

Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 114

bast

Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

von

Konrad Mollenhauer

Sachgebiet Bau und Erhaltung
von Verkehrswegen
Universität Kassel

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 114

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 07.0282/2015/FRB:
Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen Asphalt

Fachbetreuung

Oliver Ripke

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 978-3-95606-351-0
ISBN 0943-9323

Bergisch Gladbach, September 2017

Kurzfassung - Abstract

Studie zum Anwendungspotenzial von werks-gemischtem Kaltbauweisen Asphalt

Die Produktion von Heißasphalt im Asphaltmischwerk hat einen großen Anteil an den in Ökobilanzen erfassten Umweltindikatoren, z.B. der CO₂-Emissionen. Ein Großteil des bei der Asphaltproduktion erforderlichen Energieverbrauchs wird zur Trocknung und Erwärmung der Gesteinskörnungen aufgebracht. Vermehrt wird daher international bitumenhaltiges Mischgut bei Umgebungstemperaturen hergestellt und eingebaut. Als Bindemittel kommen dabei Bitumenemulsion oder Schaumbitumen zur Anwendung. Das Baustoffverhalten des Kaltmischgutes unterscheidet sich in verschiedenen Aspekten vom mechanischen Verhalten von Heißasphalt. Dies betrifft alle Phasen der fertiggestellten Schicht – Mischgutherstellung, Lagerung und Transport, Einbau, Verdichtung sowie Kurz- und Langzeitverhalten.

Um das bautechnische Potenzial der bitumengebundenen Kaltbauweisen für die Anwendung in Deutschland abzuschätzen wurden internationale Anwendungen und Erfahrungen mit der Bauweise zusammengestellt und vergleichend bewertet.

Dabei können anhand der eingesetzten Bindemittelgehalte vier bitumenhaltige, kalt verarbeitete Mischgutarten unterschieden werden: Kaltasphalt, Grave Emulsion, Bitumen-Stabilisiertes Mischgut und Bitumen-Zement-Stabilisiertes Mischgut. Insbesondere bei den letzten drei Mischgutsorten unterscheidet sich das mechanische Baustoffverhalten stark von jenem von Heißasphalt. Daher sind vom bisherigen Standard abweichende Dimensionierungs- und Bauverfahren erforderlich. Um die Kaltbauweisen in Deutschland zu erproben sind weitere Forschungsaktivitäten hinsichtlich des mechanischen Verhaltens der Kaltbaustoffe erforderlich.

Die praktische Umsetzung international erprobter Bauweisen kann parallel in Untersuchungsstrecken erfolgen, welche durch Lebenszyklus-Studien begleitet werden sollten, um ökologische und ökonomische Vorteile der Bauweisen belegen zu können.

Potentials for application of cold bituminous bound mixtures in Germany

The production process of hot-mix asphalt and here especially the energy demand for drying and heating of the aggregates, inhibits the main proportion of the overall life-cycle associated impacts (e.g. emissions of greenhouse gases) in the production of flexible pavements. Therefore, alternative technologies for paving are required in long-term. Internationally, feasible experiences were gained with cold bituminous mixtures on basis of bituminous emulsion and foamed bitumen. However the resulting mixtures inhibit considerable differences to hot-mix asphalt and therefore demand for specific procedures for mix design and pavement design.

In order to estimate the applicability of these materials in Germany, the international literature as well as several national specification documents were assessed and compared. Regarding the applied binder and binder contents different type of cold bituminous mixtures can be distinguished: Cold asphalt, Grave emulsion, bitumen stabilized materials, bitumen-cement-stabilized materials and cold mixtures for sealing hazardous reclaimed pavement material. The mechanical property of these materials differ considerable from the properties of hot-mix asphalt. The presence of water during mixing, laying and compaction results in high void content and a long-lasting curing process of several months within the material gains strength and stiffness. The internationally applied mix design procedures are based on mechanical tests of strength and stiffness as well as water sensibility which demands for suitable laboratory compaction and curing procedures. However, the practical applicability in various climatic regions throughout Europe indicates the general applicability of these materials in Germany.

Summary

Potentials for application of cold bituminous bound mixtures in Germany

1 Introduction

The production process of hot-mix asphalt and here especially the energy demand for drying and heating of the aggregates, inhibits the main proportion of the overall life-cycle associated impacts (e.g. emissions of greenhouse gases) in the production of flexible pavements. Therefore, alternative technologies for paving are required in long-term. Internationally, feasible experiences were gained with cold bituminous mixtures on basis of bituminous emulsion and foamed bitumen.

2 Methodology

Internationally, cold bituminous mixtures are applied regularly in several countries. In order to check the applicability of cold bituminous mixtures in Germany, national specification documents, research reports and site data studies were assessed in terms of:

- Type of material according to binder type and content,
- climatic conditions | regions of application,
- traffic loading,
- mix design procedures,
- pavement design procedures,
- Mix preparation, laying and compaction,
- Short- and long-term performance.

3 Results

3.1 Types of cold bituminous materials

From the various studies evaluated, specific types of cold bituminous materials could be identified.

They differ regarding the binder type and content which results in varying material properties:

- **Cold asphalt (CA):**
Asphalt mix prepared with bituminous emulsion in which all aggregates are covered completely with bitumen. This demands for high residual bitumen contents (> 6 %).
- **Grave Emulsion (GE):**
Base layer mixture prepared with bituminous emulsion which builds after breaking a bituminous mortar in which fines and fine aggregates are bonded. The coarse aggregates are bonded into the mastic but not fully covered by the bitumen.
- **Bitumen-stabilised material (BSM):**
BSM with bituminous emulsion (BSM-BE) a non-completely covered asphalt mastic is produced in which the coarse aggregates are embedded.
BSM with foamed bitumen is characterized by bitumen droplets which glues fine and coarse aggregates without creating a continuously bound mastic.
- **Bitumen-cement-stabilised materials (BCSM)**
BSM-type of material with addition of cement or other mineral binder of more than 1 % for increasing the short-term strength of the material. besides the non-continuously bituminous bond also rigid bonds occur in the material.
- **Sealing cold recycling materials (SCRM)**
By increased binder content a sealing effect for the recycling of reclaimed road materials with hazardous substances (e. g. tar) is achieved.

Typical binder contents for the classified materials are summarized in Table 1. Based on figures presented by Collings et al [1] Figure 1 contains the principle type of bonds occurring in the various cold bituminous mixtures.

Table 1. Proposal for classification of bituminous cold mixtures

Type of material	Abb.	Binder (BE/FB)	Bitumen content	Cement content
Cold asphalt	CA	BE	~ 6 %	-
Grave Emulsion	GE	BE	≥ 3 %	-
Bitumen stabilised material	BSM-BE	BE	1 to 3 %	< 1 %
	BSM-FB	FB		
Bitumen-cement-stabilised material	BCSM-BE	BE	1 to 3 %	1 to 3 %
	BCSM-FB	SB		
Sealing cold recycled material	SCRM-BE	BE	3 to 6 %	1 to 6 %
	SCRM-FB	SB		

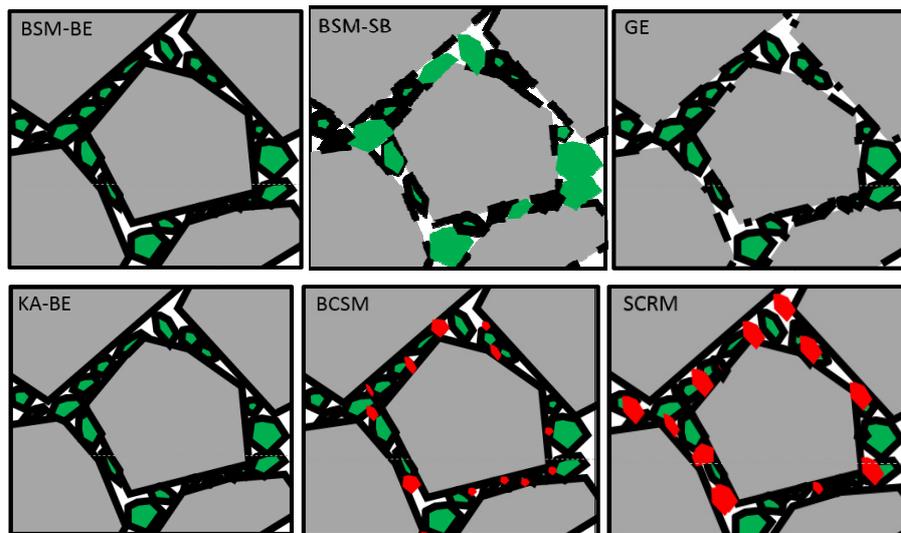


Figure 1. Illustration of the binding status within various types of cold bituminous mixtures within coarse aggregates (grey, fine aggregates (green), bituminous mastic (black) and cement (red))

Table 2. Synthesis of requirements applied in national mix design specifications [2]

Country	Mixture type	Bitumen type	Binder content [%]			Fines <0,063 mm [%]	Requirements			
			Bitumen emulsion (residual)	Foamed bitumen	Cement		min.	max.	Moisture sensitivity	minimum stiffness
Czech. Rep.	BSM	BE	0,9 – 1,6	-	-	≤ 6	x	-	x	-
Portugal			≥ 1,5	-	≤ 1 %	0 - 3	x	-	x	-
Spain			≥ 1,5	-	≤ 1 %	0 - 3	x	-	x	-
UK			≥ 3,0	-	-	5 – 22	-	-	x	x
Ireland			3,3±0,3	-	-	0 – 8	x	-	x	-
Czech Rep.	BSM	FB	-	0,9 – 1,6	-	≤ 6	x	-	x	-
Finland			-	≥ 0,8 %	1/3 · B	4 – 8	x	-	x	-
South Afrika			-	≤ 3,5-	≤ 1,0	4 – 10	x	x	x	-
Franve	GE	BE	≥ 3,6	-	-	4 – 8	x	-	x	x
France			≥ 4,0	-	-	4 – 8	x	-	x	x
Schwitzerland	BCSM	BE	1,8 – 3,0	-	1,5 – 2,5	2 - 12	x	-	x	-
UK			≥ 3,0	-	≥ 1,0	5 – 22	-	-	x	x
Switzerland	BCSM	FB	-	2,5 – 5,0	1,0 – 2,0	3 – 12	x	-	x	-
Czech. Rep.	SCRM	BE	2 – 3,5	-	2,5 – 5,0	≤ 15	x	x	x	-
Germany			2,0 – 6,0	-	3,0 – 6,0	4 – 9	x	x	x	-
Czech. Rep.		FB	-	2 – 3,5	2,5 – 5,0	≤ 15	x	x	x	-
Germany			-	2,5 – 5,0	1,0 – 3,0	4 – 9	x	x	x	-

As a summary of several national specification documents, in Tabelle 15 the specified binder contents as well as type of requirements on strength and stiffness of the materials are synthesized. In all documents, the water sensitivity of the mixtures are assessed indicating the importance of this property. For mixtures including considerable proportions of cement, also maximum strength values are defined in order to ensure flexible material properties.

The comparability of applied strength values is not possible, because the applied test methods (uniaxial compression strength or indirect tensile

strength) as well as the test parameters vary in temperature.

3.2 Properties of cold bituminous mixtures

All types of cold bituminous materials have specifically high void contents in common. Reason for this is the presence of water during mixing and compaction which demands for voids between aggregates and binders. Furthermore, cold bituminous materials are characterized by a lower compactibility compared to hot-mix asphalt which results in an increased air void content.

However, research results indicate that the air void within compacted cold mixtures are smaller compared to air voids in hot-mix asphalt [3]. (see Bild 6). The size of the voids and the fact, that they are not linked to each other is an explanation for reduced binder ageing within the mixtures during service life. Furthermore, during long-term service life, the air void decreases by reduction of water content (drainage and evaporation) and consolidation by traffic loading.

In order to increase the development of early-life strength as well for controlling the breaking process of bitumen emulsion, active fillers (hydrated lime, cement or fly ash) are usually added to the mixtures. However, when the content of these mineral binders exceed 1 % within the mix, rigid bonding occurs within the mixtures besides bituminous bonds.

However, the high air void content and comparably high moisture content shortly after paving and compaction reduces the strength of the material and its resistance against deformation. Therefore, cold bituminous mixtures demands for well-graded aggregate skeleton which is responsible for early-life bearing capacity.

