchem das zu weiche Bitumen des RAP korrigiert werden kann. Mit der Verwendung entsprechender Zusätze ist es möglich, eine Verhärtung des Bitumengemisches (Bitumen aus RAP und frisch zudosiertes Bitumen) zu erreichen. Daher wird der Einfluss diverser Zusätze untersucht; nicht nur bezüglich der Verhärtung des Bitumengemisches, sondern insbesondere auch bezüglich der mechanischen Eigenschaften des EME-Mischgutes.

1.4.3 TP 3 Andere, potentiell kritische Eigenschaften

Gemäss Ausschreibung sind auch andere, potentiell kritische Eigenschaften zu untersuchen. Da die typischen Prüfungen der EME-Mischungen bei mittleren Temperaturen stattfinden (E-Modul bei 15 °C / Ermüdung bei 10 °C) ist es naheliegend das Verhalten bei hohen und tiefen Temperaturen als «potentiell kritische Eigenschaft» zu untersuchen. Das Kälteverhalten wird in diesem Projekt bewusst ausgeklammert, da zu diesem Thema ein separates Forschungsprojekt [Angst, in Bearbeitung] in Arbeit ist.

Aus den Ergebnissen der Modul-/Ermüdungs-Prüfungen werden 6 Mischungen ausgewählt, an denen 2 weitere Eigenschaften untersucht werden. Die Auswahl wird auf der Basis der vertieften Literaturstudie, der vorliegenden Ergebnisse, sowie in Absprache mit der Begleitkommission erfolgen. Grundsätzlich kommen dabei folgende Prüfverfahren in Frage:

Spurbildungstest (SN-EN 12697-22)

Einaxialer Druck-Schwellversuch (SN-EN 12697-25)

Triaxialer Druck-Schwellversuch (SN-EN 12697-25)

dynamischer Spaltzugversuch; CIT-CY (SN-EN 12697-26)

Semi Circular Bending Test (SN-EN 12697-44)

1.4.4 TP4 Alternative Prüfmethoden

Die beiden in der Norm festgelegten Prüfverfahren zur Bestimmung des Moduls sowie der Ermüdungseigenschaften sind aufwendig und zeitraubend, was auch dazu geführt hat, dass in der Schweiz nur 2 Prüfstellen diese Prüfungen durchführen. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen daher alternative (schnellere und kostengünstigere) Prüfmethoden evaluiert werden.

Die normierten Prüfungen zur Bestimmung des Moduls sowie der Ermüdungseigenschaften auf der Basis der 2, 3 oder 4-Punkte Biegung an prismenförmigen Prüfkörpern (SN EN 12697-24 und 26) sind ebenfalls zeitraubend und technisch aufwändig. Die Anwendung der indirekten Zugprüfung (IT-CY) ist zwar apparatetechnisch einfacher, doch nicht weniger zeitraubend, da die Herstellung und Lagerung der Prüfkörper mehrere Wochen in Anspruch nehmen. Zitat aus SN EN 12697-26+A1:

5.1 Alter der Probekörper
Vor Beginn der Prüfung müssen die Probekörper zwischen 14 d und 42 d ab dem Zeitpunkt der Herstellung bei einer Temperatur von maximal 20 °C auf einer ebenen Fläche gelagert werden. Bei Proben, die geschnitten oder geklebt werden müssen, muss das Schneiden spätestens 8 d nach dem Verdichten des Asphalts und das Kleben mindestens 2 Wochen nach dem Schneiden erfolgen. Als Zeitpunkt der Herstellung dieser Proben gilt der Zeitpunkt des Schneidens.
ANMERKUNG 1 Die Dauer der Lagerung beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Probekörpers.
ANMERKUNG 2 Zu Prüfzwecken mit Ausnahme von Prüfungen für die CE-Kennzeichnung kann eine andere Dauer der Lagerung verwendet werden.

Abbildung 1: Zitat aus SN EN 12697-26+A1

Das Problem ist demnach nicht die Suche nach einer schnelleren Prüfmethode zur normierten Bestimmung des Moduls und der Ermüdungseigenschaften, sondern nach einer schnellen Methode, mit welcher grob geschätzt werden kann, ob das zu prüfende Mischgut gute Chancen hat, die Prüfungen 2 PB-TR zu bestehen. Dabei muss zwischen Modul und Ermüdung unterschieden werden:

Ermüdung:

Aufgrund des heutigen Erkenntnisstandes muss davon ausgegangen werden, dass zwischen den verschiedenen Prüfungen zur Bestimmung der Ermüdungseigenschaften keine genügende Korrelation besteht. [Benedetto 2004]. Auch die in Deutschland angewendete Prüfmethode CIT-CY (zyklische Belastung zylindrischer Prüfkörper im indirekten Zugversuch) vermag hier nicht zu überzeugen, da die Belastungen lediglich im Zug-Bereich aufgebracht werden und keine Wechselbelastung Zug/Druck stattfindet.

Es dürfte kaum möglich sein eine mechanische Prüfung am Mischgut festzulegen, mit welcher bezüglich des Ermüdungsverhalten eine Vorselektion erfolgen kann.

Da das Ermüdungsverhalten sehr von den Eigenschaften des Bindemittels abhängt, wird untersucht werden, ob es einen Zusammenhang zwischen der Rheologie der rückgewonnenen Bindemittel und dem Ermüdungsverhalten gibt. Allenfalls werden rheologische Prüfungen an Mörtelmischungen in Betracht gezogen.

E-Modul:

Erfahrungsgemäss besteht zwischen den diversen Prüfmethoden zur Bestimmung des Moduls eine Korrelation. Werte aus der Literatur und eigene Untersuchungen der Forschungsstellen (ehemals LAVOC, IMP) mit der Bestimmung des E-Moduls mittel CIT-CY (dynamischer Spaltzugversuch) sollen ausgewertet und eingebracht werden.

Das grösste «Beschleunigungspotential» liegt in kürzeren Lagerungszeiten. Im Rahmen einer Untersuchung an drei unterschiedlichen Mischungen mit normgerechter und mit verkürzter Lagerungszeit soll abgeklärt werden, ob die CIT-CY- Methode mit verkürzter Lagerungszeiten im Rahmen einer Vorselektion nützlich sein kann.

2 Methoden und Baustoffe

2.1 Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende, normierte Prüfverfahren verwendet.

Normierte Prüfverfahren		
	Prüfung/Methode	Norm
Gesteinskörnungen	Korngrössenverteilung	SN EN 933-1
	Gehalt gebrochener Körner	SN EN 933-5
Asphalt	Löslicher Bindemittelgehalt	SN EN 12697-1
	Siebanalyse	SN EN 12697-2
	Bindemittelrückgewinnung	SN EN 12697-3
	Raumdichte	SN EN 12697-8
	Rohdichte	SN EN 12697-5
	Ermüdung 2 PB TR	SN EN 12697-24
	Steifigkeit 2 PB TR	SN EN 12697-26
	Probenvorbereitung mit Walzverdichter	SN EN 12697-33
	Marshall-Versuch	SN EN 12697-34
	Labormischung	SN EN 12697-35
Bindemittel	Penetration	SN EN 1426
	Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN EN 1427
	Elastische Rückstellung	SN EN 13398
	Dynamisches Scherrheometer DSR	SN EN 14770

Tabelle 1: Im Projekt verwendete Prüfmethode

2.2 Baustoffe

2.2.1 Gesteinskörnungen

Die Gesteinskörnungen wurden bei einer Aufbereitungsanlage im Mittelland bezogen. Beschafft wurden die Fraktionen 0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22, 22/32. Die verschiedenen Fraktionen wurden sowohl als gebrochene Gesteinskörnungen, als auch als runde Gesteinskörnungen beschafft. Die gebrochenen Komponenten werden im Werk durch Brechen runder Komponenten hergestellt, petrographisch sind die Gesteine identisch.

Als Füller wurde Eigenfüller aus der gleichen Anlage ausgewählt.

Die Korngrössenverteilungen der verwendeten Gesteinskörnungen sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Ergebnisse der Siebanalysen

Sieb [mm]	BS 0/2	Splitt 2/4	Splitt 4/8	Splitt 8/11	Splitt 11/16	Splitt 16/22	Splitt 22/32
	21- 08827	21- 08828	21- 08829	21- 08830	21- 08831	21- 08832	21- 08833
22					100.0	90.9	10.0
16				100.0	92.5	6.8	1.3
11			100.0	91.1	13.9	0.9	0.8
8	100.0		94.3	6.7	2.2	0.8	0.7
5.6	95.9	100.0	49.4	0.6	1.7	0.8	0.7
4	71.7	87.3	10.0	0.3	1.6	0.7	0.6
2	48.2	4.3	5.4	0.2	1.5	0.7	0.6
1	31.6	1.7	5.2	0.2	1.2	0.6	0.6
0.5	20.0	1.5	5.2	0.2	0.8	0.4	0.6
< 0.063	12.0	0.5	0.3	0.1	0.0	0.1	0.2

Tabelle 2: Ergebnisse der Siebanalysen der verwendeten Gesteinskörnungen

2.2.2 Asphaltgranulat

Das Ziel des Projektes besteht darin, die Verwendung von RAP in EME-Mischgut so weit wie möglich zu steigern. Viele Aufbereitungsanlagen teilen heute das Asphaltgranulat in verschiedene Fraktionen auf, was für die Erhöhung des Anteils an Recyclingmaterial förderlich ist. In einem ersten Schritt wurde auf die Verwendung von fraktioniertem Asphaltgranulat verzichtet; es wurde mit der ungünstigeren Ausgangslage begonnen. Sollte es mit nicht-fraktioniertem RAP gelingen einen sehr hohen Anteil RAP einzusetzen, und trotzdem die in der Norm festgelegten Anforderungen zu erfüllen, dann ist dies mit fraktioniertem RAP erst recht möglich.

Als RAP wurde ein 0/22 beschafft und untersucht; die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 aufgeführt.

Eigenschaften des RAP

Löslicher Bindemittelgehalt	M.-%	4.06
Eigenschaften des rückgewonnen Bindemittels:		
Nadelpenetration	1/10mm	21
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	65.8
Elastische Rückstellung	%	36

Tabelle 3: Eigenschaften des verwendeten Asphaltgranulates RAP

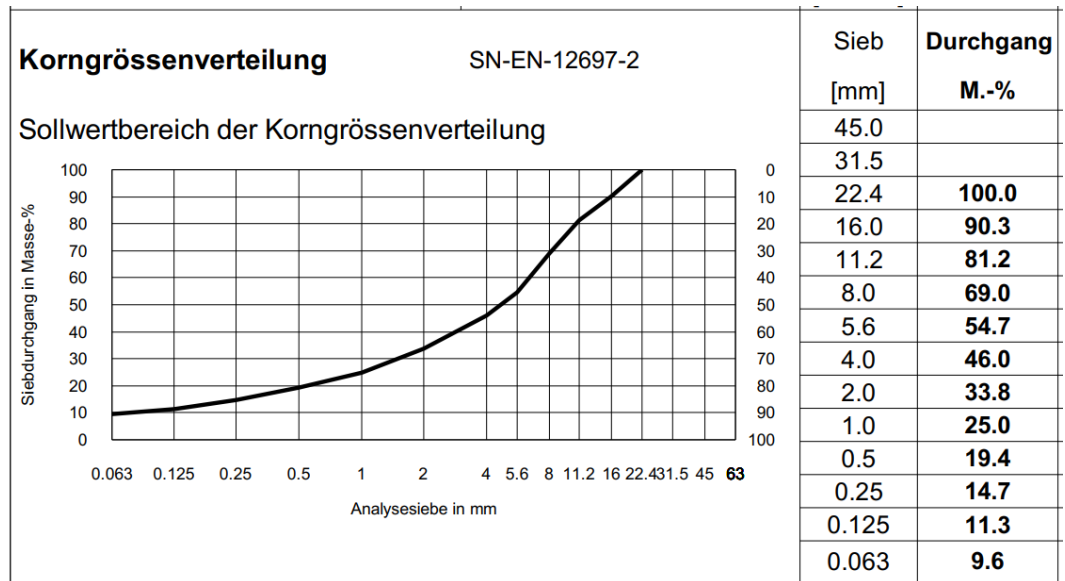


Abbildung 2: Korngrössenverteilung des verwendeten RAP

2.2.3 Bindemittel

Als Standard-Bindemittel für die Mischungen wurde ein hartes Strassenbaubitumen B 10/20 gemäss SN EN 13924-1 verwendet; die Penetration lag bei 16 1/10 mm.

3 TP 1 Einfluss vollständiger und teilweise runder Körner

3.1 Vorgehen, Methodik

Um den Einfluss der Kornform auf die mechanischen Eigenschaften der AC EME-Mischgüter zu ermitteln, wurden Modell-Mischungen ohne RAP hergestellt, bei denen die Anteile teilweise gebrochener, vollständig gebrochener und vollständig runder Körner gezielt variiert wurden. Es wurde nur eine beschränkte Anzahl Mischungen hergestellt und untersucht, da die Untersuchung weitere Mischungsvarianten durch eine IT-gestützte Modellierung geplant war.

Als EME-Mischung wurde der Typ C2 gewählt, da bei diesem Typ die Norm höhere Anforderungen an das komplexe Modul und die Ermüdungseigenschaften fordert als beim Typ C1.

3.2 Modellierung von bituminösen Mischungen

3.2.1 Theoretische Rezeptierung von Asphaltmischungen

Die Rezeptierung von Asphaltmischungen oder „Mix Design“, besteht aus der Auswahl von Bestandteilen und der Bestimmung ihrer Anteile, um die geforderten Leistungen zu erreichen, wie z.B.:

- Verdichtbarkeit,
- Verarbeitbarkeit,
- Widerstand gegen Spurrinnenbildung,
- Rissbildung (Ermüdung, thermisch),
- etc.

Das Hauptziel des digitalen Designs von Asphaltmischgut ist es, den Prozess der Entwicklung von Asphaltrezepturen zu optimieren, indem der empirische Anteil der Arbeit, der aus zeit- und kostenintensiven Labortests besteht, verringert wird. Der Vorteil des Einsatzes einer Software zur Unterstützung der Rezeptur besteht darin, dass mehrere Iterationen bei der Suche nach der optimalen Mischung durchgeführt werden können und die Anzahl der Tests zur Überprüfung der endgültigen Eigenschaften minimiert wird.

3.2.2 Software PradoWeb

Allgemeines zum Konzept

PradoWeb, ein Akronym für „Programm for Road Asphalt Design and Optimisation - Web-version“, ist eine Software für das theoretische Design von Asphaltmischungen, die vom belgischen Strassenforschungszentrum BRRC entwickelt wurde. Es handelt sich um eine Weiterentwicklung der früheren Versionen der Software Prado und Pradowin.

PradoWeb ermöglicht die Modellierung von Asphaltmischungen durch einen volumetrischen Designansatz, bei dem nach einer Auswahl der Komponenten deren optimales Verhältnis in der Mischung bestimmt wird.

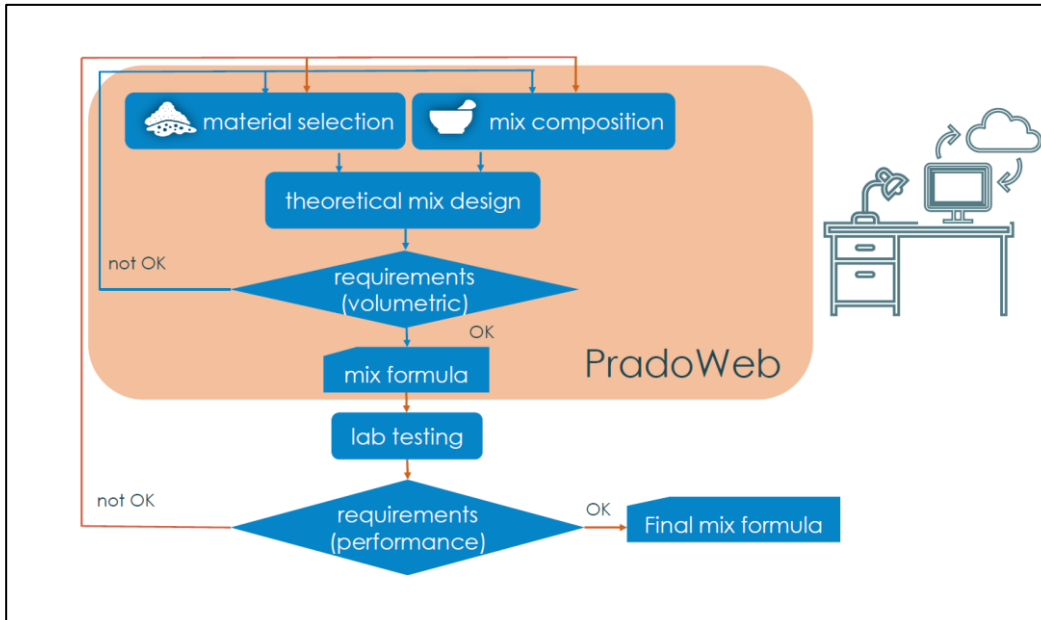


Abbildung 3: Verwendung von PradoWeb bei der theoretischen Formulierung von Asphaltmischgut (Quelle: BRRC)

Die Bewertung der gerechneten Lösung wird anhand von technischen Indikatoren durchgeführt, welche sich aus den verschiedenen Komponenten eines Asphaltmischguts unter Berücksichtigung der physikalischen Wechselwirkungen zwischen diesen Komponenten ergeben. Unter diesen technischen Indikatoren können wir die unterschiedlichen Volumina der mineralischen, bituminösen und Hohlraumfraktionen sowie die Zusammensetzung des Mörtels (Bindemittel- und Füllermischung) nennen.



Abbildung 4: Spezifische Indikatoren, die für die Schätzung der Leistung von Asphaltgemischen erforderlich sind (Quelle: BRRC)

Die Software basiert auf theoretischen Konzepten und einer Datenbank mit Rezepturen verschiedener Asphaltmischungen, die in den älteren Versionen der Software Prado und PradoWin implementiert wurden.

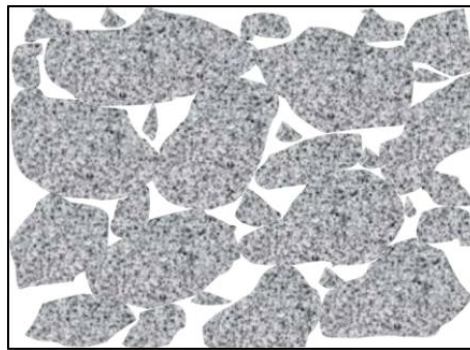
Die von PradoWeb berechneten Hohlraugehalte der Mischungen wurden anhand von experimentellen Ergebnissen, die mit dem Gyrator-Verdichter ermittelt wurden, validiert und kalibriert. Das BRRC weist darauf hin, dass die Hohlräume einer Einstellung des Gyrotors mit einem Scherwinkel von $0,82^\circ$ entsprechen.

Die neueste Entwicklung der Software, PradoWeb, ist ein Update der Software, das auf den neuesten Softwarestandards basiert, aber vor allem neue Materialien und Mischungen besser berücksichtigt, insbesondere die Einführung von RAP.

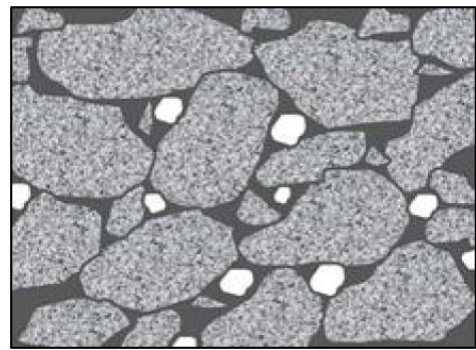
Arbeitsablauf in PradoWeb

Der Arbeitsablauf in der PradoWeb-Software besteht aus den folgenden Schritten:

1. Auswahl der Materialien (Komponenten).
2. Bestimmung des Verhältnisses der Gesteinskörnungskomponenten.
3. Berechnung der Korngrösse der Mischung (in Vol.-%).
4. Berechnung der Hohlräume der Gesteinskörnungen (VMA).
5. Bestimmung des Volumens des Bindemittels.



a



b

Abbildung 5: Mischung der Gesteinskörnung (a) und die Mischung nach Zugabe des Bindemittels (b) (Quelle: BRRC)

Die theoretische Mischung in PradoWeb berücksichtigt wichtige Eigenschaften der Gesteinskörnungen wie:

1. Die Korngrösse (in Volumenprozent).
2. Die Hohlräume der Füllerfraktion (Rigden-Hohlräume).
3. Die Kantigkeit, Kornform.

Die Kantigkeit hat einen sehr grossen Einfluss auf die Hohlräume der fertigen Mischung. Runde Körnungen führen zu geringen Hohlräumen, während sehr eckige Körnungen (gebrochen) bei gleicher Korngrösse zu hohen Hohlräumen führen.

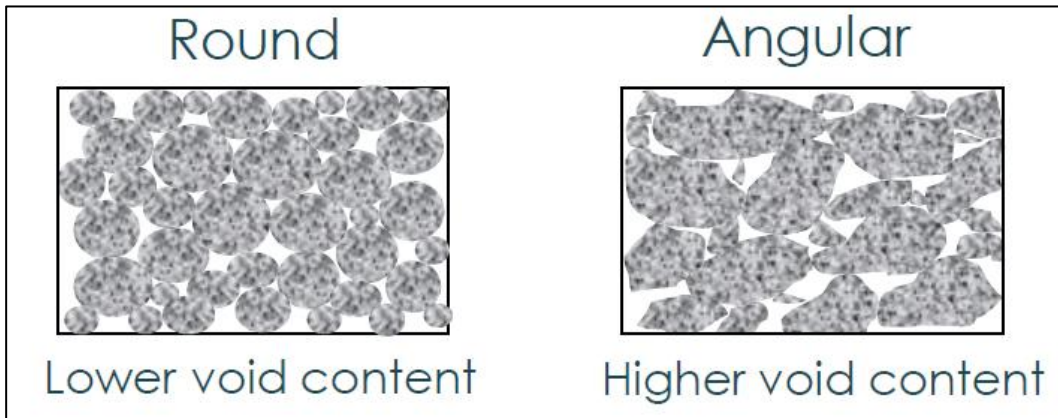


Abbildung 6: Einfluss der Kornform der Gesteinskörnungen auf die Hohlräume in der Mischung der Gesteinskörnungen (Quelle: BRRC)

Das Volumen des Bindemittels in der Mischung wird durch folgende Gleichung bestimmt:

$$\text{Hohlräume} = VMA - (\text{Volumen des Bindemittels}) \quad (1)$$

Die Bestimmung des Volumens des Bindemittels folgt einem Kompromiss zwischen:

1. Ausreichend Bindemittel hinzufügen: Kohäsion sicherstellen
2. Zu viel Bindemittel vermeiden: Verformungswiderstand gewährleisten.
3. Volumenverhältnis Füller/Bindemittel kontrollieren: Optimale Steifigkeit des Mörtels erreichen

In PradoWeb verfügbare Materialien und Komponenten

Die Komponenten, welche in einer Rezeptierung verwendet werden, lassen sich in verschiedene Komponentenfamilien einteilen:

1. Grobe Gesteinskörnungen (> 2mm)
2. Feinkörnige Gesteinskörnungen (≤ 2 mm)
3. Bindemittel
4. Asphaltgranulat / RAP
5. Füller
6. Zusatzstoffe

Diese Materialien werden in die Bibliothek der Software eingegeben, nachdem ihre Eigenschaften ermittelt wurden.

3.2.3 Ergebnisse

Mischung AC EME 22 C2 100 % gebrochen

Die erste in PradoWeb gerechnete Mischung ist ein AC EME 22 C1, welcher aus den 100 % gebrochenen Kornfraktionen 0/2, 2/4, 4/8, 8/11.2, 11.2/16, 16/22.4 sowie Füller (Rigden Hohlraumgehalt = 32 Vol.-%) besteht. Diese erste Mischung enthält keinen RAP.

Das verwendete Bindemittel ist ein Hartbitumen 10/20 mit Bindemittleigenschaften in der Mitte der Sollbereiche (Penetration =15 0.1 mm, Erweichungspunkt RuK = 68 °C).

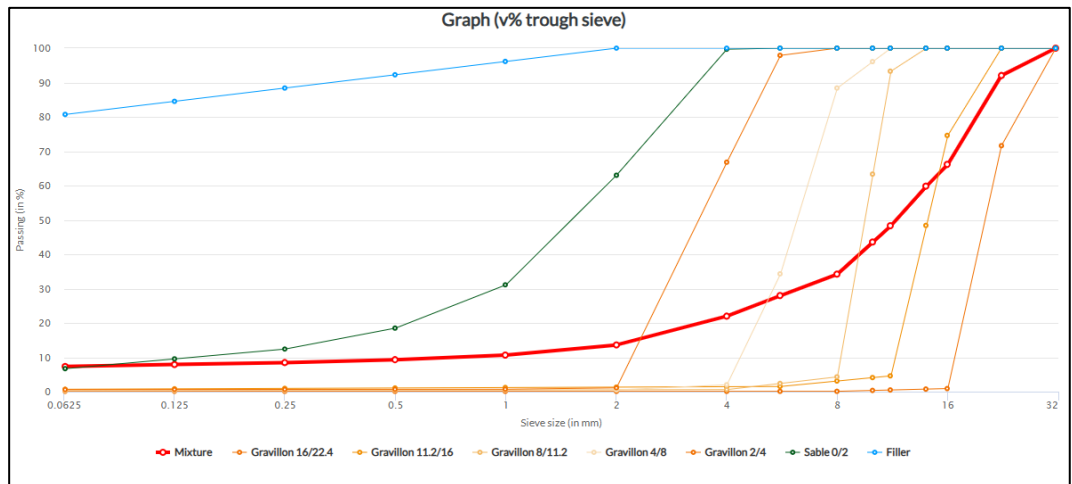


Abbildung 7: Beispiel für die Korngrößenverteilung der einzelnen Gesteinskörnungen und des resultierenden Gemisches

Der berechnete optimale Bindemittelgehalt beträgt 5.39 Masse-% und führt zu einem Hohlraumgehalt der Mischung von 10.39 Vol.-%, was ein zu hoher Wert für diese Mischgutsorte ist.

Mischung AC EME 22 C2 0 % gebrochen

Um die Gründe für den zu hohen Hohlraumgehalt der ersten Mischung zu ermitteln wurde beschlossen, eine zweite Mischung AC EME 22 C2 zu rechnen, welche diesmal aus runden Kornfraktionen bestand, d.h. die Fraktionen 0/2, 2/4, 4/8, 8/11.2, 11.2/16, 16/22.4 sowie Füller (Rigden Hohlraumgehalt = 32 Vol.-%). Diese Mischung enthält keinen RAP.

Die Eigenschaften der hier verwendeten Kornfraktionen stammen aus einem anderen Projekt und ihre Verwendung hier dient lediglich dazu, das Potenzial für die Herstellung von Mischungen mit üblichen Hohlräumen zu untersuchen.

Das Bindemittel ist das gleiche Bitumen 10/20, welches für die erste Mischung verwendet wurde.

Der berechnete optimale Bindemittelgehalt beträgt 5.50 Masse-% und führt zu einem Hohlraumgehalt der Mischung von 3.88 Prozent, was ein eher konventioneller Wert für diese Mischgutsorte ist.

Teilschlussfolgerung: Das Erreichen eines akzeptablen Hohlraumgehalts für eine AC EME 22 C2 Mischung mit PradoWeb ist nur bei der Verwendung von Kornfraktionen möglich, die als 100 % rund angegeben werden. Dies schliesst die ursprünglich angestrebte Variation von Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen an runden und gebrochenen Gesteinskörnungen aus.

Mischung AC 11 S 100 % gebrochen

Um die Gründe für den hohen Hohlraumwert der ersten beiden AC EME 22 C2 Mischungen zu ermitteln, wurde beschlossen, eine „einfachere“ Mischung zu modellieren, welche aus einer geringeren Anzahl von Kornfraktionen besteht.

Die untersuchte Mischung ist ein AC 11 S, der aus den gebrochenen Kornfraktionen 0/2, 2/4, 4/8, 8/11.2, dem Füller (Rigden Hohlraumgehalt = 32 Vol.-%) und immer noch ohne RAP besteht.

Das verwendete Bindemittel ist ein Strassenbaubitumen 70/100 mit Bindemittleigenschaften im mittleren Bereich der Sollwerte (Penetration = 85 0.1 mm, Erweichungspunkt RuK = 47 °C).

Der berechnete optimale Bindemittelgehalt beträgt 5,50 Masse-% und führt zu einem Hohlraumgehalt des Asphaltmischguts von 7,20 Prozent, was für diese Art von Asphaltmischgut ein zu hoher Wert ist.

3.2.4 Fazit

Eine kurze Zusammenfassung der Asphaltgemische, deren Zusammensetzung mit der PradoWeb-Software berechnet wurden, ist in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Zusammenfassung der berechneten Mischungen				
Nr.	Asphalt Sorte	% RAP	% gebrochene Körner	% Hohlraum-Gehalt
1	AC EME 22 C2	0 %	100 %	10.39 %
2	AC EME 22 C2	0 %	0 %	3.88 %
3	AC 11 S	0 %	100 %	7.20 %

Tabelle 4: Zusammenfassung mittels PradoWeb berechneten theoretischen Asphaltmischungen

Die theoretische Formulierung von Asphaltgemischen mit PradoWeb führte nicht zu zufriedenstellenden Eigenschaften (insbesondere Hohlräume), ausser bei der Verwendung von 100 % runden Gesteinskörnungen, was für die weitere Forschung nicht zielführend ist.

Der Softwareanbieter wurde kontaktiert, um die technischen Gründe für diese Art von Ergebnissen und die angebotenen Lösungen zur Behebung dieser Probleme zu erörtern. Die plausible Erklärung des BRRC liegt im Unterschied der Verdichtungsenergie zwischen Belgien und der Schweiz. Sie gehen davon aus, dass die in Belgien zulässige Verdichtungsenergie deutlich höher ist als in der Schweiz.

Der Austausch mit dem Softwarehersteller brachte keine Lösung für dieses Problem, so dass wir für die weitere Forschung auf dieses Werkzeug zur Modellierung von Asphaltmischungen verzichten mussten.

3.3 Einfluss Anteil gebrochener Körner

3.3.1 Herstellung von Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10

Eine Umfrage bei Belagswerken aus verschiedenen Landesteilen hat ergeben, dass in der Schweiz die Gesteinskörnungen im RAP generell der Kategorie C 70/10 zugeordnet werden können (siehe Tabelle 5). Dies bedeutet, dass die vollständig und teilweise gebrochenen Gesteinskörner einen Anteil von 70 ... 100 % aufweisen, und dass maximal 10 % der Körner vollständig rund sind. In einigen Fällen wird sogar die Kategorie C 90/1 erreicht, z.B. in alpinen Regionen, wo die Gesteinskörner hauptsächlich aus Steinbrüchen stammen und somit eine gebrochene Oberfläche aufweisen.

Aus diesen Erkenntnissen kann eine erste Folgerung für das Projekt abgeleitet werden: Es macht keinen Sinn, für die Modell-Mischungen Gesteinskörnungen zu verwenden, welche mehr runde und teilweise runde Körner als die Kategorie C 70/10 aufweisen.

Umfrage bei Asphaltaufbereitungsanlagen

Region	Fraktionierung des RAP	Anteil RAP in Trag- und Bindschichten	Bindemittelgehalt im RAP	Kornform / Kornrundung der Gesteinskörnungen des RAP
Nordwest	0/8, 8/22	Bis 60 %	0.6 % bei 8/22	C 70/10
Ost	0/8, 8/16	Bis 40 %	>5 % bei 0/8 4.5 % bei 0/16	C 70/10
Innerschweiz	0/8, 8/11, 11/16, 16/22	C1 30 %, C2 40 %	5 % bei 0/8	C 70/10
Tessin				C 90/1, C 100/0
Wallis	mehrere	Bis 60 %	4.6-4.8 % auf C2	Bis C 90/10, C 90/1

Tabelle 5: Grobe Übersicht über die Eigenschaften des RAP in der Schweiz

Die EN 13043 legt die in Tabelle 6 aufgeführten Anforderungen an den Anteil gebrochener Körner fest. Im Nationalen Anhang zu dieser EN-Norm hat die Schweiz unter Pkt 15 eine Kategorie C 70/10 abweichend zur EN eingeführt. Die Definition des Anteils gebrochener Körner erfolgt bei der Kategorie C 70/10 analog zu den in der EN definierten Kategorien. Dabei ist zu beachten, dass innerhalb der Kategorie C 70/10 sehr unterschiedliche Varianten möglich sind, wie dies in der Tabelle 7 aufgezeigt wird.

Norm-Kategorien für den prozentualen Anteil gebrochener Oberflächen (einschließlich des Anteils vollständig gebrochener und vollständig gerundeter Körner)

Anteil vollständig gebrochener Körner	Anteil vollständig und teilweise gebrochener Körner	Anteil vollständig gerundeter Körner	Kategorie
Massenanteil in Prozent	Massenanteil in Prozent	Massenanteil in Prozent	C
90 bis 100	100	0	C _{100/0}
30 bis 100	95 bis 100	0 bis 1	C _{95/1}
30 bis 100	90 bis 100	0 bis 1	C _{90/1}
–	50 bis 100	0 bis 10	C _{50/10}
–	50 bis 100	0 bis 30	C _{50/30}
–	< 50	> 30	C _{angegeben}
–	Keine Anforderung	Keine Anforderung	C _{nr}

Tabelle 6: Anforderungen der EN 13043 an den Anteil gebrochener Körner.

Mögliche Zusammensetzungen der Gesteinskörnungen innerhalb der Kategorie C 70/10

	Anforderungen des Nationalen Anhangs zur EN 13043	Variante A [maximal gebrochen]	Variante B	Variante C [maximal rund]
Vollständig gebrochen	30 ... 100 %	70 %	50 %	30 %
Vollständig und teilweise gebrochen	70 ... 100 %	100 %	95 %	90 %
Vollständig rund	0 ... 10 %	0 %	5 %	10 %
Bemerkung		teilweise gebrochen: 30 %	teilweise gebrochen: 45 %	teilweise gebrochen: 60 %

Tabelle 7: Mögliche Zusammensetzungen der Gesteinskörnungen innerhalb der Kategorie C 70/10

Für die weiteren Arbeitsschritte mit Modell-Mischungen, welche unterschiedliche Anteile an gebrochenen Körner (ohne RAP) enthalten, wurde die Kategorie C 70/10 gemäss Tabelle 8 festgelegt.

Zusammensetzung der Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10 für die Modell-Mischungen

	Anteile an den Kornformen [Masse-%]
Vollständig gebrochen	70
Teilweise gebrochen	20
Vollständig rund	10

Tabelle 8: Festlegung der Zusammensetzung der Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10 für die Modell-Mischungen ohne RAP

Um ein Mischgut mit Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10 herzustellen, wurden aus den runden Körnern in einem Laborbrecher teilweise runde Körner gebrochen. So kann für jede Korngruppe die Kategorie C 70/10 hergestellt werden. Da dies bei den feinen Korngruppen ($< 2 \text{ mm}$) nicht mit vernünftigem Aufwand realisierbar ist, wurden bei diesen Korngruppen nur vollständig gebrochene und vollständig runde Körner verwendet. Entsprechend wurden die Anteile bei den groben Korngruppen angepasst, um im Mischgut die Kategorie C 70/10 zu erhalten. Das Vorgehen ist in Tabelle 9 zusätzlich erläutert.

Prinzip der Rezeptierung, um ein Mischgut mit Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10 zu erhalten.

Theoretische Anteile der Kornformen pro Fraktion				
		gebrochen	teilweise gebrochen	rund
Gesteinskörnungen > 2 mm		70 %	20 %	10 %
Gesteinskörnungen < 2 mm		70 %	20 %	10 %
theoretische Anteile der Kornformen im Mischgut				
	Anteile an Korngrößen Verteilung	gebrochen	teilweise gebrochen	rund
Gesteinskörnungen > 2 mm	70 %	49 %	14 %	7 %
Gesteinskörnungen < 2 mm	30 %	21 %	6 %	3 %
Total	100 %	70 %	20 %	10 %
vereinfachtes Vorgehen; Kornformen pro Fraktion				
		gebrochen	teilweise gebrochen	rund
Gesteinskörnungen > 2 mm		70 %	20 %	10 %
Gesteinskörnungen < 2 mm		87.5 %	0.0 %	12.5 %
effektive Kornform im Mischgut				
	Anteile an Korngrößen Verteilung	gebrochen	teilweise gebrochen	rund
Gesteinskörnungen > 2 mm	70 %	43 %	20 %	7 %
Gesteinskörnungen < 2 mm	30 %	27 %	0 %	3 %
Total	100 %	70 %	20 %	10 %

Tabelle 9: Prinzip der Rezeptierung, um ein Mischgut mit Gesteinskörnungen der Kategorie C 70/10 zu erhalten. Die gebrochenen und der runden Körner wurden von einer Aufbereitungsanlage beschafft, die teilweise gebrochenen Körner im Labor aus gebrochenen Körnern hergestellt.

3.3.2 Herstellung der Asphalt-Mischungen

Das Mischgut wurde in einem Asphalt-Labormischer in Chargen von 60 kg hergestellt, diese Menge wurde wie folgt verwendet:

- 45 kg für Steifigkeit und Ermüdung 2 PB TR
- 10 kg für Standard-Untersuchungen (Extraktion/Siebanalyse, Marshall, Bindemittelrückgewinnung)
- 5 kg Reserve

Ablauf der Mischgutherstellung ohne RAP:

- Erhitzung der Zuschlagstoffe auf 175 °C
- Aufheizen des Bitumens auf 175 °C (ca. 3 h)
- Zugabe der Gesteinskörnungen in den vorgewärmten Mischer
- Zugabe des Bitumens und Mischen (normalerweise 100 Sekunden)
- Manuelles Homogenisieren des Mischguts auf einem Misch Tisch
- Befüllen von Karton-Schachteln

Ablauf der Mischgutherstellung mit RAP:

- Erhitzung der Zuschlagstoffe und des RAP (im geschlossenen Behälter) auf 175 °C
- Aufheizen des Bitumens auf 175 °C (ca. 3 h)
- RAP und Gesteinskörner in den vorgewärmten Mischer geben
- Durchmischen, bis die Mischung (aus GK und RAP) homogen ist (ca. 60 Sekunden)
- Dosierung des Bitumens und Mischen (normalerweise 100 Sekunden)
- Manuelles Homogenisieren des Mischguts auf einem Misch Tisch
- Befüllen von Karton-Schachteln

Es wurden fünf Mischungen AC EME 22 C2 mit unterschiedlichen Anteilen gebrochener Körner im Labor hergestellt (siehe Tabelle 10). Die Mischungen K1 bis K4 liegen im Rahmen der Gesteinskategorien, welche in der Schweiz im RAP zu erwarten sind. Dabei liegt der Anteil runder Körner unterhalb von 10 Masse-%. Bei der Mischung K10 wurde der Anteil runder Körner mit 50 Masse-% sehr hoch gewählt, um den Einfluss der runden Körner zu evaluieren. Die nicht normierte «Kategorie» C 80/5 resultiert aus einer Mischung aus je 50 % C 90/1 und C 70/10.

**Zusammensetzung der Gesteinskörner der
Mischungen AC EME 22 C2 K1 bis K4 und K 10.**

Mischung	Kategorie der Gesteine im Mischgut	Kategorie der Gesteine in der Fraktion 0/8	Kategorie der Gesteine in der Fraktion 8/22
K1	C 90/1	C 90/1	C 90/1
K2	C 70/10	C 70/10	C 70/10
K3	C 80/5	C 70/10	C 90/1
K4	C 80/5	C 90/1	C 70/10
K10	C 50/50	C 50/50	C 50/50

Tabelle 10: Zusammensetzung der Gesteinskörner der Mischungen AC EME 22 C2 K1 bis K4 und K 10.

Die EME-Sorte C2 wurde gewählt, da bei dieser Sorte die Anforderungen an die Steifigkeit und an die Ermüdung höher liegen als bei der Sorte C1. Als Bindemittel wurde ein B 10/20 verwendet; die Soll-Siebsummenkurve ist in der Abbildung 8 ersichtlich. Die Eigenschaften jeder Mischung sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

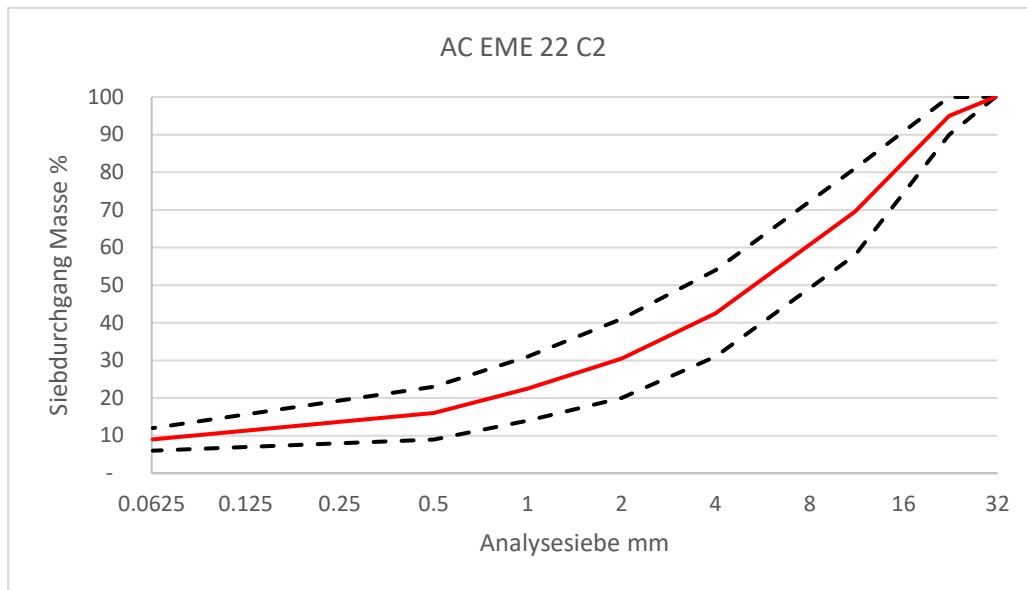


Abbildung 8: Soll-Siebsummenkurve (rot) der im Labor hergestellten Mischungen AC EME C2; schwarz gestrichelt ist der in der Norm SN EN 13108-1 festgelegte Sollwert-Bereich dargestellt.

3.3.3 Untersuchungsergebnisse

Das komplexe Modul und das Ermüdungsverhalten wurden gemäss der in der Schweiz normierten Prüfverfahren bestimmt; es sind dies:

- Komplexes Modul: Zweipunkt-Biegeprüfung an trapezförmigen Probekörpern (2PB TR); SN EN 12697-26; Anhang A.
Die Prüfung wird bei einer Frequenz von 10 Hz und einer Temperatur von 15 °C durchgeführt.
- Beständigkeit gegen Ermüdung: Zweipunkt-Biegeprüfung an trapezförmigen Probekörpern (2PB TR); SN EN 12697-24; Anhang A.
Die Prüfung wird bei einer Frequenz von 25 Hz und einer Temperatur von 10 °C durchgeführt.

Untersuchungsergebnisse der Mischungen AC EME C2

	IMP Nr.	Kategorie der Gesteine im Mischgut	Bin-dem. Gehalt [M.-%]	Holraum-gehalt Marshall [Vol.-%]	Penet-ration [1/10m m]	Modul [MPa]	Ermü-dung [μs]
K1	21-11154	C 90/1	5.50	2.5	11	21'240	149
K2	21-10904	C 70/10	5.62	1.6	11	21'122	136
K3	22-00879	0/8 mit C 70/10 8/22 mit C 90/1	5.36	2.6	11	19'023	141
K4	22-00885	0/8 mit C 90/1 8/22 mit C 70/10	5.25	1.9	10	19'984	152
K10	22-09613	C 50/50	5.20	2.0	12	18'242	142

Tabelle 11: Untersuchungsergebnisse der Mischungen AC EME C2 (Penetration am rückgewonnenen Bindemittel)

Die Holraumgehalte liegen - innerhalb des Sollbereiches gemäss SN EN 13108-1 (1.0 ... 4.0 Vol.-%) - nahe beieinander. Der Bindemittelgehalt der Mischungen K1 und K2 liegt etwas über dem angestrebten Wert von 5.4 Masse-%; bei den Mischungen K4 und K10 hingegen leicht darunter; die Mischung K3 liegt sehr nahe beim Zielwert. Die Werte der Penetration des rückgewonnenen Bindemittels sind für alle Mischungen praktisch gleich.

Die Werte für das Modul sind generell hoch; sie liegen deutlich über der minimalen Normanforderung von > 14'000 MPa. Die beiden Mischungen K1 und K2 stellen die in der Praxis zu erwartenden maximalen (C 90/1) bzw. minimalen (C 70/10) Gehalte an gebrochenen Gesteinskörnungen dar. Beide Mischungen zeigen ein vergleichbares Modul; der Unterschied (ca. 0.5 %) ist nicht relevant. Die Mischung K10 mit einem sehr hohen Anteil an Rundkorn (welcher in der Praxis nicht zu erwarten ist) zeigt ein um ca. 15 % tieferes Modul. Der etwas niedrigere Bindemittelgehalt der Mischung K10 (im Vergleich mit K1 und K2) kann als Ursache für das tiefere Modul ausgeschlossen werden, denn weniger Bitumen würde das Modul tendenziell eher vergrössern.