The decrease of water content after compaction due to drainage and evaporation results in a slow increase of strength within the material. This effect, called 'curing', takes several months to some years as repeated analyses of pavements indicate. In order to assess long-term mechanical properties, the site curing has to be simulated during mix design, too. Therefore accelerated curing procedures are applied, varying between oven storing at elevated temperature for some days up to storing sealed specimen for a month before testing. besides the actual climate conditions in field, also the mixture type affects the choice of curing method. Especially mixtures with cement included need some time and moisture to allow for hydration process.

3.3 Life-cycle assessments

In several studies, the environmental benefits of application of cold mixtures were assessed (see Tabelle 17). In most studies, the application of cold bituminous mixtures is compared to hot-mix asphalt. By the avoidance of drying and heating of the aggregates, considerable amounts of CO₂-emissions can be reduced. If further the application of mobile mixing plants in order to reduce transport distance as well as the use of reclaimed asphalt in the cold mixtures are taken into account, the benefits may reach CO₂-reductions of up to 67 %.

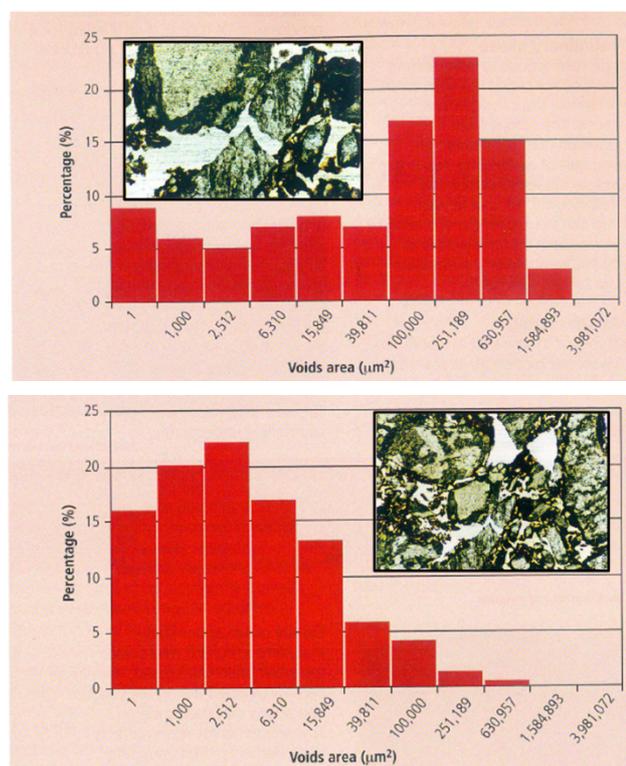


Figure 2. Size distribution of air voids in hot-mix asphalt (top figure) and emulsion-produced cold mix (bottom) [3]

Table 3: In ökobilanziellen Studien erfasste CO₂-Emissionen je t eingebauten Baustoffes [kg CO₂/t]

Quelle	Inhalt der Studie (Phasen)	kg CO ₂ -Emissionen je t eingebauten Mischgutes [kg CO ₂ / t] bzw. für das betrachtete Bauwerk [kg CO ₂ / Bauwerk]								Reduzierung [%]	Art der Kaltbauweise
		Rohstoffgewinnung		Mischgutherstellung		Transport, Einbau & Verdichtung		Gesamt			
		HMA	KMA	HMA	KMA	HMA	KMA	HMA	KMA		
[4]	A1 – B7	869.000	-	620.000	-	103.000	-	1.592.000	-		
[5]	A1 – A5	1,5	1,5	35,5	7,1	5,3	5,1	42,3	13,7	-67 %	KA-BE
[6]	A1 – A5	nicht im Detail veröffentlicht								-30 %	BSM-BE
[6]	A1 – A5	nicht im Detail veröffentlicht								-23 %	BSM-SB
[7]	A1 – A5	1.104	713	1.491	330	154	151	2.748	1.194	-57 %	GE-BE
[7]	A1 – A5	1.104	444	1.491	382	154	151	5748	978	-64 %	BSM-BE

4 Applicability in Germany

The wide application of bituminous cold mixtures within various climatic conditions indicate the general applicability of these pavement materials in Germany.

Regarding the various mixture types following conclusions regarding the applicability in Germany can be drawn:

The application of **Cold asphalt** demands for a very good combination of bituminous emulsion and aggregate type. The Scandinavian approach of construction of pavements with high flexibility is only possible for low traffic loads and won't allow for hot temperatures. The French approach of applying cold asphalt on top of bases with high bearing capacity demands for a fast evaporation of the moisture after compaction. The generally moist German climate prohibits therefore the application.

Regarding **Grave Emulsion** –type mixtures are often applied in France as well as Ireland. therefore its applicability in moist mi-Europe climate seems to be suitable.

Bitumen-stabilised material based on bitumen emulsion inhibits the danger of re-emulsifying when water is seeping into the constructed layer with high void content an non-continuously bonding. This effects are reduced for BSM with foamed bitumen. The successful worldwide use of this type of material indicates the general applicability also in Germany. However, the specific material properties demand for a pavement design approach which differs considerably from the design methodology applied for hot-mix asphalt.

Bitumen-cement-stabilized materials are already applied in Germany. However when comparing the various national pavement design procedures it seems to be possible to reduce the thickness of the hot mix asphalt layers usually paved on top of the cold mix. A checking of the applied methodology in Germany would increase the economic value as well as the sustainability of pavements based on BCSM.

Sealing cold recycling materials demands for comparably high binder contents. When non-contaminated reclaimed road material is recycled these mixtures won't reach economic valuable application.

References

- [1] Asphalt Academy, Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials, Pretoria: Asphalt Academy, 2009.
- [2] F. Batista, J. Valentin, Z. Cizkova, T. Valentova, D. Simnofske, K. Mollenhauer, A. Tabakovic, C. McNally und M. Engels, „Report on available test and mix design protocols for cold-recycled bitumen stabilised materials. CoRePaSol deliverable D1.1,“ Prag, 2014.
- [3] J.-P. Serfass, X. Carbonneau, F. Delfosse und J.-P. Triquigneaux, „Emulsified Asphalt Mixes: towards a complete design method,“ *Revue Générale des Routes*, pp. 2-22, 2010.
- [4] D. Deutscher Asphalt Verband, „Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen,“ 2009, p. S. 33.
- [5] R. Lundberg, T. Jacobson, P. Redelius und J.-A. Östlund, „Production and durability of cold mix asphalt,“ in *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress | 1-3 June 2016 | Prague, Czech Republic*, paper EE74, 2016.
- [6] B. Eckmann, F.-. Delfose und E. Chevalier, „Reducing emissions and consumption of virgin aggregates through cold in-placve recycling,“ in *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Istanbul, 2012.
- [7] X. Guyot, „Bitumen Emulsion Mixes: "Grave Emulsion" and "High RAP Content Cold Mix",“ in *3rd ISAP APE symposium*, Sun City, 2015.
- [8] E. A. P. A. EAPA, „Asphalt in Figures,“ 2013.
- [9] FGSV, Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen M VB-K, 2007.
- [10] FGSV, Merkblatt für Kaltrecycling in Situ von

Straßen M KRC, 2005.

- [11] Department for Transport, „Manual of contract documents for highway works. Volume 1: Specification for highway works. Series 900. Road Pavements - Bituminous bound materials,“ 2008.
- [12] H. Al Nageim und S. Al-Busaltan, „Stiffness, Creep Properties and XRD Analysis of a New Fast-Curing Cold Mix Asphalt for Use in Highway Pavement,“ in *Procs. E&E conference*, Prag, 2016.
- [13] H. Lacalle Jiménez, N. Thom und J. Edwards, „Comparison between laboratory results for cold recycled bound materials,“ in *Procs. E&E conference*, Prag, 2016.
- [14] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 16/2015,“ 2015.
- [15] H. Müssenich und O. Rienhoff-gembus, „Kaltrecycling (KRC) in situ an der B 52,“ *Straße und Autobahn*, Nr. 9, pp. 650 - 658, 2010.
- [16] Wirtgen GmbH, „kaltrecycling für die Sanierung des Ayrton Senna Highways,“ Windhagen, 2016.

Inhalt

	3.6	Ökobilanzielle Erkenntnisse	35
	4	Anwendungspotenzial in Deutschland	38
	4.1	Einsatzpotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen Asphalt in Deutschland	38
	4.1.1	Kaltasphalt (KA)	38
	4.1.2	Grave Emulsion (GE)	38
	4.1.3	Bitumen-Stabilisiertes Mischgut (BSM)	38
	4.1.4	Bitumen-Zement-Stabilisiertes Kaltmischgut (BCSM)	39
	4.1.5	Versiegelnde KRC-Baustoffe (SCRM)	39
	4.2	Vorschlag eines Arbeitsplanes für die Erprobung der Kaltbauweise in Deutschland	39
	4.2.1	Forschungsaktivitäten	39
	4.2.2	Untersuchungsstrecken	39
	4.2.3	Lebenszyklus-Bewertungen	39
	4.2.4	Standardisierung	39
	5	Zusammenfassung	40
		Literatur	41
		Anhang	
		1 Einleitung	
		2 Projekt CoRePaSol	
		3 Projekt EARN	
		4 Projekt AllBack2Pave	
		Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter: http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.	
1		Einleitung und Problemstellung	10
2		Untersuchungsmethodik	10
3		Ergebnisse der Literaturstudie	11
3.1		Varianten und Eigenschaften von werksgemischten Kaltbauweisen Asphalt	11
3.1.1		Bitumenemulsionsgebundenes Kaltmischgut	11
3.1.2		Kaltmischgut mit Schaumbitumen	13
3.1.3		Kaltrecycling-Baustoffe	13
3.1.4		Definition bzw. Klassifikation der betrachteten Straßenbaustoffen	14
3.2		Auswertung von Regelwerken	16
3.2.1		Frankreich	16
3.2.2		Schweiz	18
3.2.3		Vereinigtes Königreich und Irland	19
3.2.4		Südafrika	22
3.2.5		Vergleich der Regelwerke	26
3.3		Dauerhaftigkeit	27
3.3.1		Berichte über Versuchsstraßen	27
3.3.2		Praxiserfahrungen zur Dauerhaftigkeit	27
3.3.3		Ergebnisse aus Beschleunigten Belastungsversuchen	28
3.4		Einflussfaktoren der Mischgutzusammensetzung auf die mechanischen Eigenschaften	30
3.4.1		Hohlraumgehalt	30
3.4.2		Aktive Füller	30
3.5		Zusammenstellung der Verfahrenspraxis	32
3.5.1		Mix Design – Prüfverfahren	32
3.5.2		Herstellung	33
3.5.3		Lagerfähigkeit und Transportbedingungen	33
3.5.4		Einbau und Verdichtung	33
3.5.5		Kurzzeitverhalten – Curing	34
3.5.6		Klimatische Einflüsse auf den Einsatz bitumenemulsionsgebundener Baustoffe	34
3.5.7		Einsatzgrenzen hinsichtlich der Verkehrsbeanspruchungen	35
3.5.8		Dimensionierung von Befestigungen mit bitumenemulsionsgebundenem Kaltmischgut	35

1 Einleitung und Problemstellung

Die Produktion von Heißasphalt im Asphaltmischwerk hat einen großen Anteil an den in Ökobilanzen erfassten Umweltindikatoren, z.B. der CO₂-Emissionen [1]. Ein Großteil des bei der Asphaltproduktion erforderlichen Energieverbrauchs wird zur Trocknung und Erwmung der Gesteinskörnungen aufgebracht. Aus diesem Grund werden zunehmend Verfahren untersucht und eingesetzt, mit denen die Herstellungstemperaturen von Asphaltmischgut reduziert werden können. Neben den Technologien zur Herstellung der international als „warm“ und „halb-warm“ bezeichneten Asphaltmischgutformen, z. B. durch die Zugabe von viskosittsverndernden Zusätzen, wird vermehrt bitumenhaltiges Mischgut bei Umgebungstemperaturen hergestellt und eingebaut. Als Bindemittel kommen dabei Bitumenemulsion oder Schaumbitumen zur Anwendung.

International werden in zahlreichen Ländern seit längerem bitumenhaltige Kaltmischgutsorten eingesetzt. So wurden gemäß der Statistik des Europäischen Asphalt-Verbandes 2013 in Europa etwa 4.000.000 t bitumenhaltiges Kaltmischgut eingebaut [2], wobei die Anwendung schwerpunktmäßig in Frankreich, Schweden, der Schweiz und der Türkei erfolgt. Kaltwerksgemischte Asphalte können durch die Verwendung von Bitumenemulsion oder Schaumbitumen hergestellt werden. In beiden Fllen unterscheidet sich das Baustoffverhalten in verschiedenen Aspekten vom mechanischen Verhalten von Heißasphalt. Dies betrifft alle Phasen der fertiggestellten Schicht – Mischgutherstellung, Lagerung und Transport, Einbau, Verdichtung sowie Kurz- und Langzeitverhalten.

In Deutschland sind bitumengebundene Kaltbaustoffe lediglich in Form von Dünnen Schichten (DSK) oder Oberflächenbehandlungen bei Instandsetzungsverfahren in Anwendung. Bitumenhaltige, kalt verarbeitete Baustoffe zur Herstellung von Tragschichten, welche einen substantiellen Beitrag zur Tragfähigkeit der Befestigung beitragen, werden nur zur Verwertung teerpechhaltiger Straßenausbaustoffe verwendet [3], [4]. Aufgrund von Gesundheitsrisiken sowie zur Reduzierung der Übertragung von Entsorgungsproblemen in die Zukunft sind diese Anwendungen rückläufig und werden ab 2018 nicht mehr bei Befestigungen von Bundesfernstraßen angewendet [5].

Um das bautechnische Potenzial der bitumengebundenen Kaltbauweisen für die Anwendung in Deutschland abzuschätzen soll die vorliegende Studie die internationalen Anwendun-

gen und Erfahrungen mit der Bauweise zusammenstellen und vergleichend bewerten.

Das dabei angewendete Vorgehen ist in Kapitel 2 beschrieben. Die Ergebnisse der Analyse verschiedener Regelwerke sowie weiterer Fachliteratur ist in Kapitel 3 zusammengestellt. Dabei werden zunächst verschiedene Varianten bitumengebundenen Kaltmischgutes differenziert und klassifiziert. Daraus werden in Kapitel 4 mögliche Beispiele für die Anwendung der Bauweisen in Deutschland erarbeitet und ein Vorgehen für die weiterführende Bearbeitung der Thematik erarbeitet.

2 Untersuchungsmethodik

Zur Erfassung der erforderlichen Informationen wurde zunächst die nationale und internationale Literatur hinsichtlich beschriebener Technologien zur Verwendung von bitumenhaltigem Kaltmischgut im Straßenbau analysiert. Im Weiteren wurden bestehende Regelwerke identifiziert und ausgewertet. Fehlende Informationen wurden durch Experteninterviews ergänzt.

Die verschiedenen Quellen werden hinsichtlich folgender Kriterien gegliedert, um eine systematische Auswertung des jeweiligen Anwendungspotenzials in Deutschland zu ermöglichen:

- Art des bitumenhaltigen Kaltmischgutes: Es sind international verschiedene Baustoffkonzepte in Anwendung, welche individuelle abgestimmt sind auf Fahrbahnkonstruktionen und Klimabedingungen. Daher erfolgt eine Kategorisierung der Baustoffkonzepte um spätere Zusammenhänge klarer identifizieren zu können,
- Regionale Klimaverhältnisse,
- Verkehrsbelastung.

Aus den verschiedenen Literaturquellen (Forschungsberichte, Baustellen-Reports, Tagungsbeiträge, Zeitschriftenartikel) werden die relevanten Informationen zu folgenden Inhalten zusammengestellt:

- Baustoffzusammensetzung (Korngrößenverteilung, Bindemittelart und –gehalte, Gesteinsart, Zusätze, Volumetrische Eigenschaften, ...)
- Mix Design (Herstellung im Labor, Verdichtungsverfahren, Probekrperkonditionierung, Prüfverfahren, Anforderungswerte, ...)
- Großtechnische Baustoffherstellung (In plant, In place, Mischzeit, Zugabereihenfolge, Verarbeitungsdauer, ...)
- Einbau und Verdichtung (Geräteeinsatz, Verarbeitungszeit, Verdichtungsaufwand, Nachbehandlung, ...)

- Dauerhaftigkeit (Verformungs- und Rissverhalten, Nutzungsdauer, Recyclingfähigkeit, ...).

Im Folgenden werden zunächst die unter dem Oberbegriff „werksgemischte Kaltbauweisen Asphalt“ zusammengefassten Baustoffkonzepte differenziert und klassifiziert. Daraus werden bereits unter Anwendung der Fachliteratur entnommener Begriffe Baustoffbezeichnungen definiert.

3 Ergebnisse der Literaturstudie

3.1 Varianten und Eigenschaften von werksgemischtem Kaltbauweisen Asphalt

3.1.1 Bitumenemulsionsgebundenes Kaltmischgut

Für die Herstellung von Bitumenemulsionen werden Straßenbau- oder polymermodifizierte Bitumen in Kolloidmühlen durch die Zugabe von Wasser und Emulgatoren dispergiert. Die entstehende Öl-in-Wasser-Emulsion ist lagerfähig. Die zugesetzten Emulgatoren bewirken eine elektrische Ladung der Oberfläche der Bitumentropfen, sodass diese sich gegenseitig abstoßen. Die Bitumenemulsion ist lagerfähig, bis sie in Kontakt mit Gesteinskörnungen kommt. Die Emulgatoren richten sich neu zu den Gesteinskörnungen aus, wodurch die Oberflächenladung der Bitumentropfen reduziert wird und diese koagulieren. Die Emulgatoren wirken im weiteren Brechvorgang als Haftvermittler zwischen der Oberfläche der Gesteinskörnungen und dem Bitumen. Die Geschwindigkeit des Brechvorganges lässt sich durch die Wahl der eingesetzten Emulgatoren und über den pH-Wert der Emulsion abgestimmt auf die Mineralogie der eingesetzten Gesteinskörnungen steuern.

Bis zum Einsetzen des Brechens wird die Viskosität der Bitumenemulsion durch die kontinuierliche Phase (Wasser) bestimmt. Dies erlaubt eine gute Durchmischung der Gesteinskörnungen und der Bitumenemulsion. Nach dem Brechen wird die Viskosität maßgeblich durch das frei gewordene Bitumen beeinflusst. Die Kombination aus Bitumenemulsion und Gesteinskörnungen von Bitumenemulsionsgebundenen Kaltmischgut muss in der Art eingestellt werden, dass der Brechvorgang frühestens nach Abschluss des Mischvorgangs beginnt. Spätestens die Verdichtung des eingebauten Mischgutes muss zum Einsetzen des Brechvorgangs führen, um die Tragfähigkeit der frisch eingebauten Schicht zu gewährleisten.

Für Kaltmischgut eingesetzte Bitumenemulsionen haben meist einen Bitumengehalt von 60 %. Zusätzlich dazu werden feuchte Gesteinskörnungen

verwendet um eine frühe und gleichmäßige Umhüllung mit der Bitumenemulsion zu erreichen und frühzeitig einsetzendes Brechen der Emulsion zu vermeiden. Dadurch enthält das Kaltmischgut einen Wassergehalt von ca. 6 %, der eine Verdichtung infolge herabgesetzter Korn-Korn-Reibung ermöglicht. Das Wasser muss nach Einbau und Verdichtung aus der Schicht abgeführt werden, damit dies dauerhafte Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften entwickeln kann. Dies kann je nach klimatischen Verhältnissen durch Drainage und/oder Verdunsten erfolgen und durch die Zugabe von mineralischen Bindemitteln (Zement oder Kalk) beschleunigt werden. Der Trocknungsvorgang kann dabei mehrere Monate dauern, da feine Wassertropfen aus der Mörtelphase erst infolge Verkehrseinwirkung ausgepresst wird.

Nach [6] hat sich die Zusammensetzung und die Anwendung von emulsionsgebundenem Kaltmischgut empirisch entwickelt, sodass trotz der erfolgreichen Anwendung der Baustoffe seit Jahrzehnten noch nicht alle Aspekte des mechanischen Baustoffverhaltens erklärt sind.

Bitumenemulsionsgebundenes Kaltmischgut wird national und international mit unterschiedlichen Begriffen belegt. Aufbauend auf [7] enthält Tabelle 1 eine Übersicht über im Folgenden diskutierte Kaltasphalt-Varianten.

Allen genannten Kaltmischgut-Technologien gemeinsam ist ein im Vergleich zu Heißasphalt deutlich höherer Hohlraumgehalt, der aus den für die Verdichtung erforderliche Wassergehalten resultiert. Die Verdichtung dieser Baustoffe beim Einbau aber auch zur Herstellung von Probekörpern im Labor erfordert hohe Verdichtungsenergien.

Weitere Begriffsdefinitionen basieren auf der französischen Normen für bitumengebundene Straßenbaustoffe (NF 98149) und werden in [6] zusammengestellt. Die französische Norm unterscheidet die verschiedenen Varianten emulsionsgebundenen Kaltmischguts anhand ihrer Anwendung zunächst zwischen lagerfähigem Kaltmischgut (hierunter fallen für Reparaturzwecke hergestellte Asphalte), sowie nicht-lagerfähigem Kaltmischgut. Letzteres wird weiter unterschieden nach der Anwendung des Mischgutes unter anderem in Kaltasphalt für Deckschichten von 5 bis 8 cm Dicke („Bétons bitumineux à froid“) und „Grave Emulsion“ für Profilierungen und die Herstellung von Tragschichten.

Tabelle 1. Zusammenstellung verschiedener Kaltmischgut-Technologien [7]

Bezeichnung	Land	Merkmal
Grave Emulsion	Frankreich	AC-Prinzip, $B \geq 3 \%$, keine komplette Kornumhüllung, Hohlraumgehalt $\leq 15 \%$.
2-step-mixing	Schweden	AC-Prinzip, zunächst werden grobe Gesteinskörnungen mit schnell-brechender Emulsion vermischt, danach werden feine Gesteinskörnungen und langsam brechende Emulsion zugegeben.
Double Mixing	Frankreich	Zunächst werden feine Gesteinskörnungen mit der (langsam brechenden) Emulsion vermischt, danach werden grobe Gesteinskörnungen und weitere Emulsion zugegeben. das Verfahren ermöglicht höhere Bindemittelgehalte (5% – 6%).
Kaltrecycling	BeNeLux, Deutschland	Baustoffzusammensetzung entspricht der Grave Emulsion, wobei Zement als zweites Bindemittel zugegeben wird.
GEMS	Südafrika	Mit wenig Bitumen (~1 %) behandelte Recycling-Baustoffe.

Der Unterschied zwischen der Grave Emulsion und dem emulsionsgebundenen Kaltasphalt besteht in der erzielten Bindemittelumhüllung. Beim emulsionsgebundenen Kaltmischgut sind die Gesteinskörnungen vollständig mit Bitumen umhüllt. Der oberflächenreiche Feinanteil sowie die feinen Gesteinskörnungen werden im Brechvorgang der Emulsion als Erstes von Bitumen umhüllt. Damit auch die groben Gesteinskörnungen vollständig umhüllt werden, ist ein mehrstufiger Mischprozess erforderlich, bei dem zunächst einzelne Gesteinskörnungen umhüllt werden, damit bei der eigentlichen Mischgutherstellung eine vollständige Umhüllung aller Gesteinskörnungen erreicht wird (vgl. Tabelle 1).

Bei der Grave Emulsion bricht die Bitumenemulsion bereits frühzeitig durch den Kontakt zu dem oberflächenreichen Feinanteil und feinen Gesteinskörnungen des Gesteinskörnungsgemisches. In dem entstehenden Bitumenmörtel werden die nicht vollständig umhüllten groben Gesteinskörnungen eingebettet.

Eine Simulation von Heißmischgut durch die Verwendung von Bitumenemulsion ist nicht möglich, da das Emulsionswasser nach der Mischgutherstellung und dem Brechen der Emulsion zunächst im Mischgut verbleibt und entsprechend Volumen in Anspruch nimmt. Dies zeigen auch Ergebnisse von bitumenreichen Kaltmischgutvarianten [8], mit denen trotz hoher Bindemittelgehalte keine dem Heißasphalt entsprechenden mechanischen Eigenschaften erreicht werden konnten und somit keine wirtschaftlichen Befestigungen durch rechnerische Dimensionierung ermittelt werden konnten.