Bei den Mischungen K3 und K4 wurden die Gesteinskörnungen mit mehr runden Körner (C70/10) in den feinen Anteilen 0/8 (Mischung K3) bzw. in den groben Anteilen 8/22 (Mischung K4) zugemischt. Auf die Gesamtmenge an Gesteinskörnern bezogen beträgt der Anteil 0/8 ca. 50 %; es wurden demnach etwa die Hälfte der Gesteinskörnungen variiert. Die Ergebnisse der Module liegen mit 19'023 und 19'984 MPa recht nahe beieinander; die Differenz liegt unter 5 %. Es scheint keine Rolle zu spielen ob die Gesteine der Kategorie C70/10 in den feineren (< 8 mm) oder gröberen (> 8 mm) Anteilen vertreten sind. Ob ein höherer Anteil runder Körner - wie beispielsweise die Kategorie C 50/50 - das Modul beeinflusst, wurde nicht untersucht, da in der Praxis die Gesteinskörnungen des RAP mindestens der Kategorie C 70/10 entsprechen.

Zusammenfassend ist aus den Untersuchungen des Moduls folgendes festzuhalten:

- Die untersuchten Modell-Mischungen entsprechen in Bezug auf die Kornform einem Mischgut mit 100 % RAP.
- Innerhalb des in der Praxis zu erwartenden Anteils an gebrochenen Körnern in einem EME-Mischgut mit hohem Anteil an RAP, hat die Kornform keinen relevanten Einfluss auf das gemäss SN EN 12697-24 bestimmte komplexe Modul.
- Bei deutlich höheren Anteilen an Rundkorn (50 %) macht sich die Kornform beim Ergebnis des Moduls bemerkbar, allerdings in relativ geringem Ausmass (15 % niedrigerer Wert).
- Es scheint keine Rolle zu spielen, ob die eher runden Körner (C 70/10) in der feinen Fraktion < 8mm oder in der groben Fraktion ≥ 8 mm enthalten sind.

Die Ergebnisse der Ermüdungsprüfung (SN EN 12697-24) sind in der Tabelle 11 aufgeführt und in Abbildung 9 grafisch dargestellt.

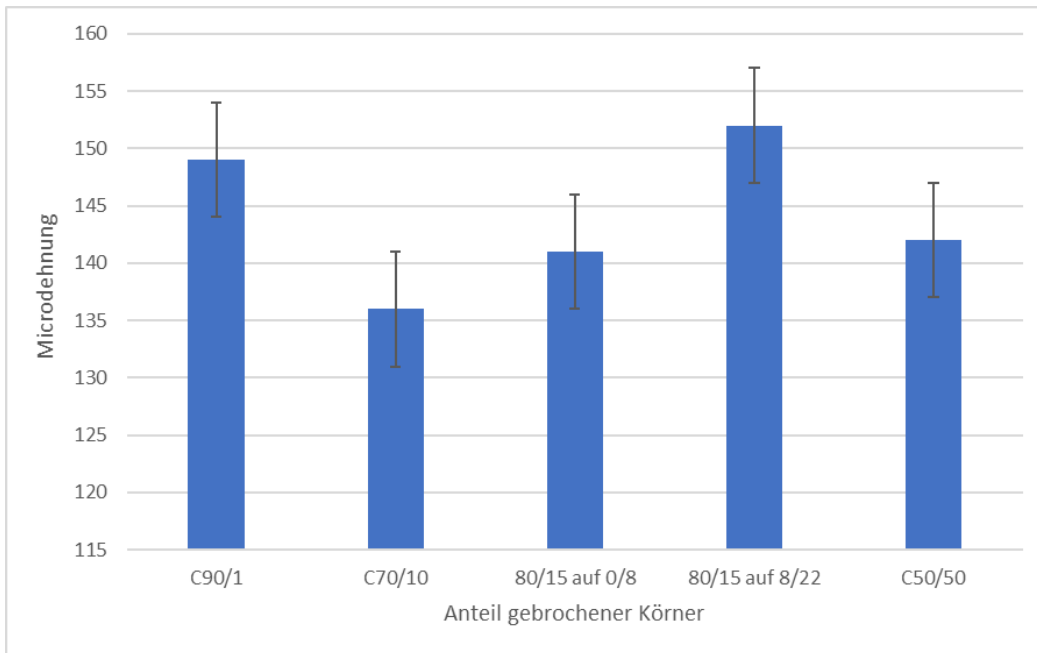


Abbildung 9: Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen inkl. Vertrauensbereich (± 5)

Die Werte für den Widerstand gegen Ermüdung sind generell hoch; sie liegen über der minimalen Normanforderung von > 130 Mikrodehnung. Wie der Abbildung 9 zu entnehmen ist, sind die Unterschiede statistisch gesehen knapp oder nicht relevant. Es ist auch kein Trend zwischen der Beständigkeit gegen Ermüdung und dem Anteil gebrochener Körner erkennbar. Es scheint keine entscheidende Rolle zu spielen ob die Gesteine der Kategorie C70/10 in den feineren (< 8 mm) oder gröberen (> 8 mm) Anteilen vertreten sind; die gemessenen Mikrodehnungen (bei einer Million Lastwechsel) der Mischungen K3 und K4 unterscheiden sich um 11. Bei einer Vergleichspräzision von ca. $r = 5$ sind die beiden Werte als «knapp unterschiedlich» zu betrachten.

3.4 Einfluss der Mischzeit

Der Einfluss der Dauer des Mischprozesses, in welchem sich das neue Bindemittel mit demjenigen aus dem RAP verbindet, war nicht Gegenstand der ursprünglichen Aufgabenstellung. Um einen Anhaltspunkt bezüglich der Relevanz der Mischdauer für die weiteren Arbeiten im Projekt abschätzen zu können, wurden zwei identische Mischungen mit unterschiedlicher Mischdauer gemischt und untersucht.

Die Untersuchung wurde in einem Labormischer durchgeführt, die gewählten Mischdauern haben keinen Bezug zu den Mischdauern, welche in einer Aufbereitungsanlage Anwendung finden. Als Mischdauer wurde das Zeitintervall zwischen der Zugabe des frischen Bindemittels und der Entnahme des Mischgutes aus dem Mischer festgelegt.

Es wurde folgender Ablauf des Mischprozesses gewählt:

- Mischer und frische Gesteinskörnungen auf 185 °C vorgewärmt; frisches Bitumen auf 175 °C; RAP bei Raumtemperatur.
- Gesteinskörnungen und RAP in den Mischer geben und solange mischen, bis das Gemisch eine Temperatur von 190 °C erreicht hat (ca. 80 Minuten).
- Bitumen zugeben und gewählte Mischdauer (40 bzw. 200 Sekunden) durchmischen.
- Mischgut aus Mischer entnehmen.

Bei der Mischung K5 betrug die Mischdauer 40 Sekunden, bei der Mischung K6 200 Sekunden; die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Tabelle 12 zusammengefasst.

Die Unterschiede beim Modul sowie bei der Beständigkeit gegen Ermüdung sind marginal und bedeutungslos. Daraus kann gefolgert werden, dass die Mischdauer (im untersuchten Bereich zwischen 40 und 200 Sekunden) ohne Rücksicht auf die mechanischen Eigenschaften derart gewählt werden kann, dass ein homogenes Mischgut entsteht.

Im Vergleich zur Mischung K2, welche bezüglich der Kornform der verwendeten Gesteinskörnungen ähnlich ist, gibt es Unterschiede. Die Penetration des rückgewonnenen Bindemittels liegt höher; das Modul und die Beständigkeit gegen Ermüdung hingegen tiefer. Diese Feststellung unterstreicht den dominanten Einfluss der Bindemiteleigenschaften.

Mischungen AC EME C2 mit unterschiedlichen Mischzeiten

	IMP Nr.	Kategorie der Gesteine im Mischgut	Bin- dem. Gehalt [%]	Holraum- gehalt Marshall [Vol.-%]	Penetra- tion [1/10mm]	Modul [MPa]	Ermü- dung [μs]
K5	22- 04248	aus RAP: 70 % mit C70/10	5.25	1.6	17	15'741	149
K6	22- 04619	frische GK: 30 % mit C90/1	5.67	2.5	16	16'419	154

Tabelle 12: Ergebnisse der beiden Mischungen AC EME C2 mit unterschiedlichen Mischzeiten; K5 40 Sekunden / K6 200 Sekunden

3.5 Einfluss der Zugabemenge an RAP

Nachdem an Modellmischungen mit unterschiedlichen Anteilen an Rundkorn Untersuchungen durchgeführt wurden (Kapitel 3.3), sind im Folgenden Mischungen geprüft worden, welche mit RAP hergestellt wurden. Es wurden Mischungen des Typs EME C1 ausgewählt, da im Unterschied zum Typ C2 beim C1 der Bindemittelgehalt niedriger ist. Dadurch kann weniger Frischbitumen zudosiert werden und somit können die Eigenschaften des resultierenden Bindemittels weniger stark beeinflusst werden. Der Typ C1 ist so betrachtet kritischer als der Typ C2.

Es wurden zwei Mischungen mit 60 (K7) bzw. 100 % (K8) RAP im Labor hergestellt; die Zusammensetzung sowie die Ergebnisse der Laborprüfungen sind in der Tabelle 13 aufgeführt. Die Mischung K7 (60 % RAP) entspricht etwa der höchsten zurzeit in der Praxis zudosierten Menge an RAP. Nachdem die Ergebnisse dieser Mischung die Anforderungen erfüllten, wurde eine «Extrem-Variante» mit 100 % RAP untersucht.

Untersuchungsergebnisse der Mischungen K7 und K8

		Mischung		Anforderungen
		K7	K8	
Rezeptur	IMP Nr.	22-04872	22-06731	
	Anteil RAP [Masse-%]	60	99.5	
	Anteil Frischbitumen B10/20 [Masse-%]	2.6	0.5	
	Kategorie der zudosierten Gesteinskörnungen	C 90/1		
Laborprüfungen	Löslicher Bindemittelgehalt [Masse-%]	4.94	4.69	≥ 4.6 ¹⁾
	Penetration rückgewonnenes Bitumen [1/10 mm]	15	20	
	EP RuK rückgewonnenes Bitumen [°C]	71.6	66.6	
	Module de richesse	3.2	2.8	≥ 2.7
	Hohlraumgehalt Marshall [Vol.-%]	4.6	2.2	3.0 ... 6.0
	Siebdurchgang 0.063 mm [Masse-%]	7.3	11.3	4 ... 10
	Siebdurchgang 1.0 mm [Masse-%]	18.0	26.7	14 ... 31
	Siebdurchgang 2.0 mm [Masse-%]	24.7	35.5	20 ... 41
	Siebdurchgang 4.0 mm [Masse-%]	40.4	47.2	31 ... 54
	Siebdurchgang 8.0 mm [Masse-%]	64.5	69.0	
	Siebdurchgang 11.2 mm [Masse-%]	77.7	79.4	58 ... 81
	Siebdurchgang 22.0 mm [Masse-%]	100	100	90 ... 100
	Modul [MPa]	17'600	16'570	$\geq 11'000$
	Ermüdung [μ s]	135	149	≥ 100

1) Die Anforderung an den dosierten Bindemittelgehalt beträgt ≥ 4.6 Masse-%

Tabelle 13: Zusammensetzung und Untersuchungsergebnisse der Mischungen K7 und K8 sowie Gegenüberstellung zu den Anforderungen der SN EN 13108-1.

Bei der Mischung K8 (100 % RAP) liegt der Füllergehalt oberhalb des in der Norm festgelegten Sollwertbereich, dadurch liegt der Hohlraumgehalt Marshall mit 2.2 Vol.-% zu tief. Diese Feststellung steht in Zusammenhang mit dem verwendeten RAP und ist nicht allgemeingültig. In der Praxis wird das Asphaltgranulat in verschiedene Fraktionen aufgeteilt, um präziser rezeptieren zu können.

Auch die Eigenschaften der rückgewonnenen Bindemittel, insbesondere der Mischung K8 (100 % RAP), ist im Zusammenhang mit der niedrigen Penetration des Bitumens im RAP (21 1/10 mm) zu sehen (Tabelle 3).

Sowohl die Mischung mit 60 % RAP (K7) wie auch diejenige mit 100 % RAP (K8) erfüllen die Anforderungen an das Modul und an die Ermüdungseigenschaft. Tendenziell

erkennt man den Einfluss der Bindemittelhärte: K7 - mit dem härteren Bitumen - hat ein höheres Modul und eine geringere Ermüdungsbeständigkeit als K8.

Die Untersuchungen zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, die Anforderungen an das Modul und das Ermüdungsverhalten mit 100 % RAP zu erfüllen. Einschränkend ist hier folgendes zu bemerken:

- Die Untersuchungen wurden mit einer einzigen RAP-Qualität durchgeführt.
- Die Prüfungen wurden bei den vorgeschriebenen Temperaturen von 15 °C für das Modul und von 10 °C für die Ermüdungsbeständigkeit durchgeführt. Das Verhalten bei tiefen Temperaturen (Kälteverhalten) sowie bei hohen Temperaturen wurde nicht untersucht.

Trotz den aufgeführten Einschränkungen haben die Untersuchungen aufgezeigt, dass sehr hohe Dosierungen an RAP möglich sind. Ob dies in der Praxis wirtschaftlich umgesetzt werden kann, ist eine verfahrenstechnische Frage, welche an dieser Stelle nicht behandelt wird.

Der grosse Einfluss der Eigenschaften des RAP unterstreicht die hohe Bedeutung von Voruntersuchungen des RAP.

4 TP 2 Einfluss diverser Zusätze

4.1 Vorgehen, Methodik

Die im TP 1 mit hohen Dosen an RAP erreichten Werte für das Modul und die Ermüdung könnten den Schluss zulassen, dass keine weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erforderlich sei. Hierbei ist zu bedenken, dass das verwendete RAP eine Penetration von 21 1/10 mm aufwies. Es ist daher davon auszugehen, dass in der Praxis durchaus auch weichere RAP zur Anwendung kommen können, dies in Abhängigkeit von den verwendeten Bitumensorten im Neuzustand. So liegt beispielsweise die Penetration des RAP in Südfrankreich regelmässig bei 5 1/10 mm, da bereits im Neubau sehr harte Bindemittel zum Einsatz kommen.

Das Bindemittel eines RAP ist in der Regel weicher als das Zielbitumen eines EME-Mischgutes. Infolge der anvisierten, hohen Dosierung an RAP, verbleiben geringe Mengen an frisch zudosiertem Hart-Bitumen, mit welchem das zu weiche Bitumen des RAP korrigiert werden kann. Mit der Verwendung entsprechender Zusätze ist es möglich, eine Verhärtung des Bitumengemisches (Bitumen aus RAP und frisch zudosiertes Bitumen) zu erreichen. Daher wird der Einfluss diverser Zusätze untersucht; nicht nur bezüglich der Verhärtung des Bitumengemisches, sondern insbesondere auch bezüglich der mechanischen Eigenschaften des EME-Mischgutes.

4.2 Wahl der Zusätze / Bindemittel

Zusätze und Bindemittel für die weiteren Mischungen

Nr. der Mischung	Bindemittel bzw. Zusatz
K 9	PmB HM I
K 11	Gummi-Granulat
K 12	PmB HM II
K 13	Referenzmischung mit B 10/20
K 14	Additiv I
K 15	Gilsonite USA
K 17	Additiv II

Tabelle 14: Wahl der Zusätze und Bindemittel für die 7 EME-Mischungen

Bemerkungen zu den «fehlenden» Nummern:

- K10: Diese Mischung besteht aus 50 % runden Gesteinskörnern und wurde im Teilprojekt TP1 verwendet.
- K16: Die Nr. K 16 war ursprünglich für die direkte Zugabe eines Polymers in den Asphalt-Mischer vorgesehen. Detaillierte Abklärungen mit dem Lieferanten ergaben jedoch, dass die Zugabe von Polymeren direkt in das Mischgut nicht optimal sei; diese Variante wurde daher nicht umgesetzt.

Im Folgenden werden die Zusätze wie folgt beschrieben:

- PmB HM I (IMP-Nr. 22-09154)

Das PmB HM I ist ein polymermodifiziertes Bindemittel mit hohem Polymeranteil sowie viskositätsverändernden Zusätzen. Es wurde zur Anwendung für hochstandfeste Tragschichten sowie Gussasphalt konzipiert und entspricht einem PmB E 10/40-80.

Eigenschaften des PmB HM I

Eigenschaft	Einheit	Spezifikation	Gemessener Wert
Penetration 25 °C	[1/10mm]	10 ... 40	33
Erweichungspunkt RuK	[°C]	>80	97
Elastische Rückstellung	[%]	>75	79
Brechpunkt Fraass	[°C]	< -5	

Tabelle 15: Eigenschaften des PmB HM I

- Gummi-Granulat (IMP Nr. 23-02912)

Beim verwendeten Gummi-Zusatz handelt es sich um ein Gummipulver aus recycelten Reifen. In Absprache mit dem Lieferanten wurden 0.4 Masse-% Gummipulver (bezogen auf das Mischgut) beigemischt; der Füllergehalt wurde entsprechend um 0.4 Masse-% reduziert. Als Basis-Bitumen wurde das gleiche B 10/20 verwendet, welches im Projekt auch bei anderen Mischungen verwendet wurde.

Das Gummipulver wurde im Trockenverfahren bei 175 °C (Temperatur Gesteine und RAP) direkt in den Labormischer zugegeben, wobei die Mischzeit 60 Sekunden betrug. Im Anschluss an den Mischprozess wurde das Mischgut während 30 Minuten in einem Wärmeschrank (140 °C) gelagert, um die Reifung zu ermöglichen.

Aufgrund einer Entscheidung des Bundesamtes für Umwelt BafU werden Gummi-Zusätze im Asphalt vom ASTRA nicht mehr zugelassen (Mikroplastik-Problematik). Aus diesem Grund wurde die Mischung K11 nur beim TP2 untersucht und für die weiteren Untersuchungen nicht verwendet.

- PmB HM II (IMP-Nr. 23-03401)

Das PmB HM II ist ein handelsübliches, polymermodifiziertes, viskositätsverändertes Bitumen PmB Typ E 10/40-80 gemäss EN 14023 mit erhöhtem Polymergehalt zur Anwendung in EME-Belägen unter Verwendung von Asphaltgranulat.

Eigenschaften des PmB HM II

Eigenschaft	Einheit	Spezifikation	Gemessener Wert
Penetration 25 °C	[1/10mm]	10 20	17
Erweichungspunkt RuK	[°C]	≥ 80	101.5
Elastische Rückstellung	[%]	≥ 80	73
Brechpunkt Fraass	[°C]	≤ -5	
BTSV T _{BTSV}	[°C]	70	
δ @ (T _{BTSV})	[°]	57	

Tabelle 16: Eigenschaften des PmB HM II

- Additiv I

Die Hauptfunktion des niedrigviskosen Additivs besteht darin die Vernetzung der verschiedenen Komponenten des Bitumens zu fördern. Somit kann sowohl die Verarbeitungstemperatur gesenkt werden, als auch die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Zusammen mit dem Bitumen bildet sich ein elastisches Polymernetzwerk. Das Additiv eignet sich zur Zugabe in den Asphaltmischer einer Aufbereitungsanlage.

- Gilsonite (USA)

Gilsonite ist ein natürlich vorkommendes Bitumen aus der Region Utah (USA). Es besteht zu 99 % aus Kohlenwasserstoff und enthält keine Fülleranteile. Seine sehr harten Eigenschaften (EP RuK 160 ... 185 °C) werden zur Erhöhung der Standfestigkeit von Asphalten verwendet; bei EME-Mischgut mit hohen RAP-Anteilen senkt Gilsonite die Penetration des resultierenden Bindemittels.

- Additiv II

Bei diesem Additiv handelt es sich um ein Elastomer, welches in Form von Pellets direkt in den Mischer einer Aufbereitungsanlage zu gegeben wird. Die Temperatur des Mischgutes soll zwischen 160 und 180 °C liegen, damit die Pellets, welche einen Schmelzpunkt zwischen 90 und 130 °C besitzen, geschmolzen werden. Das Produkt erhöht gleichzeitig den Erweichungspunkt RuK wie auch die elastische Rückstellung. Im Mischgut führt das Produkt gemäss Angaben des Herstellers, zu einer Verbesserung der Kälteeigenschaften und des Ermüdungsverhaltens, bei gleichzeitiger Reduktion der Spurbildung.

4.3 Rezepturen der untersuchten Mischungen

4.3.1 Wahl der EME Sorte

Beim EME-Mischgut sind zwei Typen (C1 und C2) normiert, welche sich vor allem bezüglich des Bindemittel- und Hohlraumgehaltes unterscheiden. Beim EME C2 liegt der Bindemittelgehalt deutlich höher (≥ 5.2 Masse-%) als beim C1 (≥ 4.6 Masse-%). Bei der Zugabe hoher RAP-Dosierungen ist es beim EME C2 einfacher die resultierenden Bindemittelleigenschaften zu beeinflussen, da mehr frisches Bindemittel zugemischt wird als beim EME C1.

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Zusätze wurde das Mischgut EME C1 gewählt, da in diesem Fall die Herausforderungen grösser sind.

4.3.2 Rezepturen der Mischungen

Für sämtliche Mischungen wurde sowohl ein identischer Anteil RAP, wie auch gleichbleibende Korngrössenverteilung und Bindemittelgehalt angestrebt. Falls die Mischgutkontrollen zu grosse Abweichungen zeigten, wurde die Herstellung im Labormischer wiederholt. Eine typische Korngrössenverteilung ist in Abbildung 10 dargestellt.

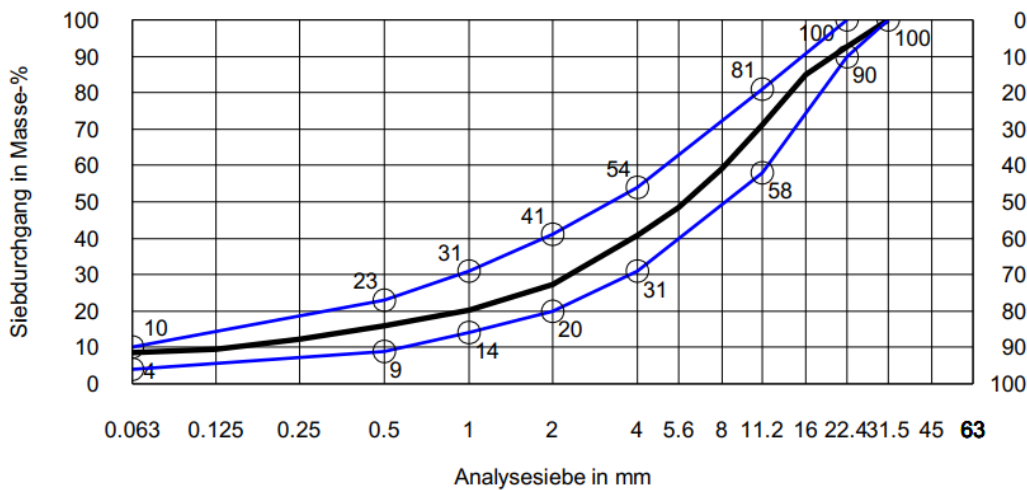


Abbildung 10: Typische Korngrößenverteilung KGV der untersuchten Mischungen AC EME C1

4.3.3 Mischgutherstellung und Kontrolle

Die Dosierung der Zusätze erfolgte gemäss Angaben der entsprechenden Lieferanten. Trotz der konstanten Dosierung an RAP ergaben sich beim löslichen Bindemittelgehalt gewisse Schwankungen, welche auf Inhomogenitäten im RAP zurückzuführen waren. Der mittlere lösliche Bindemittelgehalt beträgt 5.4 Masse-%; die Bandbreite zwischen minimalem und maximalem Wert beträgt – 0.20 bis + 0.27. Diese Streuung wurde als akzeptabel beurteilt. Der Bindemittelanteil aus dem RAP wird in Tabelle 10 konstant angegeben, obwohl dieser aufgrund der erwähnten Inhomogenitäten im RAP relativ grossen Schwankungen unterworfen war. Das EME-Mischgut aller Mischungen könnte auch als Typ C2 angesehen werden, trotzdem wird aufgrund der Zielsetzung an der Bezeichnung C1 festgehalten.