Darüber hinaus wird in [6] eine Klassifikation anhand der Zusammensetzung des Mischgutes empfohlen:

- Offen-gestufte (enggestufte) Korngrößenverteilung, bestehend aus einem Einkorngemisch benachbarter Kornklassen (hier: 4/6, 6/10 oder 10/14) woraus ein Hohlraumgehalt von $\geq 18 \%$ resultiert.
- Halb-dicht-gestufte Korngrößenverteilung, bei der dem offenen Gemisch feinere Gesteinskörnungen zugesetzt werden, um die Packungsdichte und die Kohäsion im Mischgut zu erhöhen. Hieraus resultiert ein Hohlraumgehalt $\leq 15 \%$.
- Dicht-gestufte Korngrößenverteilung mit Ergänzung von Füller, resultierend in Hohlraumgehalten von $\leq 10 \%$. Diese Variante wird auch als „Kaltasphalt“ bezeichnet, wobei die geringen Hohlraumgehalte in der Praxis selten erreicht werden.

In [9] wird eine weitere Unterscheidung für emulsionsgebundenes Kaltmischgut anhand des Brechverhaltens der Bitumenemulsion eingeführt. Bei „gebrochenen Systemen“ bricht die Emulsion während oder kurz nach der Mischgutherstellung. Einbau und Verdichtung werden demnach maßgeblich von den Eigenschaften des ursprünglich in der Emulsion dispergierten Bindemittels beeinflusst. Um die Verarbeitbarkeit zu erhalten, müssen sehr weiche Bitumen oder gefluxte Bindemittel verwendet werden. Bei „ungebrochenen Systemen“ erfolgt das Brechen der Emulsion nach dem Einbau während bzw. nach der Verdichtung. Dies erfordert den Einsatz von sehr langsam brechenden Emulsionen oder spezieller Zusatzmittel, welche den Brechvorgang steuern. Einbau- und Verdichtungseigenschaften werden dabei im geringeren Maß durch die Bitumeneigenschaften beeinflusst, da das Bindemittel bis zur Verdichtung in emulgierter Form vorliegt.

Der Wassergehalt des Mischgutes beeinflusst den Verdichtungswiderstand im hohen Maße. Daher

wird im Zuge des Mix Designs der optimale Wassergehalt entsprechend den Vorgaben für ungebundene Tragschichten ermittelt. Für Kaltmischgut mit Bitumenemulsion muss das eingesetzte Gestein vor Zugabe der Emulsion angefeuchtet werden. Dadurch wird die Adsorption des Emulsionswassers an die Gesteine verringert und einem frühzeitigen Brechen der Emulsion vorgebeugt. Andererseits verlängert sich bei höherem Wassergehalt die Trocknungszeit (Curing) und die Tragfähigkeit der frisch eingebauten Schicht wird verringert [10].

Der Feinanteil des Mischgranulates spielt eine wesentliche Rolle bei Mischgutherstellung und Festigkeitsentwicklung nach Einbau und Verdichtung. Nach [10] ist für bitumen-stabilisiertes Kaltmischgut mit Bitumenemulsion ein Feinanteil von mindestens 2 % erforderlich. Zur Beeinflussung des Brechvorganges können zudem chemisch aktive Füller (Zement, Calcium-Hydroxid, Flugasche) eingesetzt werden. Der Einsatz von aktiven Füller hat folgende Gründe:

- Verbesserung der Adhäsion zwischen Bitumen und Gestein
- Erhöhung der Steifigkeit
- Beschleunigung der Festigkeitsentwicklung (Curing)

Die Dauerhaftigkeit von bitumenemulsionsgebundenen Kaltmischgut hängt von der genauen Abstimmung der Gesteinskörnungen und der Bitumenemulsion [11] ab. In Frankreich ist dies durch firmeneigene Emulsionswerke, Steinbrüche und Mischanlagen der größeren Straßenbauunternehmen gewährleistet.

3.1.2 Kaltmischgut mit Schaumbitumen

Zur Herstellung von Schaumbitumen wird Wasser in heißes Bitumen eingedüst. Das plötzliche Verdampfen des Wassers erzeugt Bitumenblasen, welche einen Schaum bilden. Zur Herstellung von Kaltmischgut wird der Bitumenschaum direkt zu dem Gesteinskörnungsgemisch gegeben. Die Bitumenblasen treffen auf die Gesteinskörner. Durch Zerplatzen werden diese mit dem Bitumen umhüllt, sodass eine je nach Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung und Gesteinstemperatur komplette oder teilweise Bitumenumhüllung erreicht wird. Asphaltmischgut, bei dem durch die Verwendung von erwärmten Gesteinskörnungen eine vollständige Umhüllung der Körner erreicht wird, ist nicht Gegenstand dieses Berichtes. Bei nicht-erwärmten Gesteinskörnungen liegt im Regelfall eine nicht-kontinuierliche Verteilung des erkalteten Bitumens vor. Um das hergestellte Kaltmischgut verdichten zu können, ist die Zugabe von Wasser erforderlich, welches nach Abschluss der Verdichtung wieder

abgeführt werden muss um dauerhafte Schichteigenschaften zu erreichen.

Die Schaumeigenschaften hängen von den Bitumeneigenarten sowie der variierbaren Parameter Bitumen- und Wassertemperatur, Wassergehalt sowie Luftdruck ab. Im Vorfeld der Mischgutproduktion sind die Aufschäumparameter einzustellen, indem die Expansionsrate (Volumenzunahme durch Aufschäumen) sowie die Halbwertszeit (Zeitdauer bis Schaumvolumen um 50 % abgenommen hat) optimiert wird. Als maßgebende Größe wird dazu meist der Wassergehalt zum Aufschäumen (ca. 2 bis 4 % bezogen auf die Bitumenmasse) variiert. Da Bitumen häufig Schaumverminderer enthalten, um deren Pumpfähigkeit zu verbessern, muss speziell für die Anwendung bestelltes Bitumen verwendet werden oder es müssen schaubildende Zusätze dem Bitumen zugegeben werden.

Neben der Reduzierung des Verdichtungswiderstandes führt die Zugabe von Mischwasser zu einer Trennung der feinen Gesteinsanteile, sodass diese besser von den Bitumentropfen erreicht werden. Weiterhin übernimmt das Zugabewasser die Aufgabe, Bitumentropfen während des Mischprozesses innerhalb der Mischgutes zu transportieren wodurch Bindemittelanreicherungen durch die schnelle Abnahme des Schaumvolumens (Klumpenbildung) vermieden wird [10].

Der Feinanteil sowie die im Mischgranulat enthaltene Feuchtigkeit übernimmt bei der Mischgutherstellung die Aufgabe, den Bitumenschaum im Mischgut zu verteilen. Dabei beeinflusst insbesondere die Art des aktiven Füllers die Verteilung der Bitumentropfen im Mischgut.

3.1.3 Kaltrecycling-Baustoffe

Im Rahmen des EU-Projektes DIRECT-MAT [12] konnten zahlreiche in Europa angewendete Technologien zum Recycling von Straßenausbaustoffen in kalt verarbeiteten bitumenhaltigen Baustoffen vergleichend gegenübergestellt werden. Dabei wurden große Unterschiede in der angewendeten Baustoffzusammensetzung, insbesondere bei der Zugabe von hydraulischen Bindemitteln als aktiver Füller und der Bindemittelgehalte festgestellt.

Im Projekt COREPASOL konnten diese Unterschiede weitergehend analysiert sowie weitere außer-europäische Erfahrungen eingearbeitet werden [13]. Dabei wurden erhebliche Unterschiede der angewendeten Materialzusammensetzungen diskutiert und in Anlehnung an in der Literatur vorhandenen Definitionen [14] [15] insbesondere von Kaltrecycling-Baustoffen beschrieben, welche sich hinsichtlich der Bindemittelgehalte unterschieden (vgl. Abbildung 1 und Tabelle 2).

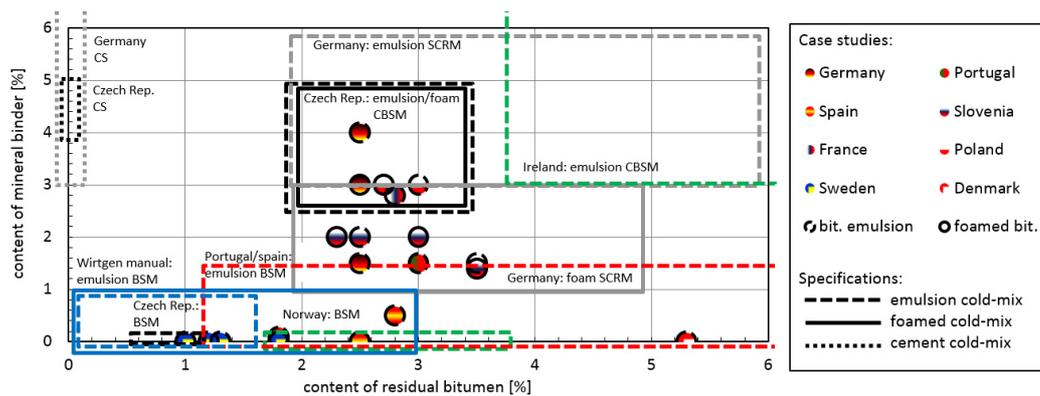


Bild 1. Bindemittelgehalte (Bitumen bzw. hydraulische Bindemittel) unterschiedlicher Kaltrecycling-Baustoffe von im Projekt DIRECT-MAT zusammengestellter Probestrecken sowie zulässige Bindemittelgehalte gemäß internationalen Regelwerken [13]

Tabelle 2: Bezeichnung verschiedener Kaltrecycling-Baustoffe in Abhängigkeit der Bindemittelgehalte [13].

Kaltrecycling-Baustoff	Abkürzung	Bitumengehalt	Zementgehalt
Ungebunden (Unbound)	U	0 %	0 %
Verfestigung (Cement stabilization)	CS	0 %	1 to 6 %
Hydraulisch geb. Tragschicht (Lean concrete)	LC	0 %	≥ 6 %
Bitumen-stabilisiertes Mischgut (Bitumen-stabilised material)	BSM	1 to 3 %	≤ 1 %
Bitumen-Zement-Stabilisiertes Mischgut (Bitumen-cement-stabilised material)	BCSM	1 to 3 %	1 to 3 %
Kaltmischgut (Cold asphalt mix)	CAM	≥ 3 %	0 %
Kaltrecycling-Baustoff für schadstoffhaltige Straßenausbaustoffe (Sealing cold recycled material)	SCR	3 to 6 %	1 to 6 %

Die verschiedenen Verfahren zur Herstellung von bitumengebundenen bzw. -stabilisierten Mischgut können sowohl in Mischwerken als auch in situ erfolgen. Die dabei eingesetzten Verfahren zur Mischgutkonzeption, Einbau und Verdichtung unterscheiden sich nicht. Lediglich erlaubt die Herstellung in Mischwerk eine anforderungsgerechte Qualitätskontrolle der eingesetzten Baustoffe, insbesondere der Gesteinskörnungen bzw. des Asphaltgranulates.

3.1.4 Definition bzw. Klassifikation der betrachteten Straßenbaustoffen

Aus der Vielzahl international verwendeter Definitionen und Bezeichnungen für werksgemischte Kaltbauweisen (Asphalt) wird im Folgenden eine einheitliche Klassifikation vorgeschlagen, welche einen Vergleich der in der Literatur und in Regelwerken diskutierten Baustoffvarianten ermöglicht.

Anhand der Literaturanalyse und bestehender Definitionen verschiedener Regelwerke können folgende bei Umgebungstemperatur in Mischwerken hergestellte Baustoffe unterschieden werden:

- **Kaltasphalt:** Asphaltmischgut, bei dem die Gesteinskörnungen nach Brechen der Emulsion vollständig mit Bitumen umhüllt sind. Ein Einsatz in Trag-, Binder- und Deckschichten ist möglich (KA-BE).
- **Grave Emulsion (GE):** Als Tragschicht verwendeter Straßenbaustoff, bei dem die nicht-vollständig bitumenumhüllten groben Gesteinskörnungen in Mörtel eingebettet sind. Der Asphaltmörtel besteht aus den vollständig mit Bitumen gebundenen Feinanteil mit feinen Gesteinskörnungen
- **Bitumen-Stabilisiertes Mischgut** mit Bitumenemulsion (BSM-BE) oder Schaumbitumen (BSM-SB).

Beim BSM-BS mit Bitumenemulsion liegt ein nicht vollständig mit Bitumen gebundener Asphaltmörtel vor, in dem die groben Gesteinskörnungen eingebettet sind.

Bei BSM-SB mit Schaumbitumen sind grobe und feine Gesteinskörnungen punktuell mit Asphaltmörtel-Tropfen miteinander verklebt

- **Bitumen-Zement-Stabilisiertes Mischgut** mit Zementgehalten von mehr als 1 % und Bitumenemulsion (*BCSM-BE*) oder Schaumbitumen (*BCSM-SB*). Neben den für BSM genannten Bindungen sind die Gesteinskörnungen zusätzlich mit mineralischen Bindemitteln verklebt.
- **Kaltrecycling-Baustoff für schadstoffhaltige Straßenausbaustoffe** (SCRM) mit höheren Bindemittelgehalten zur Immobilisierung von Schadstoffen aus Straßenausbaustoffen.

In der folgenden Literaturlauswertung wird weiterhin das jeweils beschriebene Kaltmischgut nach folgenden Kriterien klassifiziert:

- Art des Bindemittels

- Bitumenemulsion (BE)
- Schaumbitumen (SB)

- Korngrößenverteilung
 - dicht-gestuft (d)
 - halb-dicht gestuft (hd)
 - offen gestuft (o)
- Kaltbauweisen mit Bitumenemulsion anhand des Brechzeitpunktes (vor bzw. während/nach dem Einbaus)
 - gebrochen
 - ungebrochen

Anhand der beschriebenen Definition ergeben sich die in Tabelle 3 zusammengestellten Mischguttypen. Die angegebenen Bereiche für Bindemittelgehalte ergeben sich vorgehend auf die im Folgenden zusammengestellten Regelwerke und Literaturinhalte.

Die sich in den verschiedenen Kaltmischgutarten ergebenden Bitumen- und Zementbindungen sind in Anlehnung an [10] in Bild 2 als Prinzipsskizzen dargestellt.

Tabelle 3. Vorschlag für eine Klassifizierung von bitumengebundenen kaltverarbeiteten Baustoffen

Bauweise	Abk.	Bindemittel (BE/SB)	Bitumengehalt	Zementgehalt
Kaltasphalt	KA	BE	~ 6 %	-
Grave Emulsion	GE	BE	≥ 3 %	-
Bitumen-Stabilisiertes Material	BSM-BE	BE	1 bis 3 %	< 1 %
	BSM-SB	SB		
Bitumen-Zement-Stabilisiertes Mischgut	BCSM-BE	BE	1 bis 3 %	1 bis 3 %
	BCSM-SB	SB		
Baustoff für schadstoffhaltige Ausbaustoffe	SCRM-BE	BE	3 bis 6 %	1 bis 6 %
	SCRM-SB	SB		

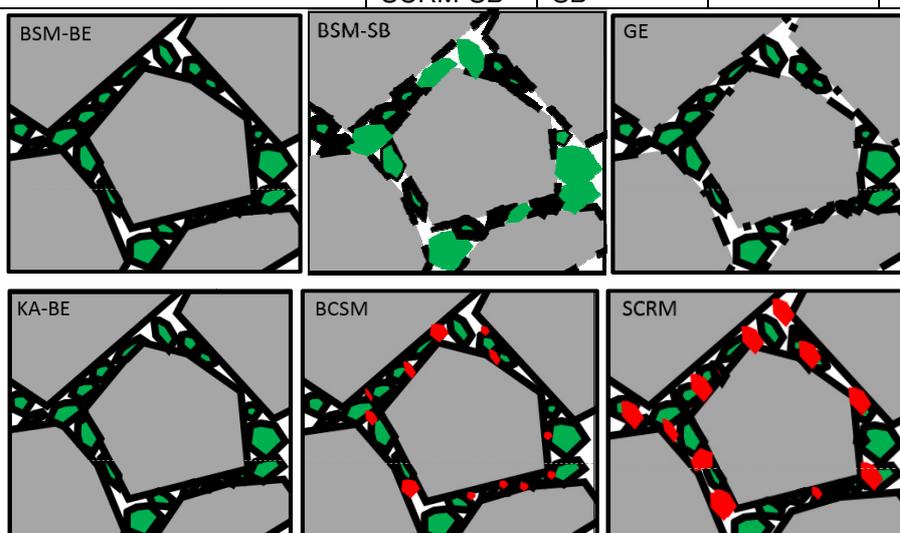


Bild 2. Illustration der Art der Bindungen zwischen groben (grau) und feinen (grün) Gesteinskörnungen durch Asphaltmörtel (schwarz) und Zement (rot) in unterschiedlichen bitumenhaltigen Kaltmischgutarten

3.2 Auswertung von Regelwerken

In zahlreichen Ländern ist bitumenemulsionsgebundenes Kaltmischgut in Regelwerken beschrieben. In den folgenden Abschnitten werden die jeweils wichtigsten Regelungen zusammengestellt.

3.2.1 Frankreich

In Frankreich werden zwei Typen von bitumenemulsionsgebundenen Kaltmischgut seit Jahrzehnten verwendet, die in französischen Anforderungsnormen beschrieben sind. Grave Emulsion nach [16] werden für Reprofilierungen sowie Tragschichten eingesetzt. Kaltasphalt nach [17] ist definiert als nicht lagerfähiges (< 24 h), kalt hergestelltes und verarbeitbares Mischgut für Deckschichten.

Die Anforderungen an Kaltmischgut des Typs Grave Emulsion (GE) werden in den NF P98-121 [16] von 2014 beschrieben. Zunächst wird zwischen zwei GE-Typen unterschieden: „Typ R“ für Profilierungen und kleinerer Reparaturen und „Typ S“ für strukturell wirksame Tragschichten. Die Norm enthält Anforderungen an die Baustoffkomponenten (Gesteinskörnungen, Bitumenemulsion, Asphaltgranulat), vgl. Tabelle 4, sowie die Zusammensetzung und das Gebrauchsverhalten.

An die Zusammensetzung des Mischgutes für Grave Emulsion werden abgesehen vom Mindest-Bindemittelgehalt keine Anforderungen gestellt. Für GE für Tragschichten werden folgende Mindest-Bindemittelgehalte vorgeschrieben:

- GE Typ S, Klasse 1: $B \geq 3,6 \%$
- GE Typ S, Klasse 2: $B \geq 4,0 \%$

Der Mindestbindemittelgehalt bezieht sich auf eine Rohdichte des Gesteinskörnungsgemisches von $2,65 \text{ g/cm}^3$ und wird anhand der Dichte des verwendeten Gesteins angepasst.

Es werden zusätzlich Anforderungen an den mittels Duriez-Verdichtung (Doppelkolbenprinzip) erreichten Hohlraumgehalt sowie die mechanischen Eigenschaften gestellt, vgl. Tabelle 5.

Nach der Herstellung werden die Probekörper zur Simulation der Aushärtung in der Realität für 14 Tage bei 35 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 20 % konditioniert (Curing).

Die noch gültigen Spezifikationen für Kaltasphalt – Bétons Bitumineaus à froid (BBAF)- [17] beinhalten neben Anforderungen an die Baustoffkomponenten auch Anforderungen an die Festigkeitseigenschaften des Mischgutes.

Als Bindemittel kommen kationische Bitumenemulsionen mit einem Bitumen 70/100 oder 160/220 zur Anwendung. Der Mindest-Bitumengehalt wird anhand der Oberfläche der Gesteinskörnungen ermittelt und darf einen Wert von 3,6 % nicht unterschreiten. Die an nach Duriez verdichteten Probekörpern gestellten Festigkeitsanforderungen sind in Tabelle 5 ergänzt.

Tabelle 4: Anforderungen an die Baustoffkomponenten von Grave Emulsion [16]

Baustoffkomponente	Anforderung
Gesteinskörnungen (EN 13043)	Feinanteil der Lieferkörnungen $f_1 (< 1 \%)$ Schlagzertrümmungswiderstand: LA_{30} Plattigkeitskennzahl Fl_{25} Bruchflächigkeit $C_{50/10}$ Fließkoeffizient E_{CS30} Füller: MB_{F10}
Asphaltgranulat (EN 13108-8)	Zugabe zwischen 0 und 100 % möglich Anforderung: $U < D$ Eigenschaften sind nach EN 13108-8 zu bestimmen: Stückgrößenverteilung, Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt, EP und/oder Pen
Bitumenemulsion	Typ: kationisch nach EN 13808, alternativ: anionisch nach NF T 65-012 enthaltene Bindemittelart: 160/220, 70/100, 50/70 oder mod. Bindemittel; evtl. petro- oder pflanzenstämmige Fluxmittel Eigenschaften müssen deklariert werden
Zusätze	sind zu deklarieren

Tabelle 5: Anforderungen an Probekörper aus GE [16] und BBAF [17]

Geforderte Eigenschaft	GE Typ R	GE Typ S Klasse 1	GE Typ S Klasse 2	BBAF
Duriez – Modus 1:				
Hohlraumgehalt	-	≤ 15 %	≤ 12 %	6 bis 11 %
Druckfestigkeit (trocken)	≥ 1,5 MPa	≥ 2,5 MPa	≥ 3,5 MPa	≥ 4 MPa ¹⁾
Wasserempfindlichkeit	≥ 55 %	≥ 55 %	≥ 65 %	≥ 70 %
Verdichtungswiderstand (Gyrator)				
Hohlraumgehalt nach 10 Gyr.	-	≤ 22 %	≤ 20 %	≥ 12 %
Hohlraumgehalt nach 100 Gyr.	-	≤ 18 %	≤ 15 %	5 bis 12 % (60 Gyr.)
Steifigkeitsmodul nach EN 12697-26				
Anh. A (15 °C, 10 Hz)	-	≥ 1.500 MPa	≥ 2.500 MPa	-
Anh. E (15 °C, 0,02 s)	-			-
Anh. C (10 °C, 124 ms)	-	≥ 1.500 MPa	≥ 2.500 MPa	-
¹⁾ mit Bitumen 160/220: ≥ 3,0 MPa				

Anforderungen an Herstellung, Einbau und Verdichtung von Mischgut für Grave Emulsion und Kaltasphalt sind in der Norm [18] beschrieben. Im Folgenden wird daraus ein Auszug wiedergegeben.

Zur Herstellung des bitumenemulsionsgebundenen Mischgutes werden natürlich feuchte oder angehäusete Gesteinskörnungen verwendet. Um Entmischungen zu vermeiden ist beim Beladen von Fahrzeugen die Schütthöhe auf < 3m zu beschränken und das Fahrzeug in gleichmäßiger Höhe zu beladen. Das Mischgut ist abgedeckt zu transportieren, um den Wassergehalt konstant zu halten.

Die Anforderungen an die Ebenheit der Unterlagen richten sich nach der vorgesehen Schichtdicke der Grave Emulsion. Auf einer Messstrecke von 3 m dürfen folgende Unebenheiten nicht überschritten werden:

- < 3 cm: ± 1 cm
- 3 – 8 cm: ± 1,5 cm
- 3 – 15 cm ± 3 cm

Die Wetterbedingungen müssen ein „Curing“ der eingebauten Schicht erlauben. Die Luft- und Unterlagentemperatur sollte 10 °C nicht unterschreiten. Grundsätzlich ist die Verkehrsfreigabe direkt im Anschluss der Verdichtung möglich, wobei sich die endgültigen Gebrauchseigenschaften über mehrere Wochen entwickeln.

Der Einbau erfolgt meist ohne Anspritzen der Unterlage mit Straßenfertigern. In Ausnahmefällen ist der Einsatz von Gradern möglich. Längsnähte sind gegenüber Nähten der Unterlage um > 20 cm versetzt auszuführen und sollen nicht im Rollbereich der Fahrstreifen angelegt werden.

Um trotz feuchter Witterung eine ausreichende Reifung zu ermöglichen, kann es erforderlich sein die eingebaute Schicht zügig mit einer Deckschicht zu überbauen. Falls es die klimatischen Bedingungen erlauben sollte andererseits eine ausreichende Reifezeit abgewartet werden, bevor eine Überbauung stattfindet.