Rezepturen und Mischgutuntersuchungen des im Labor gemischten Mischgutes											
Misch- ung	IMP Nr.	Rezept					Untersuchung				
		Bindemittel- gehalt		Zu- satz	RAP	KGV	lösl. Binde- mittel- gehalt	rückgewonnens Bindemittel			HR Mars- hall
		aus RAP	zudo- siert	zudo- siert	An- teil			Pe- netra- tion	EP RuK	PI	Hohl- raumg.
		[Masse-% auf Misch- gut bezogen]					[Masse- %]	[1/10 mm]	[°C]		[Vol.- %]
K9	22-09153	2.86	2.44	-	70 Masse-%	Standard EME 22 C1	5.25	22	70.4	1.1	3.2
K11	23-02912	2.86	2.04	0.4			5.20	12	71.2	0.1	2.0
K12	24-07748	2.86	2.44	-			5.37	14	84.0	2.1	2.4
K13	24-10252	2.86	2.44	-			5.27	17	67.8	0.2	2.3
K14	25-00099	2.86	2.44	0.07			5.68	16	73.0	0.9	2.1
K15	25-00144	2.86	2.06	0.26			5.52	12	85.0	1.9	2.2
K17	285-00015	2.86	1.86	0.3			5.54	17	72.0	0.8	2.4

Tabelle 17: Rezepturen und Mischgutuntersuchungen des im Labor gemischten Mischgutes

Die Werte der Standard-Untersuchungen des rückgewonnenen Bindemittels liegen im zu erwartenden Bereich. Es fällt allerdings auf, dass lediglich bei den Mischungen K12 (HM II) und K15 (Gilsonite) der Penetrationsindex PI etwas erhöht ist. In der Regel zeigen hoch modifizierte Bindemittel einen höheren Wert für den Penetrationsindex PI.

Die Hohlraumgehalte Marshall sind relativ tief; da sie jedoch sehr nahe beieinander liegen, spielt dies für den relativen Vergleich der diversen Mischungen keine entscheidende Rolle.

Es fällt auf, dass bei der Mischung mit Gummigranulat (K11) sowohl der Hohlraumgehalt Marshall wie auch der Bindemittelgehalt die tiefsten Werte zeigen. Dieser Widerspruch ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Gummipulver im Kontakt mit heissem Bitumen quillt (Reifeprozess) und somit den Hohlraumgehalt senkt.

4.4 Steifigkeit und Ermüdung

Steifigkeit und Ermüdungsverhalten wurden mit den Prüfverfahren am trapezförmigen 2-Punkt-Biegebalken gemäss den Normen SN EN 12697-26 und SN EN 12697-24 untersucht.

Ergebnisse der Bestimmung der Steifigkeit (Modul) und des Ermüdungsverhaltens

		Zusammensetzung Mischgut					rückgew. Bindemittel		Steifigkeit	Ermüdung
Mischung	IMP Nr.	Mischgut	RAP	Bindemittel	Zusatz	Bemerkungen	Pen [1/10 mm]	EP RuK [°C]	[MPa]	
K9	22-09153	AC EME 22 C1	70 %	HM I	-		22	70.4	15365	175
K10	22-09613	AC EME 22 C2	0	B10/20	-	50 % Rundkorn	12	71.2	18242	141
K11	23-02912	AC EME 22 C1	70 %	B10/20	Gummi		15	72.4	18238	149
K12	24-07748	AC EME 22 C1	70 %	HM II	-		14	84.0	16791	158
K13	24-10252	AC EME 22 C1	70 %	B10/20			17	67.8	15945	144
K14	24-14683-1	AC EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv I		16	73.0	13596	160
K15	24-14678-1	AC EME 22 C1	70 %	B 10/20	Gilsonite		12	85.0	16894	156
K17	25-00015-1	AC EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv II		17	72.0	14159	157

Tabelle 18: Ergebnisse der Bestimmung der Steifigkeit (Modul) und des Ermüdungsverhaltens

Aus den in der Tabelle 11 zusammengefassten Ergebnissen lassen sich untenstehende Folgerungen ableiten:

Steifigkeit:

- Alle Mischungen erfüllen die Anforderung der Norm ($\geq 11'000$ MPa) für die Mischgutsorte AC EME C1; ausser der Mischung K14 auch die Anforderung für den EME-Typ C2 ($\geq 14'000$ MPa)

- Die grössten Werte ($> 18'000$ MPa) werden von der Mischung K10 mit 50 % Rundkorn und der Mischung K11 mit Gummizusatz erreicht. Bei der Mischung K10 ist zu erwähnen, dass es sich um den einzigen EME-Typ C2 handelt. Diese Mischung weist beim rückgewonnenen Bindemittel die tiefste Penetration (12 1/10 mm) aus. Dieses Ergebnis unterstreicht die dominante Rolle der Binde-mittleigenschaft bei der Bestimmung der Steifigkeit (Prüftemperatur von $15\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Die mittlere Gruppe ($> 15'000$ Mpa) wird von den Mischungen K 9 (PmB HMI), K 12 (PmB HMII), K13 (B 10/20) und K 15 (Gilsonite) gebildet.
- Die beiden Mischungen mit Additiven K 14 und K 17 erreichen die vergleichsweise niedrigsten Werte; sie liegen mit 13'596 und 14'159 innerhalb der Wiederholpräzision von $2 r = 670$ Mpa.

Ermüdung:

- Alle Mischungen erfüllen die Normanforderungen sowohl für den EME-Typ C1 (≥ 100) als auch für den Typ C2 (≥ 130) deutlich.
- Die Mischung K 9 (PmB HMI) erreicht mit Abstand den grössten Wert (175).
- Die Mischungen K 12 (PmB HMII), K14 (Additiv I), K15 (Gilsonite) und K17 (Additiv II) liegen innerhalb einer Bandbreite von 160 ± 5 . Bei einer Wiederholpräzision von $r = \text{ca. } 5$ sind diese Mischungen bezüglich der Ermüdungseigenschaften als gleichwertig zu betrachten.
- Die Mischungen K 10 (50 % Rundkorn), K 11 (Gummi) und K13 (B 10/20) liegen innerhalb einer Bandbreite von 145 ± 5 auf vergleichbarem Niveau.
- Dass die Mischungen mit dem harten Strassenbaubitumen B 10/20 die tiefsten Werte erreichen, war zu erwarten. Es überrascht, dass K15 mit Gilsonite in der Gruppe der Additive und PmB liegt.

Gesamtbeurteilung (Steifigkeit und Ermüdung):

- Die Tendenz, dass hohe Steifigkeitswerte mit niedrigen Ermüdungswerte einhergehen, wird bestätigt; so weisen zum Beispiel K10 und K11 die höchsten Module aus und gehören gleichzeitig zur Gruppe der niedrigsten Ermüdungswerte.
- K 9 (PmB HMI) fällt mit einem sehr hohen Ermüdungswert und einem Modul deutlich oberhalb der Norm-Anforderungen auf.
- Da je nach Verwendung einer EME-Schicht mehr Wert auf die Steifigkeit oder auf den Widerstand gegenüber Ermüdung gelegt wird, kann keine generell gültige Gesamtbeurteilung durchgeführt werden. An dieser Stelle sei der Hinweis angebracht, dass allzu hohe Steifigkeitswerte im Hinblick auf das Kälteverhalten möglicherweise problematisch sein können.
- Es kann festgehalten werden, dass PmB und Zusätze (K9, K12, K14, K15, K17) auch EME-Mischgut mit bereits guten Werten (K13) noch weiter verbessern können.

5 TP 3 Andere potenziell kritische Eigenschaften

5.1 Vorgehen, Methodik

Die bei EME-Mischgut normierten Prüfungen der Steifigkeit und des Ermüdungsverhaltens liefern wichtige Angaben zu den Eigenschaften des Mischgutes, sie vermögen jedoch nicht das Praxisverhalten vollumfänglich abzubilden. Die normierten Prüfungen liefern keine Hinweise zu folgenden Themen:

- Verhalten bei hohen Temperaturen:

Da beide Prüfverfahren bei relativ niedrigen Temperaturen durchgeführt werden (Steifigkeit bei +15 °C und Ermüdung bei +10 °C), kann das Wärmeverhalten von EME-Belägen mit den heutigen Prüfverfahren nicht abgebildet werden. Auch der bei Typprüfungen gemäss SN EN 13108-20 geforderte Spurbildungstest (SN EN 12697-22, mit grossem Rad) ist keine aussagekräftige Prüfung (siehe dazu Kapitel 5.2.1).

Als «andere kritische Eigenschaft» steht an erster Stelle das Verhalten des Asphaltes bei sommerlich hohen Temperaturen.

- Kälteverhalten:

Die bei den EME-Belägen verwendeten harten Strassenbaubitumen (SN EN 13924-1) führen in der Praxis zu Problemen bei höher gelegenen Strassenbelägen; aus diesem Grund verzichtet das ASTRA zur Zeit auf EME-Mischgut oberhalb von 700 müM. Analog zum Wärmeverhalten wird auch das Verhalten bei winterlichen tiefen Temperaturen in den Anforderungen an EME-Belägen nicht aufgeführt. Es besteht in dieser Fragestellung Handlungsbedarf. Da ein diesbezügliches anderes Forschungsprojekt in Bearbeitung ist (Verbesserung des Kälteverhalten von Hochmodul-Asphalt EME; TRU_20_01F_01), wird das Kälteverhalten im vorliegenden Projekt nicht behandelt.

- Rissfortpflanzung:

Die Entstehung eines Risses wird in der Prüfung des Ermüdungsverhaltens angesprochen. Zur Untersuchung des Widerstandes eines EME-Belages gegenüber der Ausbreitung eines bereits entstandenen Risses sind keine Publikationen bekannt.

In Absprache mit der Begleitkommission wurde festgelegt, dass die Rissfortpflanzung zu untersuchen sei.

5.2 Einaxialer Druck-Schwellversuch (DSV)

5.2.1 Definition neuer Prüfbedingungen

Der einaxiale Druck-Schwellversuch DSV wird seit ca. 40 Jahren zur Beurteilung des Verformungswiderstandes von Asphalt angewendet (Schellenberg K. 2008; Plachkova P. 2020) und findet auch in der Schweiz seit vielen Jahren Anwendung (Angst 2006, 2014).

Dass DSV deutlich aussagekräftiger als Spurbildungsversuche sind, wurde bereits 2006 publiziert (Angst 2006). Aus der erwähnten Publikation stammt der in Abbildung 11 dargestellte Vergleich der Ergebnisse des Spurbildungstestes mit grossem Rad (SN EN 12697-22) mit denjenigen des DSV. Während beim Spurbildungstest alle Proben die Anforderungen an hochbelastete Strassen erfüllen, zeigen die Mischungen mit weichen Bindemitteln ein deutlich schlechtes Verhalten im DSV. Es fällt auf, dass aufgrund der Ergebnisse des Spurbildungstestes sogar Asphalt mit Strassenbaubitumen B 70/100 für hochbelastete Objekte geeignet wären, was nicht im Einklang mit praktischen Erfahrungen ist.

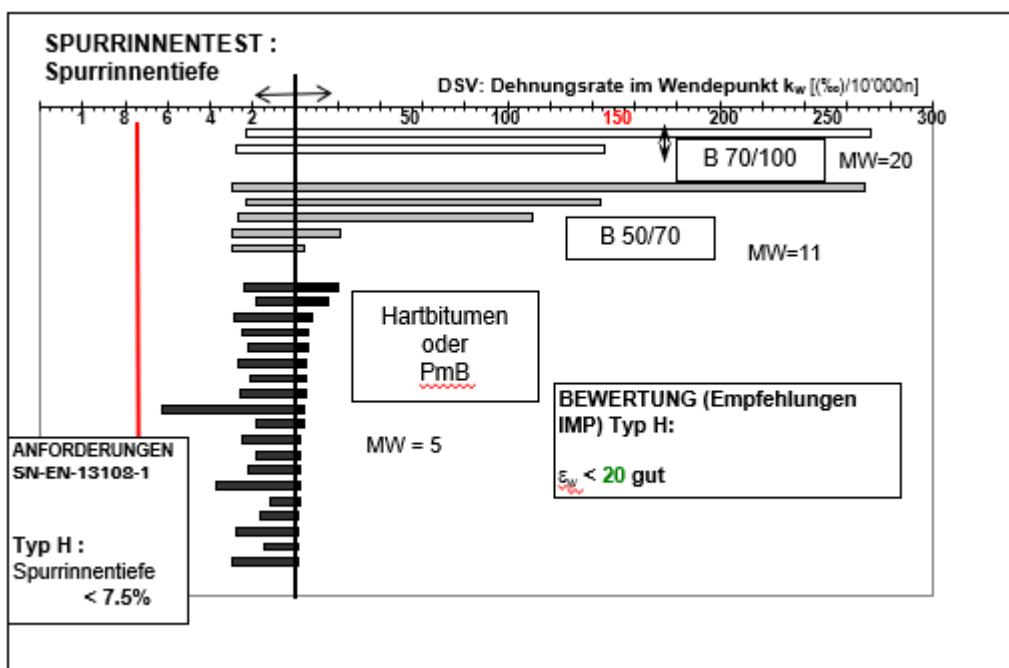


Abbildung 11: Vergleich des DSV mit dem Spurrinntest bei gleichen Mischgutproben (Quelle: Angst 2006).

Beim DSV wird eine sinusförmige Belastung bei 50 °C auf planparallel geschliffene Asphalt-Prüfkörper aufgebracht. Die Prüfbedingungen wurden seit seiner Einführung etwas verschärft, indem die Oberlast, welche ursprünglich für AC-Deckschichten mit 0.2 N/mm² niedriger war als für Tragschichten (0.35 N/mm²), für alle Mischgutsorten auf 0.35 festgelegt wurde. Der DSV ist im Nationalen Anhang zur EN 12697-25 beschrieben, wobei die Schweiz die deutschen Prüfbedingungen übernahm.

Während in der Schweiz für die Herstellung von PK im Labor seit der Einführung des DSV die Gyrator-Verdichtung [SN EN 12697-31] verwendet wurde, wurden in Deutschland bis 2018 (letzte Revision der TP (TP Asphalt-StB. Teil 25; 2022) Marshall-Prüfkörper MPK [SN EN 12697-30] verwendet. Es ist bekannt (Angst 1982), dass MPK

einen höheren Verformungswiderstand als Bohrkerne aus Strassen aufweisen, daher werden nun in der deutschen Technischen Prüfvorschrift TP Bohrkerne aus im Labor verdichteten Platten [SN EN 12697-33] verwendet. Dieses Verfahren hat zwar den Vorteil, dass die Mantelfläche der Probekörper eine Schnittfläche ist (analog zu Bohrkerne aus einer Strasse), jedoch den Nachteil eines deutlich grösseren Aufwandes und einer Einschränkung der Anwendbarkeit der Prüfung auf ein Maximalkorn von 16 mm. Die Einschränkung auf 16 mm ist in der Geometrie der Probekörper begründet, denn die TP [TP Asphalt-StB. Teil 25: 2022] legt den Durchmesser der Probekörper auf 100 mm fest. Die Schweiz hat ein pragmatischeres Vorgehen gewählt und lässt auch Gyrtor-Probekörper mit Ø 150 mm zu. Somit können in der Schweiz auch Tragschichten mit dem DSV untersucht werden.

Zur Auswertung der Prüfung wird die Gesamtaxialdehnung des Probekörpers in Funktion der Anzahl Belastungszyklen (Kriechkurve) aufgezeichnet (siehe Abbildung 12). Typischerweise besteht diese Kurve aus drei Phasen: in der ersten Konsolidierungsphase nimmt die Steigung der Kurve kontinuierlich ab. In der zweiten Phase ist die Steigung der Kurve praktisch konstant, man spricht von der linearen Phase, in welcher sich der Wendepunkt befindet. In der dritten und letzten Phase nimmt die Steigung kontinuierlich zu. Als wichtigstes Kriterium zur Beurteilung einer untersuchten Probe gilt die Steigung der Kurve im Wendepunkt, dessen Bestimmung in SN EN 12697-24 detailliert beschrieben ist. Die Prüfung wird beim Überschreiten einer Dehnung von 40 ‰ oder nach 10'000 Zyklen beendet.

Es werden folgende Kennwerte angegeben:

n	Anzahl der Belastungszyklen [-] Beim Auftreten eines Wendepunktes, beim Erreichen einer Dehnung von 40 ‰ (Abbruchkriterium) oder nach 10'000 Zyklen
ϵ_n	Dehnung nach n Zyklen [‰]
ϵ_n^*	Dehnungsrate nach n Zyklen [‰ / 10 ⁴ Zyklen]

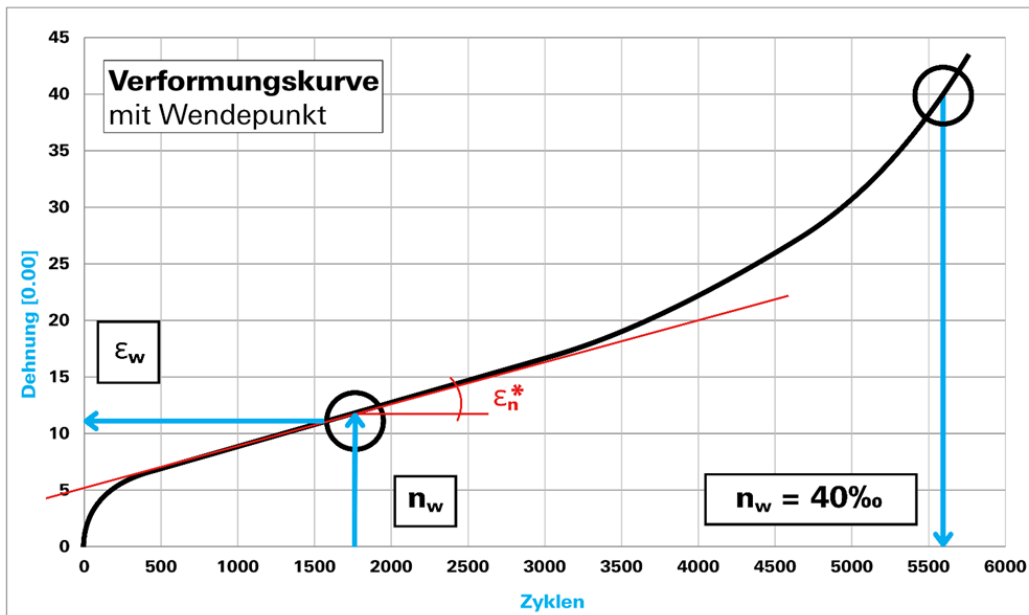


Abbildung 12: Typische Verformungskurve im Druckschwellversuch (Quelle: imp Bauwissen; Mpdul 3)

Die Erfahrungen zeigen, dass die Prüfbedingungen bei hochstandfesten Mischgut-sor-ten, wie beispielsweise einem EME, zu wenig aussagekräftig sind. Daher wurde in einer Forschungsarbeit (Radenberg et al 2024) eine Verschärfung der Prüfbedingungen un-tersucht, indem die Prüftemperatur erhöht und auch die Dauer der Belastungszyklen vergrößert wurde. In der erwähnten Arbeit von Radenberg wurden die verschiedenen Belastungsregime nacheinander aufgebracht, wobei ein Regime über 3000 Lastzyklen aufgebracht wurde, bevor das nächste Regime aufgebracht wurde; siehe Abbildung 13.

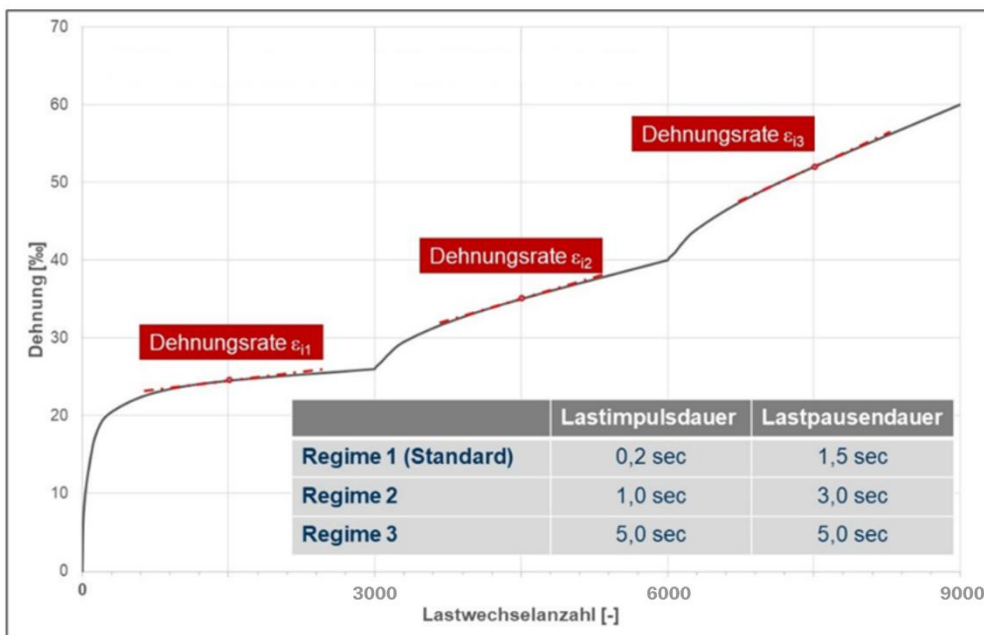


Abbildung 13: Belastungszyklen und fiktives Prüfergebnis für die Bestimmung des Verformungswiderstandes von Asphalt (Quelle: in Anlehnung an Radenberg et al 2024)

Der Einfachheit halber wurde im Folgenden nur das letzte der drei Belastungsregime gewählt und für die gesamte Prüfdauer angewendet. Dieses Vorgehen ist nicht nur einfacher, sondern führt auch zu einer grösseren Belastung der Probekörper, was zur grösseren Aussagekraft der Prüfung beiträgt. In der Tabelle 19 sind die modifizierten Prüfbedingungen den standardisierten gegenübergestellt.