Im Rahmen von Kontrolluntersuchungen werden an Proben, welche alle 2000 t eingebauten Mischgutes entnommen werden, die Einhaltung folgender Toleranzen überprüft:

- Korngrößenverteilung
 - > 6,3 mm: ± 6 %
 - < 4/2 mm: ± 5 %
 - < 0,063 mm: ± 1,5 %
- Bindemittelgehalt ± 0,5%
- Wassergehalt: ± 2 %

Folgende Anforderungen werden an die fertiggestellte Schicht gestellt:

- Hohlraumgehalt (90%-Mindestquantil)
 - Deckschicht: < 12 % (Schichtdicke 5 bis 8 cm)
 - Tragschicht: < 18 %
- Schichtdicke (95 %-Mindestquantil):
 - Tragschicht / Fundationsschicht ± 2 cm
 - Binderschicht ± 1,5 cm
 - Deckschicht ± 1 cm
- Querebenheit:
 - Fundationsschicht: ± 1cm/m (95 %-Quantil)
 - Deckschicht: ± 0,5 cm/m (100 %-Quantil)
- Höhendifferenzen zwischen Einbaubahnen bzw. neu angesetzten Einbaustreifen dürfen folgende Werte nicht überschreiten:
 - Tragschichten: 1 cm (längs), 1,5 cm (quer)

- Binderschichten: 0,5 cm (längs), 0,8 cm (quer)
- Deckschichten: 0,3 cm (längs), 0,5 cm (quer)

3.2.2 Schweiz

Die Schweizer Norm SB 640492 beschreibt „Fundationsschichten aus Asphaltbeton in Kaltbauweise“ [19]. Das Mischgut kann aus Bitumenemulsion oder Schaumbitumen im Mischwerk oder in situ, bei Bedarf unter Zugabe von Zement, hergestellt werden. Das Mischgut kann in Fundationsschichten (AFK) oder als kombinierte Fundationstragschichten verwendet werden. Als Gestein kann Asphaltgranulat oder rezyklierte bzw. natürliche Gesteinskörnungen eingesetzt werden. Um die folgenden Anforderungen an die Korngrößenverteilung zu erfüllen ist im Regelfall Ergänzungs-gestein erforderlich:

- Feinanteil:
 - AFK mit Bitumenemulsion: 2 bis 12 %
 - AFK mit Schaumbitumen: 3 bis 12 %
- Anteil ≥ 2 mm: ≥ 25 %
- Größtkorn 16 mm oder 22 mm

Bei der Eignungsprüfung werden mechanische Eigenschaften überprüft. Als Richtwerte für den Bindemittelgehalt sind folgende Angaben gegeben:

- AFK mit Bitumenemulsion:
 - 1,8 bis 3,0 % resultierendes Bitumen
 - 1,5 bis 2,5 % Zement
- AFK mit Schaumbitumen:
 - 2,5 bis 5,0 % Bitumen
 - 1,0 bis 2,0 % Zement

Der erforderliche Wassergehalt wird mittels Proctor-Verdichtung nach DIN EN 13286-2 ermittelt.

Aus dem Mischgut werden 14 Probekörper mittels statischer Verdichtung nach Duriez hergestellt ($\varnothing 120$ mm, H 125 mm; Verdichtungslast 7,1 MPa). An diesen werden am Folgetag die Raumdichte bestimmt.

Zunächst werden alle Probekörper für 7 Tage bei Raumbedingungen (20 ± 2 °C, 50 ± 10 % rF) folgende Eigenschaften konditioniert. Nach 7 Tagen wird an zwei Probekörpern die Rohdichte sowie an weiteren vier Probekörpern die Druckfestigkeit bestimmt.

Vier Probekörper werden für 7 Tage in einem Wasserbad (20 ± 2 °C) gelagert. Die verbleibenden vier Probekörper werden weitere 21 Tage bei Raumbedingungen gelagert.

Folgende Anforderungen müssen erreicht werden:

- Druckfestigkeit nach 7 Tagen ≥ 3 MN/m²

- Druckfestigkeit nach 28 Tagen $>$ Druckfestigkeit nach 7 Tagen
- Wasserempfindlichkeit (verbleibende Druckfestigkeit) ≥ 70 %
- Hohlraumgehalt: 5 bis 12 %

Hinsichtlich der Dimensionierung werden AFK gleichwertig behandelt wie Asphaltfundationsschichten aus Heißasphalt. Die Dimensionierungsvorschrift SN 640324 [20] enthält ein für AFK anzuwendendes Dimensionierungsverfahren unter Verwendung des Strukturwertes SN. Dieser wird aus der Summe der Dicken D_i sowie der Tragfähigkeitswerte a_i der einzelnen Schichten berechnet:

$$SN = \sum D_i \cdot \sum a_i$$

Je nach Untergrundtragfähigkeit und Verkehrsbelastung muss das mehrschichtige Befestigungssystem einen bestimmten Strukturwert erreichen. Anhand der Tragfähigkeitswerte kann demnach die Fähigkeit des Lastabtrages als Beitrag für die Gesamt-Tragfähigkeit vergleichend abgeleitet werden.

Tabelle 6. Tragfähigkeitswerte a_i für ausgewählte Oberbauschichten [20]

Oberbauschicht	Tragfähigkeitswert a_i
Heißasphalt	4,0
Hochmodul-Asphaltbeton (EME)	4,4 – 5, 6
Asphaltbetonfundationsschicht AC F	3,2
Schottertragschicht	1,25
Kiestragschicht, Frostschuttschicht	1,0

Nach Tabelle 6 hat eine Asphaltbeton-Fundationsschicht einen Tragfähigkeitsbeitrag, welcher $3,2/4,0 = 80$ % des Tragfähigkeitsbeitrages einer Asphalttragschicht aufweist. Um gleiche Strukturwerte der Befestigung zu erreichen, müssen demnach die Schichtdicken einer Asphaltfundationsschicht um 25 % ($4,0 / 3,2 = 1,25$) gegenüber der Schichtdicken einer Asphalttragschicht erhöht werden.

Für die Ausführung von Fundationsschichten aus Asphaltbeton in Kaltbauweise AFK sollen bei Anwendung des Zentralmischverfahrens die Schichtdicken in folgenden Bereichen liegen:

- AFK 16: 60 mm bis 100 mm (max. 150 mm)
- AFK 22: 80 mm bis 150 mm (max. 200 mm).

Asphaltfundationsschichten erfordern für die Verdichtung eine ausreichend tragfähige Unterlage (entspricht etwa $E_{V1} \geq 60 \text{ MN/m}^2$).

Die AFK sind grundsätzlich mit einer wasserundurchlässigen Schutzschicht abzudecken. Dabei können zur Anwendung kommen:

- Walzasphaltdecke
- dünne Asphaltdeckschicht in Kaltbauweise (DSK)
- Oberflächenbehandlung.

Der Transport von Mischwerk zur Einbaustelle hat abgedeckt zu erfolgen, um ein Austrocknen des Mischgutes zu verhindern.

AFK dürfen nicht bei Temperaturen unter $+5 \text{ °C}$ eingebaut werden. Bei Regen ist der Einbau einzustellen.

Der Einbau der ersten Walzasphaltschicht sollte frühestens 36 h nach Verdichtung der AFK erfolgen, wobei die Frist bei AFK mit Bitumenemulsion länger dauern kann. Als Richtwert für die Überbaubarkeit gilt ein Verformungsmodul E_{V1} auf der AFK von ca. 60 MN/m^2 .

3.2.3 Vereinigtes Königreich und Irland

In Großbritannien sind zwei verschiedene bitumengebundene Kaltrecycling-Baustoffe im übergeordneten technischen Regelwerk beschrieben [21]. In Clause 948 „Ex Situ Cold Recycled Bound Materials“ werden neben hydraulisch gebundenen Materialien auch „quick visco-elastic QVE“ und „slow visco-elastic SVE“ beschrieben. SVE enthalten nur bituminöse Bindemittel (Bitumenemulsion oder Schaumbitumen), während QVE Zement zugegeben wird.

Für das untergeordnete Verkehrsnetz sind in Irland weiterhin „Stabilised Wet Mix“ beschrieben, die den Grave Emulsion nach der französischen Norm entsprechen [22].

Die im Rahmen der Mischgutkonzeption (Mix design) gestellten Anforderungen sowie die Anforderungen an die fertiggestellte Schicht sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Dabei werden sowohl Anforderungen an die Zusammensetzung als auch an die mechanischen Eigenschaften gestellt. Die angewendete Steifigkeitsklassifikation soll den Zustand der Steifigkeit nach 1 Jahr Liegedauer beschreiben und wird im Rahmen der Dimensionierung des Oberbaus verwendet.

Für Straßenbefestigungen unter Verwendung von bitumengebundenem Kaltmischgut wurden Nomogramme zur Ermittlung geeigneter Befesti-

gungsdicken entwickelt [23]. Ausgangsgrößen für die Dimensionierung sind die Untergrundtragfähigkeit, charakterisiert als Fundationsklasse, die Steifigkeitsklasse des Kaltmischgutes (vgl. Tabelle 7) sowie die Verkehrsbelastung (in Millionen äquivalenter 8-t-Achsübergängen - msa):

- Fundationsklassen:
 - Fundationsklasse 1: 50 MPa,
 - Fundationsklasse 2: 100 MPa,
 - Fundationsklasse 3: 200 MPa, z. B. Bodenverfestigung
 - Fundationsklasse 4: 400 MPa, z. B. HGT
- Faktoren zur Ermittlung der Verkehrsbelastung:
 - Durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr ($> 3,5 \text{ t}$)
 - Nutzungsdauer: 40 a
 - Fahrstreifenverteilung
 - Achslastklassen.

Für die vereinfachte Ermittlung der Verkehrsbelastungen können zwei Nomogramme verwendet werden, welche den Wert für msa anhand des durchschnittlichen Schwerverkehrs sowie des Anteils besonders schwerer Fahrzeuge berücksichtigen.

Für hohe Verkehrsbeanspruchungen $\geq 5 \text{ msa}$ enthält Tabelle 8 Nomogramme zur Ermittlung geeigneter Oberbaubefestigungen in Abhängigkeit der Fundationsklasse sowie der Verkehrsbeanspruchung. Für geringer belastete Straßenbefestigungen haben Erfahrungen gezeigt, dass die Tragschicht aus bituminösen Kaltmischgut direkt auf der Unterlage angelegt werden kann. Die erforderliche Schichtdicke wird anhand des CBR-Wertes des anstehenden Bodens sowie der Schichtdicke der Asphaltdecke nach Tabelle 9 ermittelt.

Für wenig beanspruchte Straßen des untergeordneten Verkehrsnetzes wird die Dicke der Straßenbefestigung anhand des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (alle Fahrzeuge), der Untergrundtragfähigkeit (CBR-Wert) sowie der Dicke der Frostschutzschicht dimensioniert [22]. Dabei sind ebenfalls Dimensionierungsregeln unter Verwendung von Stabilised Wet Mix enthalten. Die mit dem bitumenstabilisierten Baustoff zu berücksichtigenden Schichtdicken betragen etwa das 1,5-Fache von Schichtdicken von Asphalttragschichten bzw. etwa $2/3$ der Schichtdicke von Schottertragschichten.

Die resultierenden Schichtdicken für Tragschichten aus bitumenstabilisiertem Kaltmischgut (Stabilised Wet Mix) auf einer Unterlage aus Frischschutzschicht mit einer Abdeckung durch eine doppelte Oberflächenbehandlung sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 7: Anforderungen an werksgemischtes bitumengebundenes Kaltmischgut gemäß Regelwerk in Großbritannien [21] [22]