Vergleich der Prüfbedingungen

Prüfbedingungen	Temperatur [°C]	Unter-Last [N/mm ²]	Ober Last [N/mm ²]	Last-Impuls [s]	Pause [s]	Maximale Anzahl Zyklen
SN EN 12697-25	50	0.025	0.35	0.2	1.5	10'000
modifiziert	60	0.025	0.35	1.0	3.0	10'000

Tabelle 19: Vergleich der normierten mit den modifizierten Prüfbedingungen

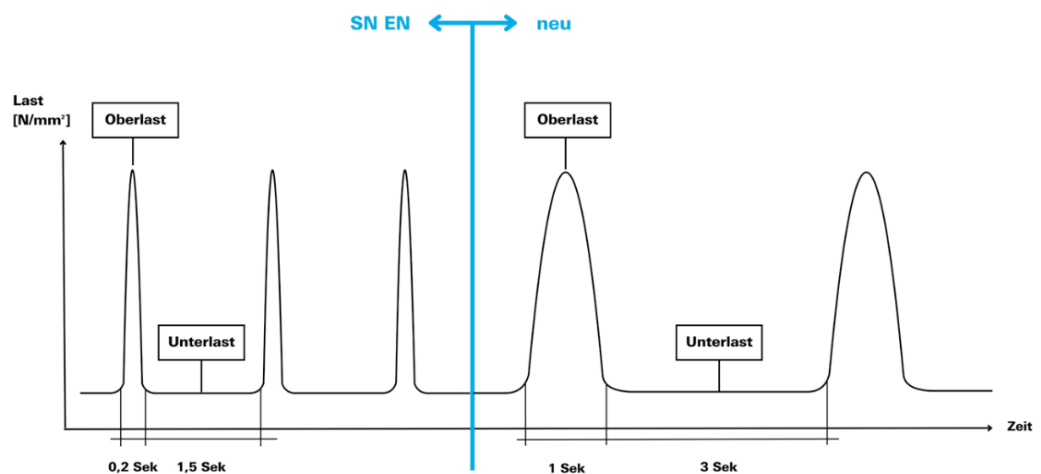


Abbildung 14: Grafische Darstellung des Vergleichs neuer zu alten Beanspruchungszyklen.

5.2.2 Validierung der neuen Prüfbedingungen

In einem ersten Schritt wurden die neuen, ausgewählten Belastungszyklen bei zwei unterschiedlichen Prüftemperaturen (50 °C und 60 °C) angewendet, die Ergebnisse sind in der Tabelle 20 zusammengefasst.

Vergleich neue Belastung bei 50 / 60 °C

IMP Nr.	Mischgut	Bindemittel	neue Belastungszyklen bei 50 °C			neue Belastungszyklen bei 60 °C		
			n [-] / nw	ε_n [%]	ε_n^* [%/10 ⁴ Zyklen]	n [-] / nw	ε_n [%]	ε_n^* [%/10 ⁴ Zyklen]
23-02912	AC EME C1	B 10/20	10000	12	2	10000	21	6
23-03389	AC EME C1	B10/20	10000	15	2	10000	10	2
24-12306	AC T 22 H	PmB -E 45/80-65	10000	8	2	10000	14	3
24-12353	AC B 16 H	PmB-E 45/80-65	10000	6	1	10000	6	1
24-12781	AC T 22 S	B 50/70	485	14	156	175	12	394
24-12791	AC B 22 H	PmB- 45/80-65	1267	12	24	425	11	119
Mittel- werte			6959	11	31	6767	12	88

rot: Abbruchkriterium bei allen Prüfkörpern der Serie erreicht (zu grosse Dehnung)

Tabelle 20: Ergebnisse der Prüfungen mit den verlängerten Belastungszyklen bei zwei verschiedenen Temperaturen

Für diese Untersuchung wurden Proben verwendet, welche aus anderen Projekten vorlagen. Die Sorte des Mischgutes spielte bei der Auswahl keine Rolle, mit der Auswahl unterschiedlicher Bindemittel wollte man hingegen Unterschiede im Verformungswiderstand vertreten wissen.

Die Bildung des Mittelwertes über derart unterschiedliche Proben lässt sich mit dem Ziel der Untersuchung rechtfertigen: es ging lediglich darum, die unterschiedlichen Prüftemperaturen bei unterschiedlichen Proben zu validieren.

Aus den Ergebnissen können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Bei sehr harten Mischgutsorten wie AC EME scheint eine Erhöhung der Temperatur auf 60 °C zu keinen relevanten Unterschieden im Prüfergebnis zu führen.
- Bei den PmB E 45/80-65 sind die Unterschiede in 2 Fällen unerheblich, in einem Fall sehr gross (Vervierfachung der Steigung sowie 3 Mal weniger Zyklen bis zum Wendepunkt.)
- Erwartungsgemäss zeigt das Mischgut mit B50/70 die schlechtesten Werte bei beiden Prüftemperaturen.
- Beim Mittelwert zeigt die Steigung der Verformungskurve im Wendepunkt den grössten Unterschied (31 bei 50 °C und 88 bei 60 °C).
- Offenbar verbessert die höhere Temperatur die Spreizung der Prüfergebnisse und somit die Aussagekraft des Prüfverfahrens, wenn auch nur in kleinem Rahmen.

In einem zweiten Schritt wurden die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der neu festgelegten Prüfbedingungen mit denjenigen der Standardprüfungen abgeklärt. An insgesamt 11 Mischgutproben wurde der Druck-Schwellversuch mit den beiden Prüfmethode durchgeführt; die Ergebnisse sind in der Tabelle 21 zusammengefasst.

Vergleich neue / normierte Prüfbedingungen

IMP Nr.	Mischgut	Bindemittel	neue Prüfbedingungen			normierte Prüfbedingungen		
			n	ε_n [‰]	ε_n^* [‰/10 ⁴ Zyklen]	n	ε_n [‰]	ε_n^* [‰/10 ⁴ Zyklen]
24-04657	AC T 22 S	B 50/70	1050	15	65	6352	12	9
24-04815	AC T 22 H	PmB-E 45/80-65	3780	12	6	7368	15	8
24-05261	AC T 22 S	B 50/70	1788	14	39	10000	14	5
24-06393	AC T 16 N	B 50/70	560	15	134	4694	20	19
24-08301	AC T 22 S NV	B 50/70	3748	13	14	10000	5	1
24-08302	AC T 22 S	B 50/70	695	12	79	5110	9	8
24-09305	AC B 16 H	PmB-E 45/80-65	1470	14	36	10000	9	1
24-09543	AC T 22 H	PmB-E 25/55-65	4073	13	12	10000	5	1
24-11861	AC EME C2	B10/20	3748	18	20	10000	10	1
25-00099	AC EME 22 C1	B10/20	10000	24	10	10000	19	4
25-00144	AC EME 22 C1	B 10/20	10000	16	5	10000	9	2
Mittelwerte			3719	15	38	8502	12	5

rot: Abbruchkriterium bei allen Prüfkörpern der Serie erreicht (zu grosse Dehnung)

grün: Abbruchkriterium bei mindestens einem Prüfkörper der Serie erreicht.

Tabelle 21: Vergleich der Ergebnisse der neuen mit der bisherigen Prüfmethode

Die Ergebnisse der Tabelle 21 zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den Methoden auf.

- Während bei der normierten Prüfung 7 von 11 Proben keinen Wendepunkt zeigten, waren es bei der neuen Methode nur 2 von 11 Proben.
- Bei den neuen Prüfbedingungen wurde das Abbruchkriterium bei der Hälfte der Proben erreicht, bei der normierten Prüfung hingegen bei keiner einzigen Probe.
- Auch die Zunahme des Mittelwertes der Steigung im Wendepunkt um 760 % zeigt deutlich, dass die neuen Prüfbedingungen eine grössere Aussagekraft haben.

Aus der Entwicklung der Prüfmethode lassen sich untenstehende Folgerungen ableiten:

- Im Rahmen des Projektes war es nicht möglich eine fundierte und belastbare Entwicklung einer neuen Methode durchzuführen. Die Ergebnisse sind jedoch vielversprechend und zeigen auf, dass in der Optimierung des DSV viel Potential steckt
- Die für das vorliegende Projekt eingeführten neuen Prüfbedingungen haben eine deutlich höhere Aussagekraft als die bisherigen, normierten Prüfbedingungen.

5.2.3 Ergebnisse des DSV mit den neuen Prüfbedingungen

An 6 Mischungen aus dem Teilprojekt TP2 wurde die neu definierte Prüfung DSV durchgeführt; die Ergebnisse sind in der Tabelle 21 zusammengefasst.

Ergebnisse des modifizierten DSV an den Proben mit Zusätzen								
Mi- schung	IMP Nr.	Zusammensetzung Mischgut				neue Prüfbedingungen 60 °C		
		Misch- gut	RAP [%]	Binde- mittel	Zusatz	n [-] / nw	ε_n [‰]	ε_n^* [‰/10 ⁴ Zyklen]
K 11	23-02912	AC EME 22 C1	70	B 10/20	Gummi	10000	21	6
K 12	23-03389	AC EME 22 C1	70	PmB HM II		10000	10	2
K 13	24-10252	AC EME 22 C1	70	B 10/20		3640	25	26
K 14	24-14683-1	AC EME 22 C1	70	B 10/20	Additiv I	10000	24	10
K 15	24-14678-1	AC EME 22 C1	70	B 10/20	Gilsonite	10000	16	5
K 17	25-00015-1	AC EME 22 C1	70	B 10/20	Additiv II	10000	25	8

Tabelle 22: Ergebnisse des modifizierten DSV an den Proben mit Zusätzen

Es ist ein deutlicher Unterschied der Steigung im Wendepunkt zwischen dem AC EME mit Hartbitumen ohne Zusatz (Mischung K13) und allen übrigen Mischungen zu sehen. Alle Mischungen mit Zusatz oder PmB liegen nahe beieinander.

5.3 Bruchzähigkeit; Semi Circular Bending Test (SCB)

5.3.1 Das Prüfverfahren

Eine der Prüfmethoden, die häufig zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Asphaltmischungen verwendet werden, ist der Halbkreisbiegeversuch (SCB). Dieser Test wurde ursprünglich zur Bestimmung der Bruchfestigkeit entwickelt und gilt als einfache, aber nützliche Prüfmethode für die Mischungsentwicklung und Qualitätskontrolle von Asphaltmischungen [Molenaar et al 2002].

Die Norm SN EN 12697-44 legt das Halbkreis-Biegeprüfverfahren (SCB) zur Bestimmung der Zugfestigkeit oder der Bruchzähigkeit eines Asphaltmischguts fest. Damit kann das Potential zur Rissausbreitung eines Mischgutes beurteilt werden. Die Rissausbreitungsphase beschreibt den zweiten Teil des Versagensmechanismus bei dynamischer Beanspruchung. Die erste Phase, die Rissinitiierungsphase, ist hauptsächlich durch den Ermüdungsversuch (EN 12697-24) abgedeckt

Zitat aus der SN EN 12697-44: Ein halbzyklindrischer Probekörper mit einem mittigen Riss wird durch eine Dreipunkt-Biegung so belastet, dass die Mitte der Grundfläche des Probekörpers durch eine Zugspannung beansprucht wird. Im Verlauf der Prüfung nimmt die Verformung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 mm/min zu. Die entsprechende Last steigt bis zu einem Höchstwert F_{max} an, der in direkter Beziehung zur Bruchzähigkeit des Probekörpers steht.

In Abbildung 15 ist ein Beispiel für die Prüfanordnung und den Prüfkörper dargestellt. Im Projekt wurden Gyratorprobekörper mit Durchmesser 150 mm verwendet, da das Grösstkorn des untersuchten Mischgutes mit 22 mm zu gross für Probekörper mit Ø 100 mm war. Für die Untersuchung feinkörniger Mischungen können kleinere Probekörper verwendet werden.

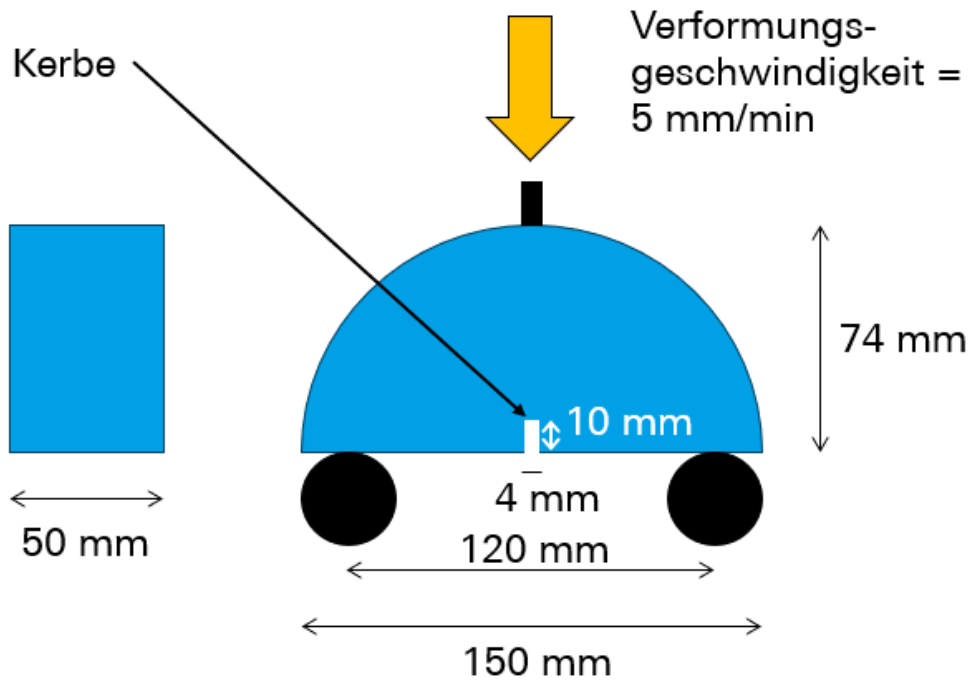


Abbildung 15: Beispiel für die Prüfanordnung der SCB-Prüfung (Quelle IMP)

Die Arbeitsschritte zur Herstellung der Probekörper sind in der Abbildung 16 dargestellt. Der 110 mm hohe Gyratorprobekörper wird in zwei Zylinder (Höhe 50 mm) geschnitten, aus denen 4 halbzyklindrische Probekörper entstehen, in denen mittig der Unterseite eine 10 mm tiefe Kerbe geschnitten wird (Breite 4 mm).

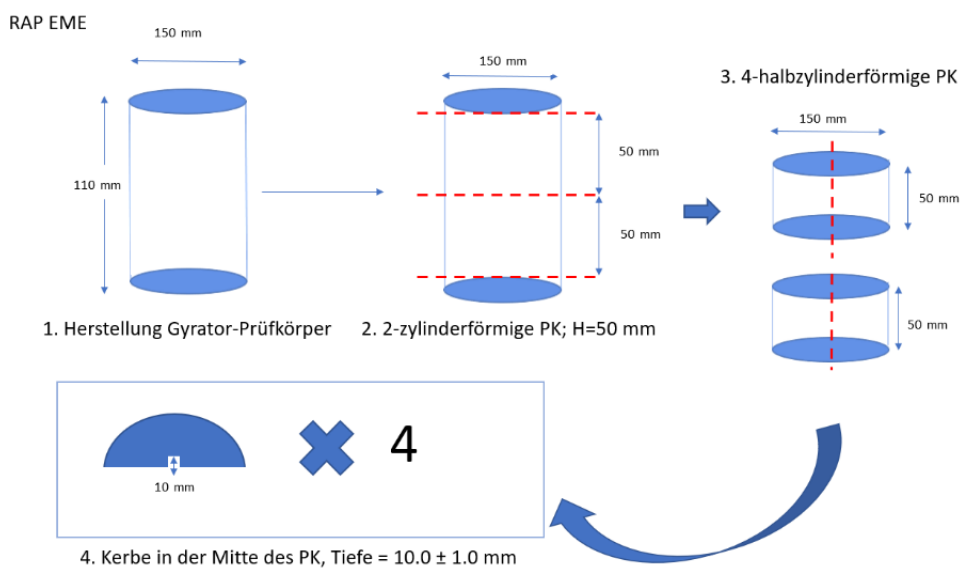


Abbildung 16: Arbeitsschritte zur Herstellung der Probekörper (Quelle: IMP)

Die Norm SN EN 12697-44 beschreibt, wie die Bruchzähigkeit zu berechnen sei. Dabei wird die Spannung bei maximaler Kraft mit Formfaktoren multipliziert, wobei die Formfaktoren Konstanten sind, welche aus der Prüfkörpergeometrie abgeleitet werden. Die Auswertung gemäss der Norm berücksichtigt somit nur die maximale Kraft als Messergebnis; siehe Abbildung 17.

Bruchzähigkeit K_{IC} : σ_{max} x Formfaktoren

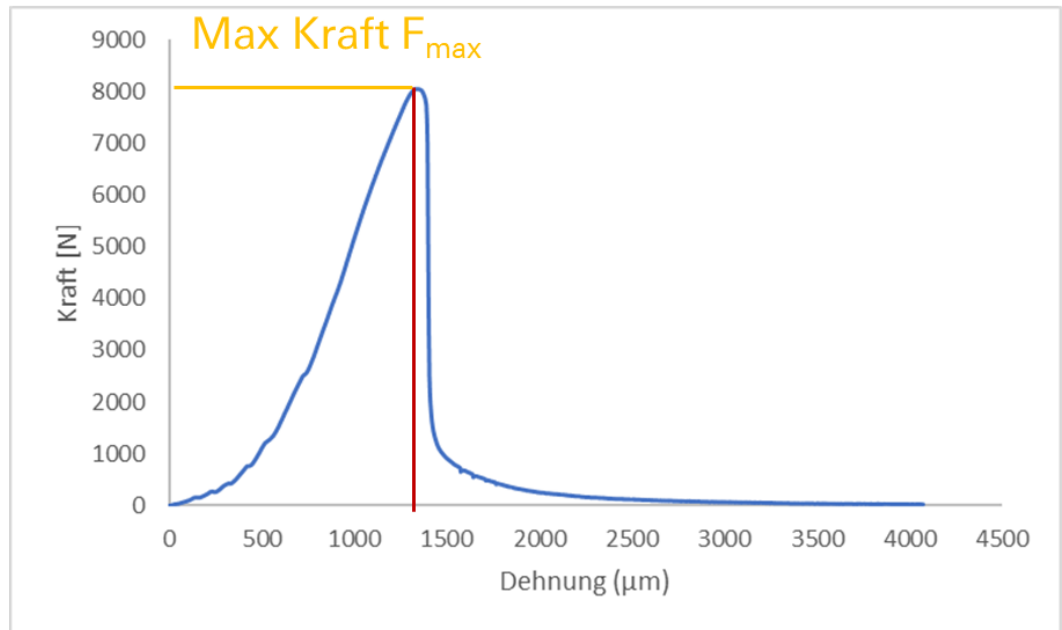


Abbildung 17: Die Auswertung gem. SN EN berücksichtigt zur Berechnung der Bruchzähigkeit die maximale Kraft.

Da mit der Prüfung die Zähigkeit des Baustoffes untersucht werden soll, haben wir zusätzlich eine alternative Auswertung gewählt, bei welcher die Brucharbeit, berechnet wird (siehe Abbildung 18). Dabei entspricht die Brucharbeit der Fläche unter der Deformationskurve.

Im Rahmen des Projektes wurde die SCB-Prüfung unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Prüftemperatur	+ 15 °C
Vorschubgeschwindigkeit	50 mm / Minuten

Wie im Kapitel 5.1 erwähnt, sind Kälteprüfungen im Projekt nicht vorgesehen, daher wurde die Prüf-Temperatur (+15 °C) in der Nähe der Ermüdungsprüfung gewählt.

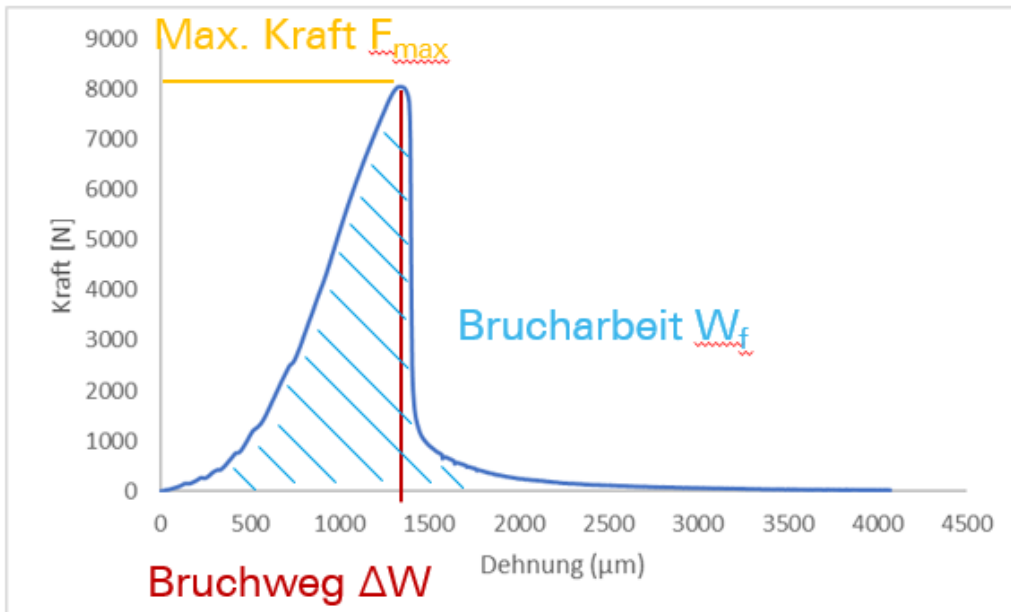


Abbildung 18: alternative Auswertung unter Berücksichtigung der Brucharbeit

5.3.2 Ergebnisse des SCB

Obwohl die Prüfungen nicht bei tiefen Temperaturen durchgeführt wurden (Prüftemperatur + 15 °C), konnte visuell festgestellt werden, dass der Bruch bei allen Mischungen kornbrechend war. Dies ist auf die harten, verwendeten Bindemittel zurückzuführen.



Abbildung 19: Kornbrechender Riss bei einer Prüftemperatur von + 15 °C (Quelle IMP)

Ergebnisse der SCB Prüfung

Mi- schung	IMP Nr.	Zusammensetzung Mischgut			Zusatz	SCB Versuch	
		Misch- gut	RAP	Binde- mittel		Bruchzähig- keit [N/mm ^{3/2}]	Bruch- Arbeit [J]
K 12	23-03389	AC EME 22 C1	70 %	PmB HM II		35.2	4.86
K 13	24-10252	AC EME 22 C1	70 %	B 10/20		31.0	4.93
K 14	24-14683-1	AC EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv I	30.5	4.13
K 15	24-14678-1	AC EME 22 C1	70 %	B 10/20	Gil- sonite	32.9	2.98
K 17	25-00015-1	AC EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv II	29.9	3.99

Tabelle 23: Ergebnisse der SCB Prüfung; Mittelwerte aus 4 Prüfungen

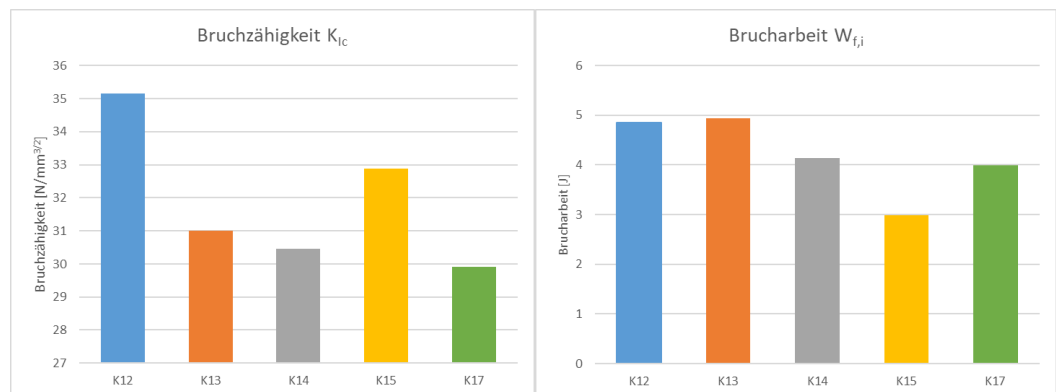


Abbildung 20: Grafische Darstellung der Prüfergebnisse der SCB-Prüfung bei + 15 °C

Für die Auswertung der Prüfung gem. Norm (Bruchzähigkeit) besteht ein Wert für die Wiederholpräzision r von 2.44; für die alternative Auswertung der Brucharbeit ist dieser Wert nicht bekannt.

Bruchzähigkeit:

Unter Berücksichtigung der Wiederholpräzision kann die Mischung K12 (PmB HM II) als klar beste Mischung bezeichnet werden. Die übrigen Mischungen müssen als gleichwertig betrachtet werden.

Brucharbeit:

Bei der Brucharbeit fällt die Mischung K15 (Gilsonite) etwas ab, die übrigen Mischungen liegen auf vergleichbarem Niveau.

Betrachtet man Bruchzähigkeit und Brucharbeit zusammen, dann fällt auf, dass die Mischung K15 (Gilsonite) zwar eine hohe Bruchzähigkeit aufweist, jedoch eine kleine Brucharbeit. Dies bedeutet, dass die Bruchkraft gross ist, jedoch die Dehnung klein, was typisch für ein sprödes Verhalten ist.

In der Literatur wurde die SCB-Prüfung für andere Ziele eingesetzt, sodass ein Vergleich der Prüfungsergebnisse mit Erfahrungswerten schwerfällt. So haben Li und

Marasteanu [Li, X :, Marasteanu, M. (2004)] das Kälteverhalten untersucht. In [Momen R. Mousa, (2021)] wurde eine Optimierung der Anwendung von Gummigranulat angestrebt.

Im Projekt Kies für Generationen KFG [Önkel et al; in Bearbeitung] wurden SCB-Prüfungen an Deckschichten AC 8 und SDA 4 bei Prüftemperaturen von 0 und +25 °C durchgeführt. Ein direkter Vergleich mit EME-Mischgut bei einer Prüftemperatur von 15 °C ist nicht möglich.

Eine deutliche Differenzierung zwischen den verschiedenen Mischungen konnte mit der SCB-Prüfung bei 15 °C nicht erreicht werden. Möglicherweise liegt dies darin begründet, dass der Anteil RAP mit 70 % in allen Mischungen eine Differenzierung verunmöglichte. Die Ergebnisse schliessen nicht aus, dass bei anderen Prüftemperaturen eine bessere Spreizung der Ergebnisse zu erreichen wäre

6 TP4 Alternative Prüfmetho- den zur Vorselektion

6.1 Vorgehen, Methodik

Die beiden in der Norm festgelegten Prüfverfahren zur Bestimmung des Moduls sowie der Ermüdungseigenschaften sind aufwendig und zeitraubend, was unter anderem dazu geführt hat, dass in der Schweiz nur 2 Prüfstellen diese Prüfungen durchführen. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen daher alternative (schnellere und kostengünstigere) Prüfmethoden (Modul und Ermüdung) evaluiert werden. Eine alternative Methode könnte in einem ersten Schritt zur Vorselektion der Mischgüter verwendet werden. Die normierten Prüfungen würden nur an denjenigen Proben durchgeführt werden, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen erfüllen. Bei positiven Erfahrungen und einem entsprechenden Bewertungshintergrund, könnten zu einem späteren Zeitpunkt in einem zweiten Schritt die alternativen Prüfmethoden die bisherigen Normprüfungen ersetzen.

6.2 Ermüdung LAS

Aus diversen Untersuchungen (Poulikakos et al, 2014; Sudarsanan, 2022) ist bekannt, dass keine Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Prüfungen des Ermüdungsverhaltens von Asphaltprobekörpern bestehen. Es ist daher nicht zielführend eine alternative Prüfmethode an Asphaltprobekörper zu suchen.

In (Ishaq und Giustozzi, 2021) wurden Ermüdungsprüfungen an Bindemitteln mit Ergebnissen diverser Rissbildungsprüfungen verglichen. In (Hu 2024) wurden LAS-Prüfungen zur Untersuchung des Verhaltens gealterter Bindemittel angewendet.

Die Prüfung «Linear Amplitude Sweep Analysis; LAS) gemäss (AASHTO T 391-20) ist ein Prüfverfahren, welches entwickelt wurde, um die Langzeitschäden von Bitumen bei verschiedenen Belastungen zu ermitteln. Bei dieser Prüfung wird die Probe im DSR bei konstanter Temperatur (25 °C) einer zunehmenden Amplitude ausgesetzt und die Kraft gemessen.

Als Ergebnis wird die theoretische Anzahl Zyklen berechnet, welche bei einer Deformation von 2.5 % erforderlich ist, um das Abbruchkriterium zu erreichen. Gemäss AASHTO gilt ein Abfall des Moduls um 35 % als Abbruchkriterium.

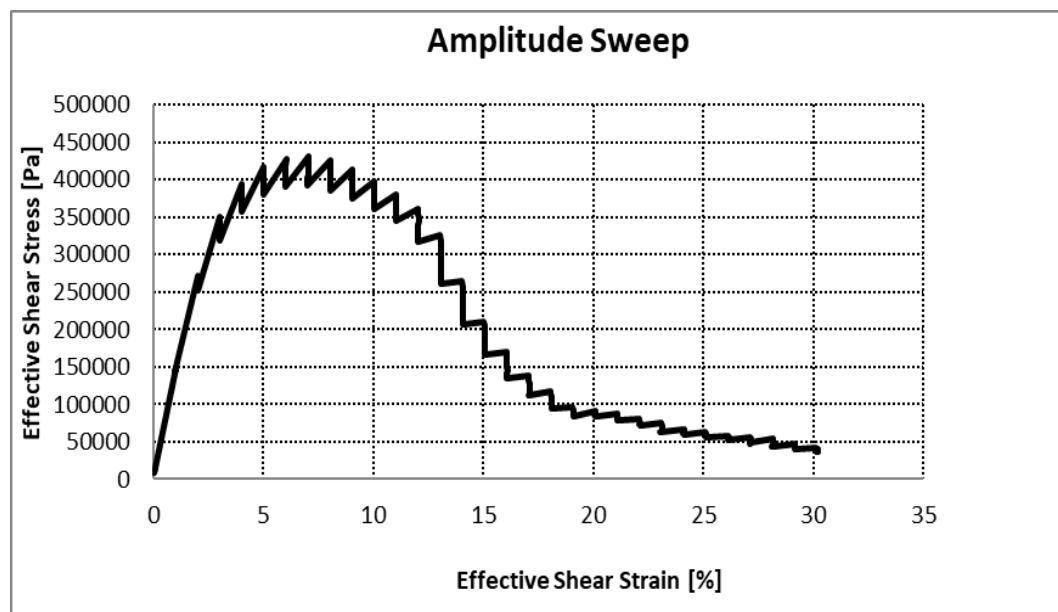


Abbildung 21: Kraft-/Deformationskurve beim LAS (Quelle imp)

Ergebnisse LAS Prüfung

Mi- schung	IMP Nr.	Zusammensetzung Mischgut				rückgewonnens Bitumen		n Zyklen bei 2.5 % Strain
		Misch- gut	RAP	Bindemit- tel	Zusatz	Pen [1/10 mm]	RuK [°C]	
K8	22- 14892	EME 22 C1	100 %	-	-	20	66.6	1'794'017
K9	22- 14907	EME 22 C1	70 %	PmB HM I	-	22	70.4	3'562'303
K10	22- 14915	EME 22 C2	0 %	B 10/20	50 % Rundkorn	12	71.2	87'162
K12	24- 07748	EME 22 C1	70 %	PmB HM II	-	17	101.5	4'624'388
K13	24- 10252	EME 22 C1	70 %	B 10/20	-	17	67.8	1'966'037
K14	25- 00099	EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv I	16	73	1'848'417
K15	25- 00144	EME 22 C1	70 %	B 10/20	Gilsonite	12	85	229'152
K17	25- 00785	EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv II	17	72	1'560'538

Tabelle 24: Ergebnisse der LAS-Prüfungen an den rückgewonnenen Bindemitteln; die Prüftemperatur lag bei 25 °C

Die Ergebnisse entsprechen in folgenden Punkten den Erwartungen:

- K10 mit B 10/20 ohne RAP (Penetration 12 1/10 mm) am schlechtesten.
- Von allen Mischungen mit 70 % RAP ist K15 Gilsonite am schlechtesten (Penetration 12 1/10 mm).
- K 9 (HM I) und K 12 (HM II) liegen auf Rang 1 und 2. Es war zu erwarten, dass die hochmodifizierten PmB gut abschneiden.

Etwas überraschend sind folgende Feststellungen:

- Das Mischgut K13 mit B10/20 und 70 % RAP liegt auf Rang 5 / 8 knapp vor den Mischungen mit Additiven (K14 und K17)
- K17 enthält ein Additiv, welches vor allem die Ermüdung beeinflussen soll; diese Mischung liegt auf Rang 6 / 8; eigentlich wurde mehr erwartet.
- K 8 mit 100 % RAP liefert erstaunlich gute Werte und liegt auf Rang 5 / 8

In der Tabelle 25 sind die Ergebnisse der Prüfungen am Mischgut (2-Punkt Biegung am trapezförmigen Probenkörper; SN EN 12697-24) und denjenigen am rückgewonnenen Bindemittel (LAS) einander gegenübergestellt.

Ermüdung am Mischgut und am Bindemittel.

Mi- schung	IMP Nr.	Zusammensetzung Mischgut			Ermü- dung 2PBTR am Misch- gut	LAS n Zyklen bei 2.5 % Strain
		RAP	Bindemit- tel	Zusatz		
K8	22-14892	100 %	-	-	149	1'794'017
K9	22-14907	70 %	PmB HM I	-	175	3'562'303
K10	22-14915	0 %	B 10/20	50 % Rundkorn	141	87'162
K12	24-07748	70 %	PmB HM II	-	158	4'624'388
K13	24-10252	70 %	B 10/20	-	144	1'966'037
K14	25-00099	70 %	B 10/20	Additiv I	160	1'848'417
K15	25-00144	70 %	B 10/20	Gilsonite	156	229'152
K17	25-00785	70 %	B 10/20	Additiv II	157	1'560'538

Tabelle 25: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Ermüdungsprüfungen am Mischgut (2PB-TR; SN EN 12697-24) und den Ergebnissen der LAS-Prüfung am rückgewonnenen Bindemittel.

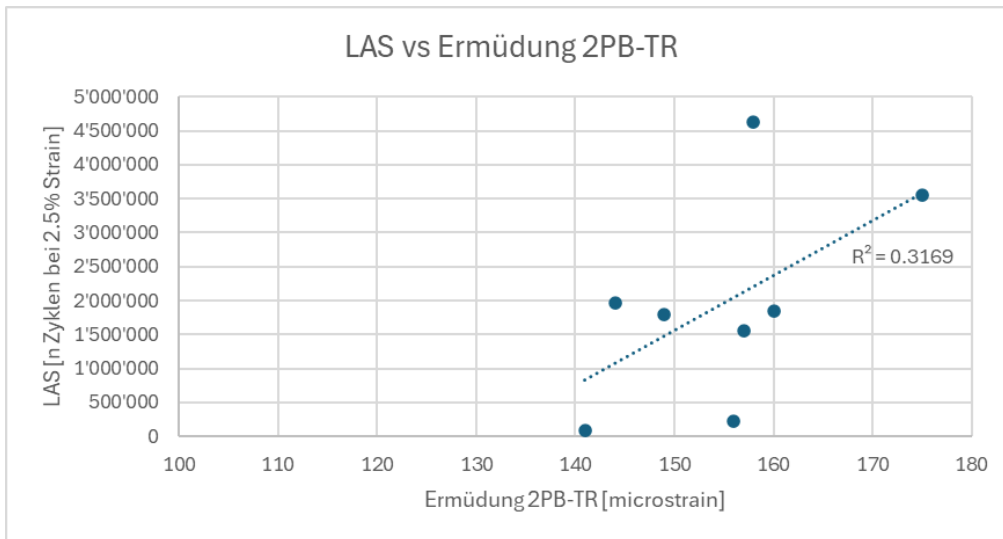


Abbildung 22: Korrelation zwischen der Ermüdung am Mischgut-Probekörper (2PB-TR) und am rückgewonnenen Bindemittel (LAS)

Wie der Abbildung 22 zu entnehmen ist, besteht keine Korrelation ($R^2 = 0.32$) zwischen der Prüfung der Ermüdungseigenschaften am Mischgut und am rückgewonnenen Bindemittel.

Ishaq [Ishaq, M. A., Giustozzi F. (2021)] hat in einer aufwändigen Literaturstudie diverse Bindemittelprüfungen mit den Ergebnissen von Prüfungen an Asphalt verglichen und Korrelationen gesucht. Teilweise wurden für die Korrelation zwischen LAS- und 4PB-Test (Ermüdung in der 4 Punkt Biegung) Werte für R^2 über 0.95 gefunden. Aus der Literaturstudie von Ishaq kann die jeweilige Anzahl untersuchter Proben nicht erkannt werden; sie scheint relativ klein zu sein, sodass die Korrelationskoeffizienten nicht hinterfragt werden können. Leider wurde keine Literaturquelle gefunden, bei welcher LAS-Ergebnisse mit denjenigen der 2 PB-TR-Prüfung verglichen wurde.

6.3 Bindemittel - Rheologie

An den rückgewonnenen Bindemitteln wurden sowohl Temperatur Sweep [SN EN 14770] wie auch die Bestimmung des BTSV [SN EN 17643] durchgeführt.

Beim Temperatur Sweep werden bei konstanter Frequenz schrittweise steigende Temperatur-Niveau gefahren; bei jeder Temperatur nimmt die aufgebrachte Deformation zu. Als Ergebnis werden der komplexe Schermodul sowie der Phasenwinkel bei 60 °C ausgewertet.

Die BTSV-Kennwerte (Temperatur und Phasenwinkel δ) werden bei einem Schermodul von 15 kPa bestimmt. Dieses Modul (15 kPa) entspricht den Spannungsverhältnissen beim Erweichungspunkt Ring und Kugel EP RuK. Daher entspricht die BTSV-Temperatur bei nicht modifizierten Bitumen dem EP RuK.

Ergebnisse der rheologischen Messungen an den rückgewonnenen Bindemitteln

Mi- schung	IMP Nr.	Zusammensetzung Mischgut				Temperatur Sweep		BTSV	
		Misch- gut	RAP	Binde- mittel	Bemer- kung	kom- plexer Scher- modul G*; 60 °C [Pa]	Pha- sen- win- kel δ 60 °C [°]	T _{BTSV} [°C]	δ _{BTSV} [°]
K12	24- 07748	EME 22 C1	70 %	PmB HM II	-	475'030	59.35	76.9	67.2
K13	24- 10252	EME 22 C1	70 %	B 10/20	-	106'310	61.64	75.2	71.4
K14	25- 00099	EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv I	71'428	62.59	72.5	70.3
K15	25- 00144	EME 22 C1	70 %	B 10/20	Gilsonite	167'880	55.04	80.9	66.8
K17	25- 00785	EME 22 C1	70 %	B 10/20	Additiv II	60'222	63.59	70.9	70.5

Tabelle 26: Ergebnisse der rheologischen Messungen an den rückgewonnenen Bindemitteln

6.4 E-Modul IT-CY

Die Norm [SN EN 12697-26] legt fest, dass die Prüfkörper gelagert werden müssen, bevor die Prüfung erfolgen darf. Dabei gelten folgende Wartefristen:

- Grundsätzlich 14 bis 42 Tage nach der Herstellung der Probekörper PK
- Bei PK die geschnitten oder geklebt werden gelten weitere Fristen:
 - Schneiden spätestens 8 Tage nach dem Verdichten; aus praktischen Gründen frühestens 1 Tag nach der Herstellung (Abkühlung).
 - Kleben frühestens 2 Wochen nach dem Schneiden

Die SN EN begründet diese Wartefristen mit der Bemerkung «Die Dauer der Lagerung beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Probekörpers».

Diese Regelung ist in Fachkreisen umstritten und gilt auch bei anderen dynamischen Prüfungen, wie beispielsweise der dynamische Druck-Schwellversuch oder die dynamische Eindringtiefe bei Gussasphalt [SN EN 12697-25]. Bereits 2008 wurde für die dynamische Eindringtiefe nachgewiesen [Angst 2008], dass eine Lagerung der Prüfkörper von einem Tag – anstelle der normierten 14 Tage – ausreichend ist, trotzdem gelten in den aktuellen EN weiterhin die langen Wartefristen.

Auf der Suche nach einer alternativen Prüfmethode, mit welcher rasch eine Vorselektion der zu untersuchenden Mischgut-Proben durchgeführt werden kann, sind bezüglich der Wartefristen – gestützt auf die erwähnte Publikation [Angst, 2008] – Abweichungen von der Norm zulässig. Daher wird im Weiteren mit einer Wartefrist von einem Tag gearbeitet.

Beim Prüfverfahren IT-CY gemäss SN EN 12697-26; Anhang C wird die Steifigkeit mittels indirekter Zugprüfung bestimmt. Dabei wird eine sinusförmige Belastung vertikal auf einen zylindrischen Prüfkörper aufgebracht und die resultierende horizontale Verformung gemessen. Die Prüfung wird bei 20 °C durchgeführt.

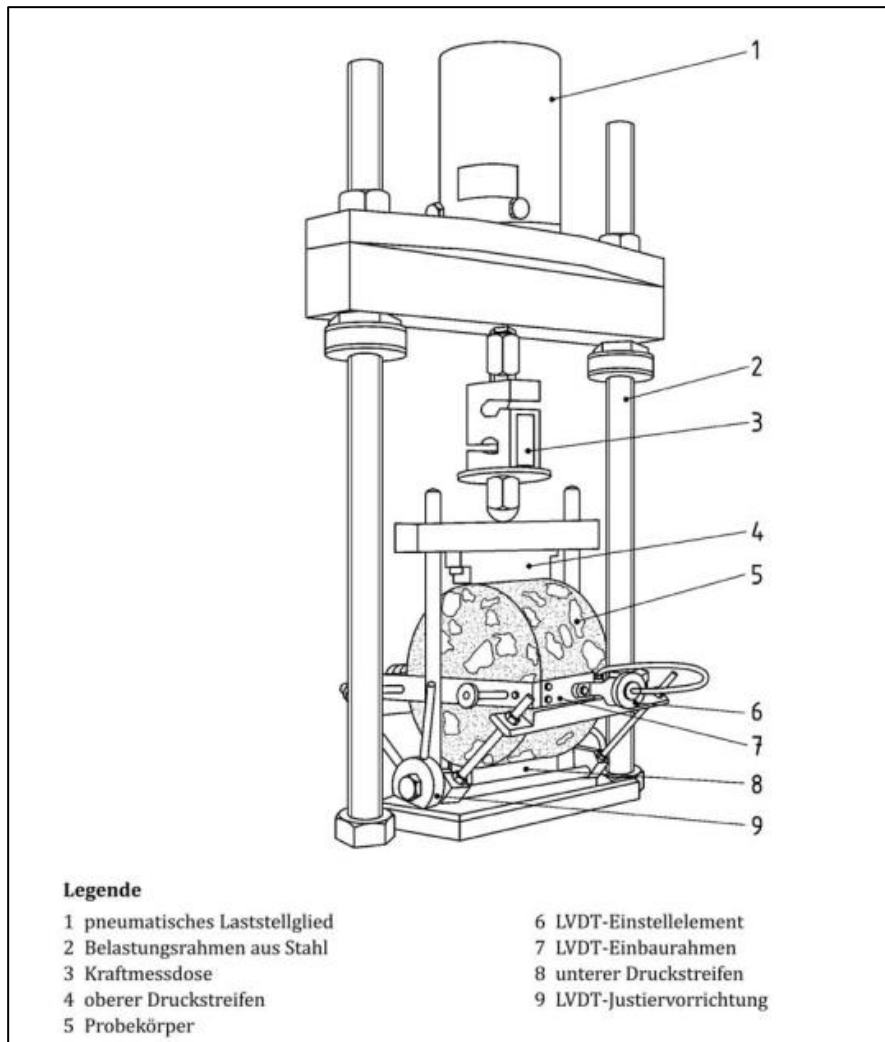


Abbildung 23: Beispiel für die Prüfeinrichtung (Quelle: SN EN 12697-26)

6.4.1 Die Ergebnisse

Steifigkeit IT-CY gemäss SN EN 12697-26; Anhang C bei 20 °C

Mischung	IMP Nr.	Zusammensetzung Mischgut				Steifigkeit 2PB TR bei 15 °C MPa	E-Modul IT-CY bei 20 °C MPa
		Mischgut	RAP [%]	Binde-mittel	Be-mer-kung		
K8	22-06731	EME 22 C1	100	-		16570	11760
K9	22-09153	EME 22 C1	70	PmB HM I		15365	12021
K10	22-09613	EME 22 C2	0	B 10/20	50 % Rund-korn	18242	16010
K11	23-02912	EME 22 C1	70	B10/20	Gummi	18238	15981
K12	23-03389	EME 22 C1	70	PmB HM II		16791	14949

Tabelle 27: Gegenüberstellung der durch zwei unterschiedliche Prüfverfahren ermittelten Steifigkeit

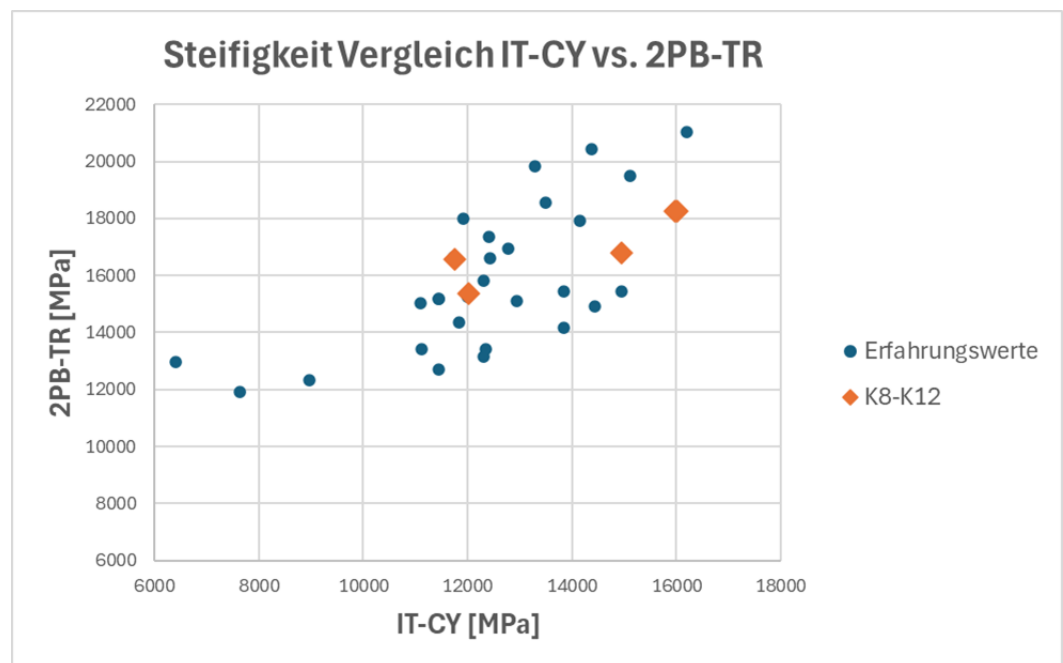


Abbildung 24: Ergebnisse der untersuchten Mischungen (orange) vor dem Hintergrund der Erfahrungswerte des IMP (Quelle: imp)

Die beiden Prüfverfahren ergeben zwar unterschiedliche Prüfergebnisse, die Rangfolge der untersuchten Proben ist jedoch sehr ähnlich. Dies steht im Einklang mit den bisherigen Erfahrungen der IMP (siehe Abbildung 24). Eine klare Korrelation mit hohem Korrelationskoeffizient zwar besteht nicht, doch kann der Abbildung 24 entnommen werden, dass für Werte IT-CY ab 11'000 MPa ein gemeinsamer Trend der beiden Prüfverfahren besteht. Zudem liegen die Werte aus der IT-CY-Prüfung generell tiefer als diejenigen aus der 2PB-TR-Prüfung.