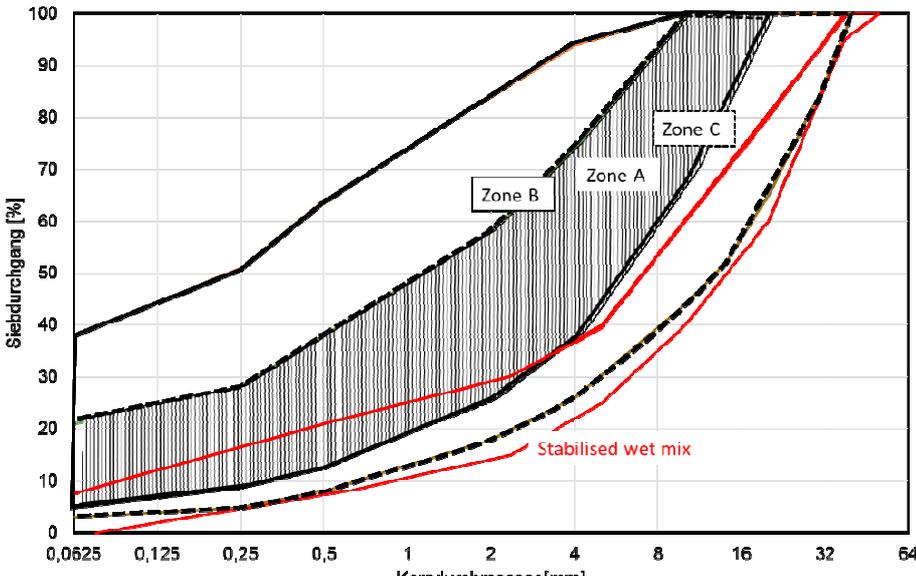
Anforderung	Ex-situ recycled bound material [21]		Stabilised wet mix [22]
	QVE	SVE	
Bituminöses Bindemittel	Bitumenemulsion (EN 13808) Bitumen (für Schaumbitumen) 160/22 oder härter		Bitumenemulsion mit 170/230
Bitumengehalt	≥ 3 %	≥ 3 %	3,3 ± 0,3 %
Zementgehalt	≥ 1 %		Zugabe als Füller möglich
Kalk	-	≥ 1,5 %	
Flugasche	Zugabe als Füller möglich		
Korngrößenverteilung	 <p>Zone A: Bereich geeigneter Korngrößenverteilungen (schraffiert) Zone B: zusätzliche Anforderungen erforderlich, eher unüblich Zone C: wegen Entmischungsneigung nur für In-Situ-Recycling geeignet</p>		
Wassergehalt (vor Verdichtung)	gemäß Mischgutzusammensetzung („etwas trockener als opt. Wassergehalt“)		4,0 ± 1,0 %
Lagerdauer des Mischgutes	2 h	24 h	k. A.
Herstellung der Probestkörper	Vibrationsverdichtung (Ø 150mm, H 75 mm)		Duriez (statische Verdichtung)
Curing-Verfahren	28 d @ 20±2 °C (versiegelt)	28 d @ 40±2 °C (versiegelt)	14 d @ 35 °C (unversiegelt)
Mechanische Anforderungen	Klassifizierung des Materials hinsichtlich der Steifigkeit (EN 12697-26, Anhang C): Class B1: $S_{mix} \geq 1.900$ MPa Class B2: $S_{mix} \geq 2.500$ MPa Class B3: $S_{mix} \geq 3.100$ MPa Class B4: $S_{mix} \geq 4.700$ MPa		Druckfestigkeit (Duriez-Versuch) ≥ 2,6 MPa Wasserempfindlichkeit: > 55 %
Anforderungen an Mischgutproben bei Ausführung und an die fertige Schicht			
Korngrößenverteilung	Einhaltung des Zonen-Bereichs		Toleranzen
Wassergehalt	Wert der Erstprüfung ± 2 %		k.A.
Verdichtungsgrad	≥ 95 % (Einzelwerte ≥ 93 %)		≥ 95 % (Einzelwerte ≥ 90 %)
Nachbehandlung	Deckschicht einbauen, Feuchthalten oder Abdichten mit Bitumenemulsion		Vor dem Winter überbauen, wenn curing fortgeschritten
Schichtdicke	± 1,5 mm (Einzelwerte ± 2,5 mm)		

Tabelle 8: Schichtdicken des gebundenen Oberbaus bei Verwendung von bituminösem Kaltmischgut für $msa \geq 5$ [23]

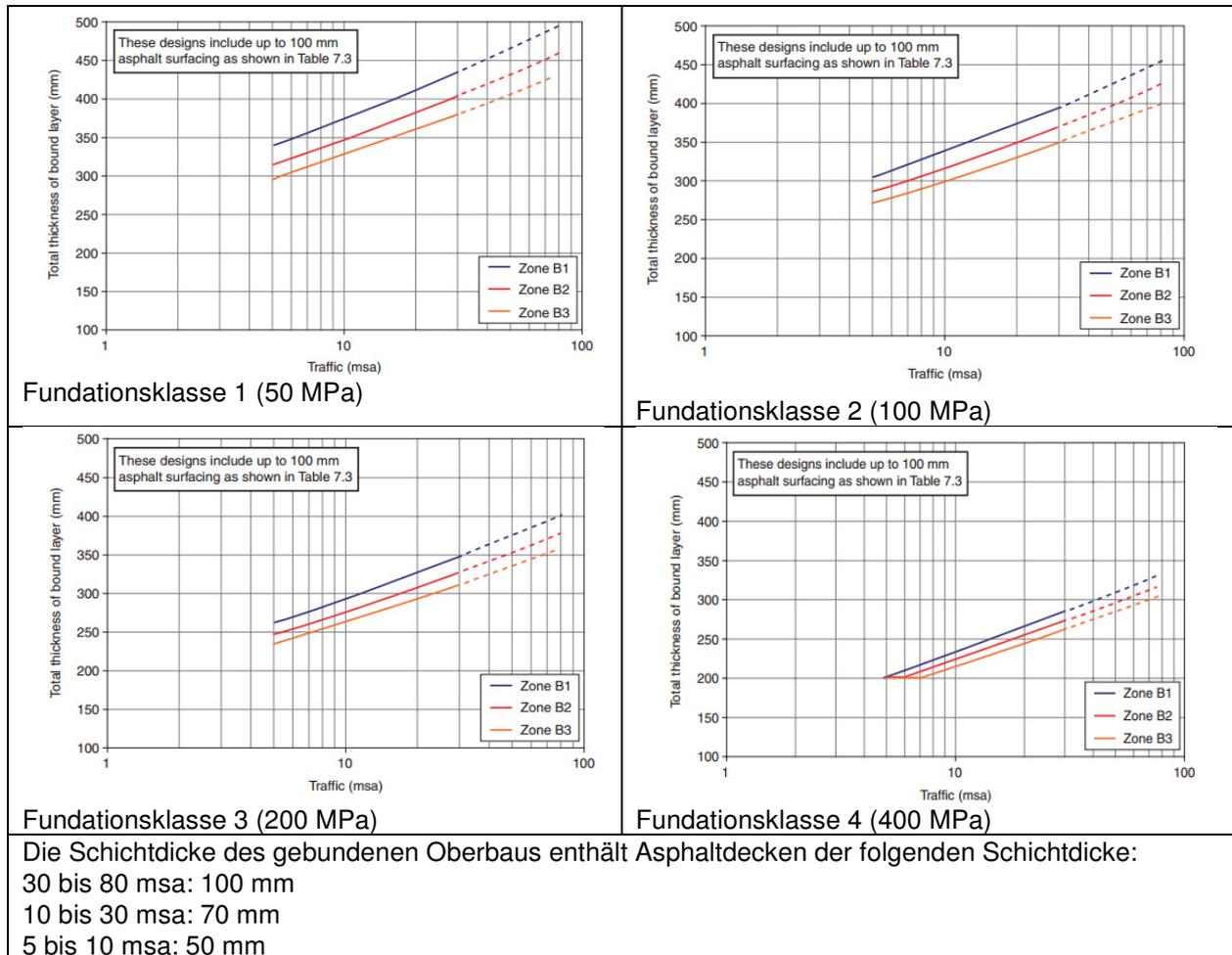


Tabelle 9: Schichtdicken des gebundenen Oberbaus bei Verwendung von bituminösem Kaltmischgut für gering beanspruchte Straßenbefestigungen ($msa < 5$) [23]

Verkehrsbelastung [msa]	Dicke der Asphaltdecke [mm]	CBR-Wert [%]			
		2 bis 4	5 bis 7	8 bis 14	≥ 15
2,5 bis 5	100	-	-	270 mm	300 mm
0,5 bis 2,5	100	250 mm	230 mm	215 mm	185 mm
	40	310 mm	290 mm	275 mm	245 mm
	OB	-	330 mm	315 mm	285 mm
$\leq 0,5$	100	195 mm	185 mm	160 mm	150 mm
	40	280 mm	260 mm	245 mm	215 mm
	OB	320 mm	300 mm	285 mm	255 mm

OB: Oberflächenbehandlung

Tabelle 10. Dimensionierung von Straßenbefestigungen des untergeordneten Verkehrsnetzes unter Verwendung einer Tragschicht aus bitumenstabilisiertem Kaltmischgut [22]: Schichtdicke [cm]

Untergrundtragfähigkeit: CBR-Wert [%]		1,5 bis 3			3 bis 5			> 5		
Dicke der Frostschuttschicht [cm]		>10 bis 20	>20 bis 30	>30 bis 40	>10 bis 20	>20 bis 30	>30 bis 40	>10 bis 20	>20 bis 30	>30 bis 40
DTV [Fz/d]	< 500	10	/		/	/	/	/	/	/
	500-1000	15	15	10	10	10	10	10	/	/
	1000-2500	20	18	15	20	15	10	15	10	10
	2500-4000	-	20	18	20	18	15	18	15	10

-: zu geringe Tragfähigkeit; /: Tragschicht nicht erforderlich

3.2.4 Südafrika

In Südafrika gehören Kaltbauweisen für die Herstellung von flexiblen Straßenbefestigungen zu den Standardbauweisen. Der Schwerpunkt der eingesetzten Mischgutvarianten liegen in den Bitumenstabilisierten Baustoffen, die in den Technischen Regeln (TG2) beschrieben sind [10]. Das Regelwerk behandelt sowohl Kaltmischgut mit Bitumenemulsion als auch mit Schaumbitumen. Als grundsätzliche Definition der BSM werden folgende Bindemittelgehalte vorgegeben:

- Bitumengehalt $\leq 3,5\%$
- Zementgehalt, bzw. Gehalt aktiver Füller $\leq 1,0\%$

Als Bindemittel wird entweder Schaumbitumen (meist Straßenbaubitumen 70/100) oder Bitumenemulsion eingesetzt. Neben kationischen Bitumenemulsionen kommen bei geeigneten Gesteinskörnungen auch anionische Bitumenemulsionen zum Einsatz. Bei letzteren erfolgt der Brechvorgang maßgeblich durch die Verdunstung des Emulsionswassers, wodurch eine gute Verarbeitbarkeit über eine längere Dauer möglich ist. Hierbei sind neben der Gesteinsart (aus Adhäsionsgründen nur möglich bei basischen Gesteinen) auch die klimatischen Bedingungen zu berücksichtigen, da die BSM-Schicht trocknen muss.

Das für die Optimierung von BSM angewendete Mix Design basiert auf dem Grundsatz, das projektabhängig lokal verfügbare Gesteinskörnungen eingesetzt werden. Dies geschieht entweder durch die Mischgutherstellung in Situ (Baumischverfahren)

oder in einem Mischwerk nahe der Einbaustelle. Unter folgenden Bedingungen wird die Verwendung eines Mischwerkes gegenüber der In-Situ-Bauweise empfohlen:

- Streng homogene Qualitätseigenschaften der hergestellten Schicht werden durch die Verwendung von qualitätsüberprüften Ausgangsbaustoffen (Gesteinskörnungen, Asphaltgraunlat) von der Halde ermöglicht. Ungeeignete Ausbaustoffe bzw. solche mit variierenden Eigenschaften können dadurch vermieden werden.
- Nach der Mischgutherstellung muss das Mischgut gelagert werden, da z. B. der Herstellungs- und Einbauprozess nicht gut aufeinander abgestimmt werden können.
- Die Überbauung der Schicht aus Kaltmischgut lediglich mit einem Dünnschichtbelag erfordert eine ebene Oberfläche der BSM-Schicht, welche nur durch die Verwendung eines Fertigers erreicht wird.

Je nach erwarteter Verkehrsbelastung wird ein unterschiedlich aufwendiges Mix Design durchgeführt. Zur Unterscheidung wird die erwartete Anzahl an äquivalenten 8-t-Standardachsen (MESA) verwendet. Im Folgenden ist diese Verkehrsbeanspruchung gemäß des 4.-Potenz-Gesetzes in den in Deutschland gebräuchlichen Wert B, der Anzahl der äquivalenten 10-t-Achsübergängen gemäß RStO [24], umgerechnet:

- Mix-Design-Stufe 1 (MESA < 3; entspr. B < 1,23 Mio)
- Mix-Design Stufe 2 (MESA < 6; entspr. B < 2,45 Mio)
- Mix-Design Stufe 3 (MESA > 6)

Es werden drei verschiedene BSM-Baustoffe klassifiziert:

- BSM1: Mischgut mit hoher Scherfestigkeit für Tragschichten von Befestigungen mit Verkehrsbeanspruchungen von $B \geq 2,45$ Mio. Im Mischgranulat kommen sorgfältig abgestufte gebrochene Gesteinskörnungen oder Asphaltgranulat zur Anwendung.

- BSM2: Mischgut mit mittlerer Scherfestigkeit für Befestigungen mit $B < 2,45$ Mio unter Verwendung von natürlichen Kiesen und Sanden oder Asphaltgranulat.
- BSM3: Mischgut, bei dem meist der natürlich vorhandene Untergrund (Boden-Sand-Gemisch) mit höheren Bindemittelgehalten stabilisiert wird (Anwendung nur bei Verkehrsbeanspruchungen mit $B < 0,41$ Mio).

Zu Beginn des Mix Designs werden die verfügbaren Gesteinskörnungen bzw. Straßenausbaustoffe untersucht und das erforderliche Ergänzungs-gesteine festgelegt, um die in Tabelle 11 angegebenen Korngrößenverteilung zu erreichen. Insbesondere bei BSM mit Bitumenemulsion wird ein minimaler fiktiver Hohlraumgehalt angestrebt. Die entsprechende Korngrößenverteilung soll mittels Fuller-Parabel ermittelt werden:

$$P(d) = \sum \dots$$

mit: P: Siebdurchgang bei Siebweite d, D: Größtkorndurchmesser, n = 0,45 für minimalen fiktiven Hohlraumgehalt.

Im zweiten Schritt erfolgt die Auswahl des Bindemittels (Bitumenemulsion oder Schaumbitumen) durch die Überprüfung der Kompatibilität zwischen Bitumenemulsion und Gesteinskörnung bzw. die Optimierung der Eigenschaften des Schaumbitumens (Expansion und Halbwertszeit).

In Mix-Design-Stufe 1 wird der Bindemittelgehalt anhand der Spaltzugfestigkeit von trockenen Probekörpern für alle BSM-Anwendungen unabhängig von der erwarteten Verkehrsbeanspruchung optimiert. Anhand der Spaltzugfestigkeit von wassergesättigten Probekörpern wird die Art und der Gehalt aktiven Füllers bestimmt. Nach [10] werden dazu Marshall-verdichtete Probekörper verwendet. Die Anforderungswerte an die verschiedenen BSM-Klassen sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Mix-Design-Stufe 2 dient der Überprüfung der Mischguteigenschaften bei einem Wassergehalt, der sich langfristig in Situ einstellen wird (ca. 43 bis 50 % des optimalen Wassergehaltes). Dazu wird ein kombiniertes Labor-Curing eingesetzt, bei dem die Probekörper zunächst unversiegelt und später in einer Plastiktüte versiegelt konditioniert werden.

Mix-Design-Stufe 3 wird bei hoher Verkehrsbeanspruchung anstelle der Mix-Design-Stufe 2 angewendet. Dabei werden Triaxialversuche eingesetzt, um die Scherfestigkeit nach Mohr-Coulomb zu be-

stimmen. Anforderungen werden gestellt an die Kohäsion und den Reibwinkel, vgl. Bild 3. Die Triaxialversuche werden bei 25 °C mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 3 mm/min durchgeführt.

Zur Überprüfung der Feuchtigkeitsempfindlichkeit werden Probekörper nach dem MIST-Verfahren (Moisture Induced Sensitivity Test) konditioniert, mit dem die dynamische, pumpende Verkehrsbeanspruchung simuliert wird [10]. Dabei wird der Probekörper in eine Druckzelle eingebaut. Der Probekörper wird bei einer Temperatur von 25 °C insgesamt 100 Sättigungszyklen ausgesetzt. In jedem Zyklus wird Wasser mit einem Druck von 140 kPa in den Probekörper gepresst. Die Zeitdauer des Druckimpulses beträgt 0,54 s, gefolgt von einer Lastpause von 1,4 s. Im Anschluss an die Feuchtigkeits-Impulsbeanspruchung wird die Scherfestigkeit der Probekörper mittels Triaxialversuch bestimmt [25].

Für die Schichtdickendimensionierung steht für geringe Verkehrsbeanspruchungen ($B \leq 0,41$ Mio) ein Befestigungskatalog zur Verfügung. Für höhere Verkehrsbeanspruchungen von bis zu $B = 12,3$ Mio wird ein Verfahren in Anlehnung an die „Structural Number SN“ beschrieben. [10]

Der Aufbaukatalog bietet Befestigungsvarianten in Abhängigkeit von der Verkehrsbeanspruchung, der Untergrundtragfähigkeit (angegeben ist der CBR-Wert) sowie der Straßenkategorie. Entsprechend der deutschen Straßenkategorien ergeben sich Befestigungen gemäß Tabelle 12. Für die Übertragung der CBR-Werte der Unterlage auf den im deutschen Regelwerk verankerten Verformungsmodul E_{v2} wird folgender Zusammenhang nach Powell [26] verwendet:

$$E_{v2} = 17,6 \cdot \dots$$

Beim rechnerischen Dimensionierungsverfahren nach [10] wird für die geplante Befestigung eine Structural Number SN berechnet. Der für eine Schicht verwendete Steifigkeitsmodul ist in Tabelle 13 angegeben. Da große Steifigkeitsunterschiede zwischen den Schichten das Tragverhalten beeinflussen wird für jede Schicht ein weiterer Kennwert berechnet, indem die Steifigkeit der darunter liegenden Schicht mit dem „Modular Ratio Limit MLR“ multipliziert wird. Als maßgebende Steifigkeit wird der minimale der beiden Steifigkeitskennwerte verwendet. Die structural number SN ergibt sich aus der Summe der effektive Schichtsteifigkeiten multipliziert mit der Schichtdicke und Anpassungsfaktoren für Tragschicht-Zuverlässigkeit und Feuchtigkeitsbedingungen:

$$SN = \sum \left(\sum \cdot \sum \cdot \sum / 10.000 \right), \text{ mit:}$$

E_i : Effektive Steifigkeit der Schicht i ; $E_i = \min$
(Stiffness; $t_{i-1} \cdot \text{MLR}$)

t_i : Schichtdicke [mm]

b_i : Base Confidence Factor.

Anhand der errechneten Structural Number kann mittels Bild 4 die aufnehmbare Verkehrsbeanspruchung abgeleitet werden.

Tabelle 11. Anforderungen an BSM-Baustoffen nach südafrikanischem Regelwerk [10]

Eigenschaft	Anforderung			
	BSM1	BSM2	BSM3	Bemerkung
Korngrößenverteilung des Mischgranulates				
Mix-Design-Stufe 1 (Marshall-Probekörper)				
Curing-Verfahren	Mix-Design-Stufe 1, um Probekörper mit Massekonstanz zu erreichen ($w < 0,5\%$): 72 h bei Raumtemperatur; natürliche Luftfeuchtigkeit			
Spaltzugfestigkeit (trocken)	> 225 kPa	175 bis 225 kPa	125 bis 175 kPa	Prüftemperatur $T = 25\text{ °C}$
Spaltzugfestigkeit (gesättigter PK)	> 100 kPa	75 bis 100 kPa	50 bis 75 kPa	
Spaltzugfestigkeitsabfall [%]	keine Anforderung. Falls $ITS_{\text{trocken}} > 400\text{ kPa}$ und $ITSR < 50\%$, dann			
Mix-Design- Stufe 2 (Vibrationsverdichtung; Durchmesser 150 mm, Höhe 127 mm)				
Curing-Verfahren	Mix-design-Stufe 2 & 3, um Wassergehalt in situ zu erreichen (ca. 50 % des optimalen Wassergehaltes): mit Bitumenemulsion: 26 h bei 30 °C (unversiegelt) + 48 h bei 40 °C (versiegelt) mit Schaumbitumen: 20 h bei 30 °C (unversiegelt) + 48 h bei 40 °C (versiegelt)			
Spaltzugfestigkeit (trocken)	> 175 kPa	135 bis 175 kPa	125 bis 175 kPa	Prüftemperatur $T = 20\text{ °C}$
Spaltzugfestigkeit (gesättigter PK)	> 150 kPa	100 bis 150 kPa	60 bis 100 kPa	
Mix-Design- Stufe 3 (Vibrationsverdichtung; Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm)				
Curing-Verfahren	wie bei Mix-Design-Stufe 2			
Kohäsion	> 250 kPa	100 bis 250 kPa	50 bis 100 kPa	$T = 25\text{ °C}$
Reibwinkel	> 40 °	30 ° bis 40 °	< 30 °	
Verbleibende Kohäsion nach Feuchtigkeitsbeanspruchung	> 75 kPa	60 bis 75 kPa	50 bis 60 kPa	Nach MIST-Konditionierung

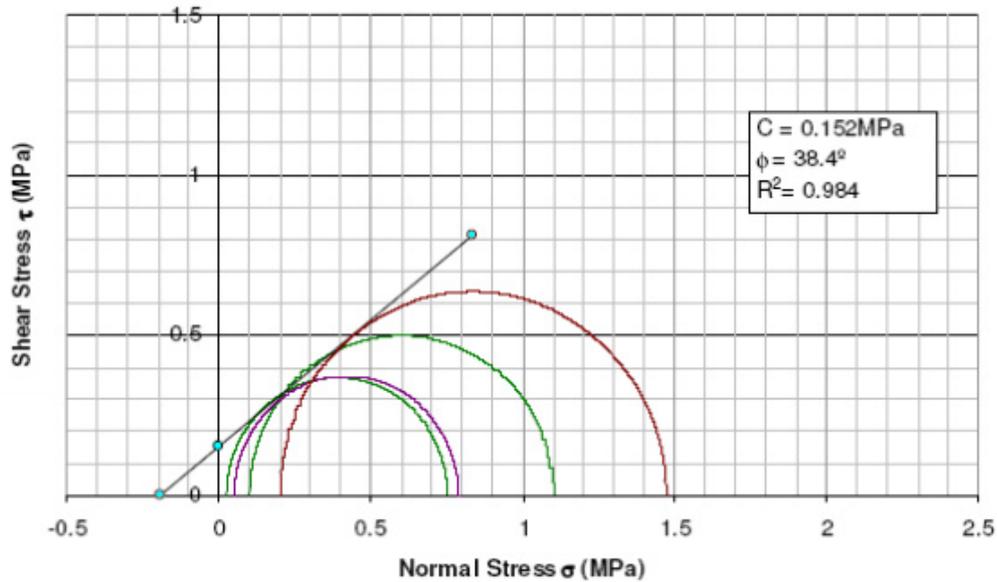


Bild 3. Beispiel für die Ermittlung der Kohäsion C und des Reibwinkels ϕ von BSM-Baustoffen mit Triaxialversuchen bei kontinuierlicher Belastung [27]

Tabelle 12. Befestigungskatalog für schwach beanspruchte Befestigungen [10]. Schichtdicke der BSM und Art der Asphaltdeckschicht (DS: Dünnschichtbelag bzw. AC₄: 4 cm Asphaltdeckschicht)

Bauweise	Untergrundtragfähigkeit		Klassifiziertes Straßennetz Verwendung von BSM 2		Nicht-Klassifiziertes Straßennetz Verwendung von BSM 3	
	CBR [%]	E_{v2} [MN/m ²]	MESA ≤ 300.000 B ≤ 0,13 Mio	MESA ≤ 1.000.000 B ≤ 0,41 Mio	MESA ≤ 300.000 B ≤ 0,13 Mio	MESA ≤ 1.000.000 B ≤ 0,41 Mio
BSM auf Untergrund	3 bis 7	36 bis 61	-	30 cm + AC ₄	20 cm + AC ₄	20 cm + AC ₄
	7 bis 15	61 bis 100		30 cm + DS		
	> 15	> 100		12,5 cm + DS	12,5 cm + DS	15 cm + DS
BSM auf Tragschicht ohne Bindemittel	3 bis 7	36 bis 61	45cm + 12,5 cm + DS	37,5 cm + 10 cm + DS	45 cm + 15 cm + DS	
	7 bis 15	61 bis 100	15 cm + 12,5 cm + S	25cm + 12,5 cm + DS	30cm + 12,5 cm + DS	
	> 15	> 100	-	12,5 cm + 10 cm + DS	15 cm + 12,5 cm + DS	

Die Schichtdicke der BSM-Schicht ist jeweils fett gedruckt.

Tabelle 13. Materialkennwerte für Dimensionierungsverfahren nach Structural Number SN (Auszug aus [10])

Schichtmaterial	Modular Ratio Limit MLR	Steifigkeit [MPa]	Base Confident Factor b_i
Dünnschichtbelag	2,0	800	-
Heißasphalt	5,0	3.500	1,0
BSM 1	3,0	600	1,0
BSM 2	2,0	450	0,7
Schottertragschicht	1,9	500	0,7
Kiestragschicht	1,8	320	0,1
Anstehender Boden (G9)	1,4	90	-4,0

Klima-Feuchtigkeitsfaktor für anstehenden Boden:
moderate Bedingungen: 0,9; feuchte Bedingungen: 0,6