6.5 Diskussion

In der Superpave-Spezifikation [SHRP-A-379] gilt $G^*/\sin \delta$ als aussagekräftige Kennzahl für den Widerstand gegenüber Verformungen. Daher wurde dieser Wert in die Suche nach Zusammenhängen zwischen verschiedenen Prüfungen aufgenommen. In der Tabelle 28 wurde die lineare Korrelation zwischen zwei unterschiedlichen Prüfmethoden berechnet, wobei der Fokus auf den Vergleich von Prüfungen am rückgewonnenen Bindemittel mit Prüfungen am Mischgut gelegt wurde. Dabei ist zu bemerken, dass die Anzahl Wertepaare bei den meisten Gegenüberstellungen mit 5 zu klein ist, um belastbare Folgerungen zu ziehen. Immerhin können Trends aufgespürt werden, bei denen sich weitere Untersuchungen lohnen würden.

Üblicherweise werden Korrelationskoeffizienten wie folgt interpretiert:

$R^2 \geq 0.8:$	starke Korrelation
$0.5 \leq R^2 < 0.8:$	mittlere Korrelation
$R^2 < 0.5:$	schwache Korrelation

Korrelationen diverser Werte-Paare

Korrelation zwischen			Korrelations Koeffizient R ²			
			Anzahl Paare	K12, K13, K14, K15, K17	Anzahl Paare	Ohne K15
Prüfung am Bindemittel	und	Prüfung am Mischgut				
LAS n Zyklen bei 2.5 % Strain	und	ε _n [%] im DSV	5	0.27	4	0.99
LAS n Zyklen bei 2.5 % Strain	und	ε _n [*] im DSV ²⁾	5	0.04	4	3)
LAS n Zyklen bei 2.5 % Strain	und	Ermüdung 2PB-TR	8	0.32	7	3)
G [*] /sin δ	und	Ermüdung 2PB-TR	5	0.04	4	0.44
G [*] /sin δ	und	ε _n im DSV ¹⁾	5	0.89	4	3)
G[*]/sin δ	und	Steifigkeit 2PB-TR	5	0.47	4	3)
G [*] /sin δ	und	ε _n [*] im DSV ²⁾	5	0.26	4	3)
G [*]	und	ε _n im DSV ¹⁾	5	0.87	4	0.99
G [*]	und	Steifigkeit 2PB-TR	5	0.44	4	3)
G [*]	und	ε _n [*] im DSV ²⁾	5	0.25	4	3)
T _{BTSV}	und	ε _n im DSV ¹⁾	5	0.46	4	3)
T _{BTSV}	und	ε _n [*] im DSV ²⁾	5	0.002	4	3)
T _{BTSV}	und	Steifigkeit 2PB-TR	5	0.79	4	3)
T _{BTSV}	und	Ermüdung 2PB-TR	5	0.01	4	3)
δ _{BTSV}	und	ε _n im DSV ¹⁾	5	0.82	4	3)
δ _{BTSV}	und	ε _n [*] im DSV ²⁾	5	0.59	4	3)
δ _{BTSV}	und	Steifigkeit 2PB-TR	5	0.48	4	3)
δ _{BTSV}	und	Ermüdung 2PB-TR	5	0.21	4	3)
Zwischen zwei Bindemittelprüfungen						
G [*] /sin δ	und	LAS n Zyklen bei 2.5 % Strain	5	0.58	4	0.99
T _{BTSV}	und	LAS n Zyklen bei 2.5 % Strain	5	0.02	4	0.67
δ _{BTSV}	und	LAS n Zyklen bei 2.5 % Strain	5	0.02	4	0.88
Zwischen zwei Mischgutprüfungen				Erfahrungswerte		K8-K12
Erfahrungswerte						
IT-CY	und	Steifigkeit 2PB-TR	29	0.46		
Projektwerte						
IT-CY	und	Steifigkeit 2PB-TR	K8-K12		Erfahrungswerte + Projekt	
			5	0.75	34	0.48
¹⁾ Dehnung im Wendepunkt (modifizierte Prüfbedingungen)						
²⁾ Steigung im Wendepunkt (modifizierte Prüfbedingungen)						
³⁾ das Weglassen der Mischung K15 verändert das Ergebnis nicht wesentlich						

Tabelle 28: Linearer Korrelationskoeffizient verschiedener Gegenüberstellungen zweier Prüfmethode

6.5.1 Vorselektion hinsichtlich Ermüdung

Die Korrelationskoeffizienten der rheologischen Prüfungen mit der Ermüdung im 2PB-TR liegen zwischen 0.01 und 0.32, es besteht somit keine Korrelation. Trotz der kleinen Anzahl Wertepaare kann festgehalten werden, dass die durchgeführten Prüfungen am rückgewonnen Bindemittel keine alternativen Prüfungen zur Ermittlung der Ermüdung in der 2-Punkt-Biegung 2PB-TR sind.

6.5.2 Vorselektion hinsichtlich Modul

Beim Vergleich der Module IT-CY zu 2PB-TR besteht für die 5 Mischungen des Projektes mit 0.75 eine relativ starke Korrelation. In der Tabelle 28 wurde auch der Korrelationskoeffizient aus Erfahrungswerten inkl. Projekt (0.48) aufgeführt. Dieser Wert beruht auf insgesamt 34 Wertepaare aus unterschiedlichen Projekten und verschiedenen Prüfstellen. Daher erstaunt es nicht, dass der Erfahrungswert (0.48) tiefer liegt als derjenige des Forschungsprojektes (0.75) bei welchem nur Daten eines Labors verwendet wurden. In der Abbildung 24 ist der Zusammenhang grafisch dargestellt. Obwohl der statistische Wert R^2 der 34 Wertepaare nicht sehr stark ist, kann der IT-CY in einem pragmatischen Ansatz zur Vorselektion verwendet werden:

Da die Module IT-CY generell tiefer liegen als die Module 2PB-TR, entsteht eine «Sicherheitsreserve» welche zu folgender Annahme führt: Erfüllt ein Mischgut die Anforderungen an das Modul in der IT-CY-Prüfung, wird es mit grosser Wahrscheinlichkeit die Anforderungen auch in der normierten Prüfung 2PB-TR erfüllen.

Der Nutzen einer Vorselektion mittels IT-CY ist vorallem in jenen Fällen gross, bei denen ein Termindruck besteht. In der Tabelle 29 ist die minimale, theoretische Bearbeitungs- und Lagerungsdauer der beiden Prüfverfahren aufgeführt. In der Praxis spielen weitere Faktoren mit, welche die effektive Bearbeitungsdauer deutlich verlängert (Wochenende, Besetzung der Prüfmaschinen, Besetzung des Personals, Beschaffung des Mischgutes etc.). Da jedoch diese Faktoren für beide Prüfverfahren gleich sind, kann aus der Tabelle 29 festgehalten werden, dass die IT-CY-Prüfung 4 bis 5 Mal schneller ist.

Theoretische minimale Bearbeitungsdauer zweier Prüfverfahren		
Arbeitsschritt		
	IT-CY ohne Wartezeiten	2 PB-TR gem EN 12697-26
Herstellung Prüfkörper	Gyrator	1/2
	Walzverdichtung	1
Lagerung	zum Trocknen	1
	vor Schneiden	> 1
	nach Schneiden	> 14
Schneiden	1/2	1/2
Prüfung	1/2	1
Total Tage	≥ 4	≥ 18

Tabelle 29: Vergleich der minimalen, theoretischen Bearbeitungsdauer im Labor der Prüfverfahren IT-CY und 2PB-TR.

7 Diskussion und Schlussfolgerungen

7.1 TP1 Einfluss der Anteil gebrochener Körner

7.1.1 Vorgehen und Methodik

Mit einer Umfrage bei verschiedenen Asphaltwerken wurden Informationen zur heutigen Qualität des RAP gesammelt. Es konnte festgestellt werden, dass in der Schweiz die Gesteinskörner des RAP der Kategorie C 70/10 entspricht.

Um den Einfluss der Kornform auf die mechanischen Eigenschaften der AC EME-Mischgüter zu ermitteln, wurden im Labor Modell-Mischungen ohne RAP hergestellt, bei denen die Anteile teilweise gebrochener, vollständig gebrochener und vollständig runder Körner gezielt variiert wurden. Es wurde nur eine beschränkte Anzahl Mischungen hergestellt und untersucht, da die Untersuchung weitere Mischungsvarianten durch eine IT-gestützte Modellierung geplant war.

7.1.2 Ergebnisse und Folgerungen

Die theoretische Formulierung von Asphaltgemischen mit PradoWeb führte nicht zu zufriedenstellenden Eigenschaften (insbesondere Hohlräume) der Mischungen, ausser bei der Verwendung von 100 % runden Gesteinskörnungen, was für die weitere Forschung nicht zielführend ist.

Der Austausch mit dem Softwarehersteller brachte keine Lösung für dieses Problem, so dass wir für die weitere Forschung auf dieses Werkzeug zur Modellierung von Asphaltmischungen verzichten mussten.

Aus den Untersuchungsergebnissen an Mischungen mit unterschiedlichen Kategorien der Gesteine (C 90/1 bis C 50/50) konnten untenstehende Folgerungen gezogen werden:

- Innerhalb des in der Praxis zu erwartenden Anteils an gebrochenen Körnern in einem EME-Mischgut mit hohem Anteil an RAP, hat die Kornform keinen relevanten Einfluss auf das gemäss SN EN 12697-24 bestimmte komplexe Modul und auf den Widerstand gegen Ermüdung (SN EN 12697-26).
- Bei deutlich höheren Anteilen an Rundkorn (50 %) macht sich die Kornform bemerkbar, allerdings in relativ geringem Ausmass. Im Vergleich zur Mischung mit Gesteinskörnungen C90/1 liegt das Modul bei der Mischung mit C50/50 um ca. 15 % tiefer; die Mikrodehnung um ca. 5 % tiefer.
- Es scheint keine Rolle zu spielen, ob die eher runden Körner (C 70/10) in der feinen Fraktion < 8mm oder in der groben Fraktion > 8 mm enthalten sind.

Grundsätzlich erstaunt die Erkenntnis, dass die Kornform einen sehr geringen Einfluss auf das komplexe Modul hat. Diese Folgerung ist nicht allgemeingültig, sondern nur für den untersuchten Kontext gültig; dabei sind folgende Punkte besonders zu beachten:

- Es wurden Gesteinskörnungen untersucht, welche in der Schweiz üblicherweise im RAP vorkommen. Die Gesteinskörnungen des verwendeten RAP weisen eine gute Qualität auf und entsprechen bezüglich der Kornform der Kategorie C 70/10. Es wurde nicht systematisch untersucht, ob grössere Anteile an runden und teilweise runden Körnern das Modul beeinflussen, da diese Fragestellung für die Praxis nicht relevant ist.
- Das Modul wird gemäss SN EN 12697-24 bei 15 °C und 10 Hz bestimmt. Diese Belastung entspricht nicht den Gegebenheiten bei sommerlichen Temperaturen. Aus der Aussage, die Kornform würde das Modul nicht beeinflussen, kann nicht gefolgert werden, dass das Wärmeverhalten nicht beeinflusst würde. Vielmehr ist davon auszugehen, dass bei den Prüfbedingungen das harte Bindemittel das Modul entscheidend beeinflusst.

Aus den obigen Feststellungen können untenstehende Folgerungen gezogen werden:

Für das in der Schweiz üblicherweise verwendete RAP gibt es für EME-Mischungen bezüglich des Anteils gebrochener Körner keine Begrenzung der zudosierten Menge.

Die Anforderungen an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sind (Kategorie C90/1) sehr streng und können bei der Verwendung von RAP nicht eingehalten werden. Das Projekt hat aufgezeigt, dass die EME-typischen Anforderungen Modul und Ermüdung auch mit Gesteinskörnungen der Kategorie C70/10 erfüllt werden können. Auch das Wärmeverhalten – mittels DSV untersucht - kann mit Gesteinskörnungen C70/10 problemlos sichergestellt werden, wenn PmB oder Zusätze verwendet werden. Die Anforderungen der heutigen SN EN 13043 [SN 670 103b; EN 13043: 2002 / AC 2004] an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sollten überprüft werden.

7.2 TP2 Einfluss diverser Zusätze

7.2.1 Vorgehen und Methodik

Neben der Referenzmischung AC EME C1 mit 70 % RAP und B 10/20 wurden 6 weitere Mischungen untersucht:

- 2 unterschiedliche PmB HM
- 2 unterschiedliche Additive
- 1 Naturasphalt
- 1 Gummigranulat

Für sämtliche im Labor hergestellten Mischungen des EME Types C1 wurden Korngrößenverteilung, Anteil RAP und Bindemittelgehalt konstant gehalten.

Steifigkeit (Modul) und Ermüdungsverhalten wurden mit den normierten Prüfverfahren am trapezförmigen 2-Punkt-Biegebalken gemäss den Normen SN EN 12697-26 und SN EN 12697-24 untersucht.

In der Bearbeitung des TP3 «Andere potentiell kritische Eigenschaften» wurde ein verbesserter Druck-Schwellversuch an 6 der 7 oben aufgeführten Mischgutproben durchgeführt. Leider konnte aus Materialmangel nicht alle 7 Proben untersucht werden.

7.2.2 Ergebnisse und Folgerungen

- Alle Mischungen erfüllen die Anforderung der Norm bezüglich Moduls und Ermüdungsverhalten für die Mischgutsorte AC EME C1. Ausser einer Mischung (K14, Additiv I) werden auch die strengeren Anforderungen für den EME-Typ C2 erfüllt.
- Die Tendenz, dass hohe Module mit niedrigen Ermüdungswerte einhergehen, wird bestätigt. So weisen zum Beispiel die Mischungen K10 und K11 die höchsten Module aus und gehören gleichzeitig zur Gruppe der niedrigsten Ermüdungswerte (Mikrodehnung).
- K 9 (PmB HMI) fällt mit einem sehr hohen Ermüdungswert und einem Modul deutlich oberhalb der Norm-Anforderungen auf. Dies zeigt, dass es möglich ist die allgemeine Tendenz (hohes Modul/tiefe Ermüdungswerte) mit entsprechender Modifizierung zu durchbrechen und Mischgut herzustellen, welches mit hohem Modul sehr gute Ermüdungswerte zeigt.
- Mittels modifiziertem Druck-Schwellversuch DSV konnte das Wärmeverhalten angesprochen werden. Dabei zeigte das Mischgut mit reinem B 10/20 schlechtere Werte als alle weiteren Mischungen mit Zusätzen. Bemerkenswert ist, dass das EME mit PmB HmII die besten Resultate zeigte; die übrigen Mischungen lagen nahe beieinander.
- Da je nach Verwendung einer EME-Schicht mehr Wert auf die Steifigkeit oder auf den Widerstand gegenüber Ermüdung gelegt wird, kann keine generell gültige Gesamtbeurteilung durchgeführt werden. An dieser Stelle sei der Hinweis angebracht, dass allzu hohe Steifigkeitswerte im Hinblick auf das Kälteverhalten möglicherweise problematisch sein können.
- Es kann festgehalten werden, dass PmB und Zusätze auch EME-Mischgut mit bereits guten Werten noch weiter verbessern können.

7.3 TP3 Andere potentiell kritische Eigenschaften

7.3.1 Vorgehen und Methodik

Die bei EME-Mischgut normierten Prüfungen der Steifigkeit und des Ermüdungsverhaltens liefern wichtige Angaben zu den Eigenschaften des Mischgutes, sie vermögen jedoch nicht das Praxisverhalten vollumfänglich abzubilden. Die normierten Prüfungen liefern keine Hinweise zu folgenden Themen:

- Verhalten bei hohen Temperaturen:

Da beide Prüfverfahren bei relativ niedrigen Temperaturen durchgeführt werden (+15 °C und +10 °C), kann das Wärmeverhalten nicht abgebildet werden. Auch der bei Typprüfungen [SN EN 13108-20] geforderte Spurbildungstest [SN EN 12697-22, mit grossem Rad] ist nachgewiesenermassen keine aussagekräftige Prüfung.

- Kälteverhalten:

Die bei EME-Belägen verwendeten harten Strassenbaubitumen führen in der Praxis zu Problemen bei höher gelegenen Strassenbelägen. Da diesbezüglich ein anderes

Forschungsprojekt in Bearbeitung ist [TRU_20_01F_01], wurde das Kälteverhalten im vorliegenden Projekt nicht behandelt.

- **Rissfortpflanzung:**

Die Entstehung eines Risses wird in der Prüfung des Ermüdungsverhaltens angesprochen. Zur Untersuchung des Widerstandes eines EME-Belages gegenüber der Ausbreitung eines bereits entstandenen Risses sind keine Publikationen bekannt.

In Absprache mit der Begleitkommission wurde festgelegt, dass die Rissfortpflanzung zu untersuchen sei.

In Absprache mit der Begleitkommission wurde festgelegt, dass das Wärmeverhalten mit dem Druck-Schwellversuch DSV und die Rissfortpflanzung mit dem Semi Circular Bending Test (SCB) untersucht werden sollen.

7.3.2 Ergebnisse und Folgerungen

Druck-Schwellversuch:

In Anlehnung an [Radenberg M., et al (2024)] wurden die Prüfbedingungen verschärft, indem die Prüftemperatur von 50 auf 60 °C erhöht und die Belastungszyklen verlängert wurden. In einer Vergleichsuntersuchung alte / neue Prüfbedingungen wurde die deutlich verbesserte Aussagekraft nachgewiesen:

- Während bei der normierten Prüfung 7 von 11 Proben keinen Wendepunkt zeigten, waren es bei der neuen Methode nur 2 von 11 Proben.
- Bei den neuen Prüfbedingungen wurde das Abbruchkriterium bei der Hälfte der Proben erreicht, bei der normierten Prüfung hingegen bei keiner einzigen Probe.
- Der Mittelwert der Steigung im Wendepunkt der 11 geprüften Proben nahm um 760 % zu.

Aus der Entwicklung der Prüfmethode lassen sich untenstehende Folgerungen ableiten:

- Im Rahmen des Projektes war es nicht möglich eine fundierte und belastbare Entwicklung einer neuen Methode durchzuführen. Die Ergebnisse sind jedoch vielversprechend und zeigen auf, dass in der Optimierung des DSV viel Potential steckt
- Die für das vorliegende Projekt eingeführten neuen Prüfbedingungen haben eine deutlich höhere Aussagekraft als die bisherigen, normierten Prüfbedingungen.

Semi Circular Bending Test (SCB):

Bruchzähigkeit:

Unter Berücksichtigung der Wiederholpräzision kann die Mischung K12 (PmB HM II) als klar beste Mischung bezeichnet werden. Die übrigen Mischungen müssen als gleichwertig betrachtet werden.

Brucharbeit:

Bei der Brucharbeit fällt die Mischung K15 (Gilsonite) etwas ab, die übrigen Mischungen liegen auf vergleichbarem Niveau.

Betrachtet man Bruchzähigkeit und Brucharbeit zusammen, dann fällt auf, dass die Mischung K15 (Gilsonit) zwar eine hohe Bruchzähigkeit aufweist, jedoch eine kleine Brucharbeit. Dies bedeutet, dass die Bruchkraft gross ist, jedoch die Dehnung klein, was typisch für ein sprödes Verhalten ist.

Eine deutliche Differenzierung zwischen den verschiedenen Mischungen konnte mit der SCB-Prüfung bei 15 °C nicht erreicht werden. Möglicherweise liegt dies darin begründet, dass der Anteil RAP mit 70 % in allen Mischungen eine Differenzierung verunmöglichte. Die Ergebnisse schliessen nicht aus, dass bei anderen Prüftemperaturen eine bessere Spreizung der Ergebnisse zu erreichen wäre.

7.4 TP4 Methoden zur Vorselektion

7.4.1 Vorgehen und Methodik

Die beiden in der Norm festgelegten Prüfverfahren zur Bestimmung des Moduls sowie der Ermüdungseigenschaften sind aufwendig und zeitraubend, was unter anderem dazu geführt hat, dass in der Schweiz nur 2 Prüfstellen diese Prüfungen durchführen. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen daher alternative (schnellere und kostengünstigere) Prüfmethoden (Modul und Ermüdung) evaluiert werden.

Vorselektion zur Ermüdungsprüfung:

Aus diversen Untersuchungen (Poulikakos et al, 2014; Sudarsanan, 2022) ist bekannt, dass keine Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Prüfungen des Ermüdungsverhaltens von Asphaltprobekörpern bestehen. Es ist daher nicht zielführend eine alternative Prüfmethode an Asphaltprobekörper zu suchen.

Die Prüfung «Linear Amplitude Sweep Analysis; LAS) gemäss (AASHTO T 391-20) ist ein Prüfverfahren, welches entwickelt wurde, um die Langzeitschäden von Bitumen bei verschiedenen Belastungen zu ermitteln.

Als Ergebnis wird die theoretische Anzahl Zyklen berechnet, welche bei einer Deformation von 2.5 % erforderlich ist, um das Abbruchkriterium zu erreichen

Vorselektion zur Bestimmung des Moduls:

Die Bestimmung des Moduls erfolgte mit der Prüfmethode IT-CY gemäss SN EN 12697-26; Anhang C. In dieser EN werden lange Wartefristen zwischen den einzelnen Arbeitsgängen zur Prüfkörper-Herstellung festgelegt. Diese Wartefristen sind zwar umstritten, müssen jedoch bei der normgerechten Durchführung eingehalten werden. Anders ist dies, wenn Methoden zur Vorselektion gesucht werden, bei denen im Nachgang die normierte Prüfung erfolgt. Daher wurde bei der IT-CY-Prüfung auf die Wartefristen verzichtet.

7.4.2 Ergebnisse und Folgerungen

Vorselektion zur Ermüdungsprüfung:

Am rückgewonnen Bindemittel wurden folgende rheologische Kennwerte bestimmt:

- komplexer Schermodul G^* bei 60 °C; Phasenwinkel δ bei 60 °C; $G^*/\sin \delta$
- BTSV-Kennwerte T_{BTSV} und δ_{BTSV}
- LAS – Ermüdung

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten der einzelnen Bindemittel-Prüfungen zur Ermüdung am Asphalt-Probekörper 2PB-TR ergab Werte zwischen 0.01 und 0.32, es besteht somit keine Korrelation. Obwohl die Anzahl der Wertepaare mit 5 klein ist, kann festgehalten werden, dass keine der angewendeten rheologischen Messungen zur Vorselektion hinsichtlich der Ermüdungsprüfung verwendet werden kann.

Vorselektion zur Bestimmung des Moduls:

Zwischen den beiden Prüfungen IT-CY und 2PB-TR besteht eine recht gute Korrelation. Für die im Rahmen des Projektes untersuchten 5 Wertepaare beträgt R^2 0.75. Aus der laborinternen Statistik des IMP sind 34 Wertepaare bekannt, welche einen Wert R^2 von 0.48 ausweisen. Dass dieser Wert – trotz der grösseren Anzahl Wertepaare – tiefer liegt, ist darauf zurück zu führen, dass in der Statistik auch Ergebnisse anderer Labors eingeflossen sind.

Da die Module IT-CY generell tiefer liegen als die Module 2PB-TR, entsteht eine «Sicherheitsreserve» welche zu folgendem pragmatischen Ansatz führt: Erfüllt ein Mischgut die Anforderungen an das Modul in der IT-CY-Prüfung, wird es mit grosser Wahrscheinlichkeit die Anforderungen auch in der normierten Prüfung 2PB-TR erfüllen.

Der Nutzen einer Vorselektion mittels IT-CY ist vorallem in jenen Fällen gross, bei denen ein Termindruck besteht, denn die IT-CY-Prüfung ist 4 bis 5 Mal schneller.

7.5 Schlussfolgerungen

Für das in der Schweiz üblicherweise verwendete RAP gibt es für EME-Mischungen bezüglich des Anteils gebrochener Körner keine Begrenzung der zudosierten Menge.

Die Anforderungen an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sind (Kategorie C90/1) sehr streng und können bei der Verwendung von RAP nicht eingehalten werden. Das Projekt hat aufgezeigt, dass die EME-typischen Anforderungen Modul und Ermüdung auch mit Gesteinskörnungen der Kategorie C70/10 erfüllt werden können. Auch das Wärmeverhalten – mittels DSV untersucht - kann mit Gesteinskörnungen C70/10 problemlos sichergestellt werden, wenn PmB oder Zusätze verwendet werden. Die Anforderungen der heutigen SN EN 13043 [SN 670 103b; EN 13043: 2002 / AC 2004] an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sollten überprüft werden.

Es kann festgehalten werden, dass PmB und Zusätze auch EME-Mischgut mit bereits guten Werten noch weiter verbessern können.

Zur Prüfung des Verhaltens bei sommerlichen Temperaturen wurde der Druck-Schwellversuch mit Erfolg derart modifiziert, dass aussagekräftige Ergebnisse auch bei hochstandfesten Mischgutsorten möglich wurden.

Die Ergebnisse der SCB-Prüfung zur Beurteilung des Widerstandes gegenüber der Rissfortpflanzung waren nicht sehr ergiebig. Zu diesem Thema sind weitere Arbeiten erforderlich.

Mit rheologischen Prüfungen am rückgewonnenen Bindemittel konnte keine Korrelation zu den Ergebnissen der Ermüdungsversuche 2PB-TR gefunden werden.

Für die Bestimmung des Moduls steht mit der Prüfung IT-CY eine recht verlässliche, schnellere alternative Prüfmethode zur Verfügung.

7.6 Weiterer Handlungsbedarf

7.6.1 Normenwesen

Es besteht Handlungsbedarf bei der Revision von Normen und weiteren Abklärungen:

- SN 670 103b; EN 13043: 2002 / AC 2004: Gesteinskörnungen:
Die normierten Anforderungen an die Gesteinskörner (C90/1) für EME-Mischgut sind unnötigerweise sehr streng und können mit RAP nicht eingehalten werden. Diese Erkenntnis sollte in die Überarbeitung der Norm einfließen.
- SN EN 13108-1: Asphaltmischgut; Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton:
Die festgelegten maximal zulässigen Gehalte an RAP sind aufgrund der Forschungsergebnisse zu überprüfen.
- SN EN 13108-20: Asphaltmischgut; Mischgutanforderungen – Teil 20: Typprüfung:
Zur Prüfung des Verformungsverhalten bei hohen Temperaturen konnten mit einem modifizierten Druck-Schwellversuch klare Aussagen gewonnen werden. Eine Ablösung des wenig aussagekräftigen Spurbildungsversuches bei der Typprüfung sollte angestrebt werden.

7.6.2 Forschung

- Im Projekt wurde nachgewiesen, dass mit einem modifizierten Druck-Schwellversuch auch das Wärme-Verhalten von hochstandfesten Asphaltmischungen angesprochen werden kann. Zurzeit fehlt ein breiter Erfahrungshintergrund zur Festlegung von Anforderungen.
- Das Thema des Widerstandes der Mischungen gegenüber der Fortpflanzung eines Risses bedarf weiterer Abklärungen.
- Im Rahmen der Arbeit konnte keine Korrelation zwischen den rheologischen Eigenschaften des aus dem Mischgut rückgewonnen Bindemittels und dem Ermüdungsverhalten des Mischgutes festgestellt werden. Es würde sich lohnen der Frage nachzugehen, ob aus rheologischen Prüfungen am Mörtel eine Aussage über das Ermüdungsverhalten abgeleitet werden kann.

7.7 Dank

Die vorliegende Arbeit konnte nur dank der grosszügigen Lieferung von Materialien und Baustoffen verschiedener Partner realisiert werden. Wir möchten an dieser Stelle folgenden Firmen für ihre wertvolle Unterstützung ganz herzlich danken:

Miphalt AG, Niederbipp; Herr Ralf Kaufmann
Grisard Bitumen AG, Basel; Herr Christian Jacobi
Shell Switzerland, Zürich; Herr Adrian Zippo
BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde DE; Herr Waldemar Schatz
Advanced Chemical Trading; Gumpoldskirchen A; Herr Michael Leimer
Labotech, Arnay-le-Duc F; Herr Stéphane Faucon-Dumont

Literaturverzeichnis

- Angst, Ch. (1982). *Morphologische Beurteilung verdichteter bituminöser Mischungen*. Zürich: Dissertation ETH 7002.
- Angst, Ch. (2006). *Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bituminöser Schichten mittels Druck-Schwellversuch*. Zürich: Strasse und Verkehr, 10/2006.
- Angst, Ch., Schellenberg, K. (2008). *Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt*. Bern: Bundesamt für Strassen (ASTRA), Forschungsauftrag VSS 2000/433.
- Angst, Ch., Beltzung, F. (2014). *Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen*. Bern: ASTRA Forschungsbericht VSS 2005/504.
- Angst, Ch. et al. (in Bearbeitung). *Verbesserung des Kälteverhaltens von Hochmodul-Asphalt EME: TRU_20_01F*. Bern: ASTRA.
- Benedetto, D. H., de La Roche, C., Pronk, A., & Lundström, R. (2004). *Fatigue of bituminous mixtures*. Materials and Structures, 37(3), 202–216.
- Bueche, N., Kalman, B., Vanelstraete, A., Thogersen, F., & Gaspar, L. (2008). *High stiffness underlayers with high percentage of re-use as developed in the NR2C-project*. International Symposium on Asphalt Pavements and Environment (ISAP Symposium), Zürich, Switzerland.
- Bueche, N., Pittet, M., & Dumont, A.-G. (2015). *Recyclage à chaud des enrobés bitumineux: EP5 – Formulation*. Projet de recherche VSS 2005/456. Bern, septembre 2015.
- Bressi, S. (2015). *An advanced methodology for the mix design optimization of RAP mixtures*. Lausanne: Thèse EPFL.
- Caprez, M., & Rabaiotti, C. (2017). *Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: Synthesebericht*. Forschungsprojekt VSS 2005/450. Bern.
- De la Roche, C. et al. (2013). *Hot recycling of bituminous mixes*. In *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Mixes* (Chapter 7). State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB.
- DIRECT-MAT. (2011). *Dismantling and Recycling Techniques for Road Materials – Sharing Knowledge and Practices*. Abgerufen von <http://direct-mat.fehrl.org/>
- Forum Strasse. (2007). *Asphalt-Recycling*. Oberbuchsitzen: IMP Baute AG.

Forum Strasse. (2017). *Alterung, Verjüngung und Recycling von Asphalt*. Oberbuch-siten: IMP Bautest AG.

Hu, Y. (2024). *Assessing correlations between two linear amplitude sweep (LAS) standards for evaluating the fatigue properties of aged bitumen*. *International Journal of Pavement Engineering*, 25.

Izaks, R., et al. (2022). *Performance properties of high modulus asphalt concrete containing high reclaimed asphalt content and polymer-modified binder*. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(7), 2255–2264.

Ishaq, M. A., & Giustozzi, F. (2021). *Correlation between rheological fatigue tests on bitumen and various cracking tests on asphalt mixtures*. *Materials*, 14.

Kalman, B., et al. (2013). *Re-Road: Summary report – End of life strategies of as-phalt pavements*. Re-Road Project.

Leiva-Villacorta, F., Taylor, A., & Willis, R. (2017). *High-modulus asphalt concrete (HMAC) mixtures for use as base course*. National Center for Asphalt Technology, Report 17-04, June 2017.

Li, X., & Marasteanu, M. (2004). *Evaluation of the low temperature fracture re-sistance of asphalt mixtures using the semi-circular bend test*. *Proceedings of the As-sociation of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*.

Molenaar, A. A. A., Scarpas, A., Liu, X., & Erkens, S. M. J. G. (2002). *Semi-circular bending test: Simple but useful?* *Journal of the Association of Asphalt Paving Tech-nologists*, 71.

Momen, R. M. (2021). *Development of cost-effective high-modulus asphalt concrete (HMAC) mixtures using crumb rubber and local construction materials in Louisi-ana*. Project No. 20BLSU02. Louisiana State University.

MURE. (2018). *Multi-recyclage des enrobés tièdes*. Abgerufen von <https://www.pnmure.fr/program/>

Öngel, A., Bueno, M., Catalano, P., et al. (2025). *KFG-Subgruppe Asphalt: Projekt 2 – Performanceorientierte Testverfahren bei der Wiederverwendung von Ausbaus-asphalten oder Niedertemperaturen*. Noch nicht publiziert.

Olard, F., Le Noan, C., Bonneau, D., Dupriet, S., & Monnier, Y. (2008). *Le recyclage à très fort taux (>50 %) des enrobés chauds et des enrobés tièdes pour une construc-tion routière durable*. RGRA, 866, avril–mai 2008.

Paramix. (2002). *Road pavement rehabilitation using enhanced mixtures*. Abgeru-fen von <http://www.cimne.com/paramix/>

Perret, J., Dumont, A.-G., Turtshy, J.-C., & Ould-Henia, M. (2001). *Évaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement : enrobés à haut module*. Man-dat de recherche VSS-OFROU 20/96. Bern, décembre 2001.

Plachkova-Dzhurova, P. (2020). *DSV – wohin geht die Reise?* *Asphalt*, Heft 8.

Poulikakos, L., Pittet, M., Dumont, A.-G., & Partl, M. (2014). *Comparison of the two-point bending and four-point bending test methods for aged asphalt concrete field samples*. *Materials and Structures*, 48, 2901–2913.

Radenberg, M., Jule, D., Nytus, N., & Müller, D. (2024). *Neue Prüfverfahren und -Parameter: Übertragung des Bewertungshintergrundes des Verformungswiderstandes von Walzasphalt für die vertragliche Anwendung von Performance-Anforderungen*. Forschungsprojekt FE 07/0308/2020/EGB; Publikation in Vorbereitung.

Schellenberg, K. (2008). *Die Wärmestandfestigkeit von Asphalt. Der Druckschwellversuch seit 25 Jahren in der Bewährung*. Bergisch Gladbach: Kirschbaum-Verlag; *Strasse und Autobahn*, 9/2008.

Samaris. (2005). *Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures*. Abgerufen von <http://samaris.zag.si/index.htm>

Superpave. (1994). *The SUPERPAVE mix design system: Manual of specifications, test methods and practices*. SHRP-A-379. Washington DC.

Sudarsanan, N., & Kim, Y. R. (2022). *A critical review of fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, October 2022.

SN EN 12697-22. (2024). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 22: Spurbildungstest*.

SN EN 12697-24. (2019). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung*.

SN EN 12697-25. (2019). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 25: Druckschwellversuch*.

SN EN 12697-26. (2019). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 26: Steifigkeit*.

SN EN 12697-30. (ohne Jahr). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 30: Probenvorbereitung – Marshall-Verdichtungsgerät*.

SN EN 12697-31. (ohne Jahr). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 31: Herstellung von Probekörpern mit dem Gyrator-Verdichter*.

SN EN 12697-33. (ohne Jahr). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 33: Probestückvorbereitung mittels Walzverdichtungsgerät*.

SN EN 12697-44. (2020). *Asphalt – Prüfverfahren – Teil 44: Bestimmung der Rissausbreitung mittels Halbzylinder-Biegeversuch*.

SN 670 103b / EN 13043:2002 / AC:2004. *Gesteinskörnungen für Asphalte und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen*.

SN EN 13108-1. (2008). *Asphaltemischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton*.

SN EN 13108-8. (2019). *Asphaltemischgut – Mischgutanforderungen – Teil 8: Ausbauasphalt*.

SN EN 13108-20. (2022). *Asphaltemischgut – Mischgutanforderungen – Teil 20: Typprüfung.*

SN EN 13924-1. (2016). *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Anforderungswerk für spezielle Straßenbaubitumen – Teil 1: Harte Straßenbaubitumen.*

SN EN 14770. (2024). *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR).*

SN EN 17643. (ohne Jahr). *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Äquischermodultemperatur und des Phasenwinkels im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – BTSV-Prüfung.*

TP Asphalt-StB, Teil 25 B1. (2020). *Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme.*

AASHTO T 391-20. (2020). *Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.* Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

FHWA. (1978–1983). *Demonstration Project 39 – Asphalt Recycling.* Federal Highway Administration, Washington, DC.

NCHRP. (1978). *Program Synthesis of Highway Practice No. 54: Recycling Materials for Highways.* Transportation Research Board, Washington, DC.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 11.09.2025

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2018/329

Projekttitel: Auslotung Grenzbereich RC-Asphaltgranulat-Einsatz in den AC EME 22 C1/C2

Enddatum: 31.12.2025

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Für das in der Schweiz üblicherweise verwendete RAP gibt es für EME-Mischungen bezüglich des Anteils gebrochener Körner keine Begrenzung der zudosierten Menge.

Die Anforderungen an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sind (Kategorie C90/1) sehr streng und können bei der Verwendung von RAP nicht eingehalten werden. Das Projekt hat aufgezeigt, dass die EME-typischen Anforderungen Modul und Ermüdung auch mit Gesteinskörnungen der Kategorie C70/10 erfüllt werden können. Auch das Wärmeverhalten – mittels Druck-Schwellversuch DSV untersucht – kann mit Gesteinskörnungen C70/10 problemlos sichergestellt werden, wenn PmB oder Zusätze verwendet werden. Die Anforderungen der heutigen SN EN 13043 [SN 670 103b; EN 13043: 2002 / AC 2004] an die Gesteinskörnungen für EME-Mischgut sollten überprüft werden.

Es kann festgehalten werden, dass PmB und Zusätze auch EME-Mischgut mit bereits guten Werten noch weiter verbessern können.

Zur Prüfung des Verhaltens bei sommerlichen Temperaturen wurde der Druck-Schwellversuch mit Erfolg derart modifiziert, dass aussagekräftige Ergebnisse auch bei hochstandfesten Mischgutsorten möglich wurden.

Die Ergebnisse der SCB-Prüfung zur Beurteilung des Widerstandes gegenüber der Rissfortpflanzung waren nicht sehr ergiebig. Zu diesem Thema sind weitere Arbeiten erforderlich.

Mit rheologischen Prüfungen am rückgewonnenen Bindemittel konnte keine Korrelation zu den Ergebnissen der Ermüdungsversuche 2PB-TR am Mischgut gefunden werden.

Für die Bestimmung des Moduls steht mit der Prüfung IT-CY eine recht verlässliche, im Vergleich zur normierten Prüfung (2PB-TR) schnellere, alternative Prüfmethode zur Verfügung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das Ziel des Projektes bestand darin, eine grössere Prozesssicherheit bei der Zugabe von Asphaltgranulat RAP bei den EME-Mischgutsorten zu erreichen. Das Projekt soll die Grenzen der Beimischung von RAP festlegen und Lösungen zur Anwendung von Recycling-Asphalt aufzeigen.

Diese Ziele sind erreicht worden, indem nun Klarheit darüber besteht, dass mit dem in der Schweiz vorkommenden RAP keine materialtechnologischen Grenzen für die Zugabe an RAP bestehen. Die heutigen Grenzen bestehen in den Prozessen der Mischgutherstellung (Aufbereitung des RAP, Zugabe von frischen Komponenten etc) und in ökonomischen Fragen (bis zu welchem Gehalt an RAP lohnt sich der Mehraufwand?). Zudem wurde nachgewiesen, dass das Wärmeverhalten von EME-Belägen mit einem modifizierten Druck-Schwellversuch angesprochen werden kann. Auch konnte aufgezeigt werden, dass mit geeigneten Zusätzen gleichzeitig die Steifigkeit und das Ermüdungsverhalten weiter verbessert werden kann.

Folgerungen und Empfehlungen:

Es besteht Handlungsbedarf bei der Revision von Normen und weiteren Abklärungen:
SN 670 103b; EN 13043: Gesteinskörnungen: Die normierten Anforderungen an die Gesteinskörner (C90/1) für EME-Mischgut sind unnötigerweise sehr streng und können mit RAP nicht eingehalten werden.
SN EN 13108-1: Mischgutanforderungen: Die festgelegten maximal zulässigen Gehalte an RAP sind aufgrund der Forschungsergebnisse zu überprüfen.
SN EN 13108-20; Typprüfung: Eine Ablösung des wenig aussagekräftigen Spurbildungsversuches durch den Druck-Schwellversuch sollte angestrebt werden.

Zurzeit fehlt ein breiter Erfahrungshintergrund mit dem verbesserten Druck-Schwellversuch, um Anforderungen festzulegen.
Das Thema des Widerstandes der Mischungen gegenüber der Fortpflanzung eines Risses bedarf weiterer Abklärungen.
Es würde sich lohnen der Frage nachzugehen, ob aus rheologischen Prüfungen am Mörtel eine Aussage über das Ermüdungsverhalten abgeleitet werden kann.

Publikationen:

Keine, in der Planung.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Angst

Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Forschungsstelle hat die 4 Teilprojekte systematisch und umfassend bearbeitet. Entscheidende Weichenstellungen, wie die Wahl der Zusätze oder der Produkte von modifizierten Bindemittel, wurden gemeinsam mit der Begleitkommission gefällt. In allen 4 Teilprojekten TP wurden die Ziele erreicht und es konnten für die Praxis konkrete Ergebnisse und wertvolle Folgerungen abgeleitet werden. Im TP1 konnte festgestellt werden, dass mit der in der Schweiz zu erwartenden Qualität der Gesteinskörnungen im RAP keine Begrenzung des Anteils an RAP erforderlich ist. Das TP 2 zeigte, dass mit Zusätzen die mechanischen Eigenschaften weiter gesteigert werden können. Im TP3 wurde eine bestehende Prüfmethode weiter entwickelt, um das Verhalten von EME-Mischgut bei hohen Temperaturen zu charakterisieren. Im TP4 wurde eine rasche Prüfmethode zur Vorselektion von Mischungen hinsichtlich der aufwändigen, normierten Bestimmung des E-Moduls nachgewiesen. Wie zu erwarten war, besteht keine entsprechende Prüfmethode für die Bestimmung des Ermüdungsverhaltens.

Umsetzung:

Die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis wird einerseits dadurch erfolgen, dass die Bauwirtschaft aus den Erkenntnissen Vorteile nutzen kann und diese unmittelbar umsetzen wird. Andererseits sind die Normierungsgremien der VSS gefordert, die notwendigen Anpassungen / Aktualisierungen der Normen umzusetzen. Die Forschungsstelle wird die Ergebnisse in Fachzeitschriften publizieren, um den Wissenstransfer sicher zu stellen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Ein breiter Erfahrungshintergrund zur Festlegung von Anforderungen mit dem modifizierten DSV sollte erarbeitet werden.
Rheologische Untersuchungen am Mörtel könnten möglicherweise das Ermüdungsverhalten von Asphaltmischungen charakterisieren.
Das Thema des Widerstandes der Mischungen gegenüber der Fortpflanzung eines Risses bedarf weiterer Abklärungen

Einfluss auf Normenwerk:

Die Normen SN 670 103b; EN 13043: 2002 / AC 2004, Gesteinskörnungen, SN EN 13108-1: Asphaltmischgut; Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton, sowie SN EN 13108-20: Asphaltmischgut; Mischgutanforderungen – Teil 20: Typprüfung sollten überarbeitet werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Bucheli

Vorname: Hanspeter

Amt, Firma, Institut:

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: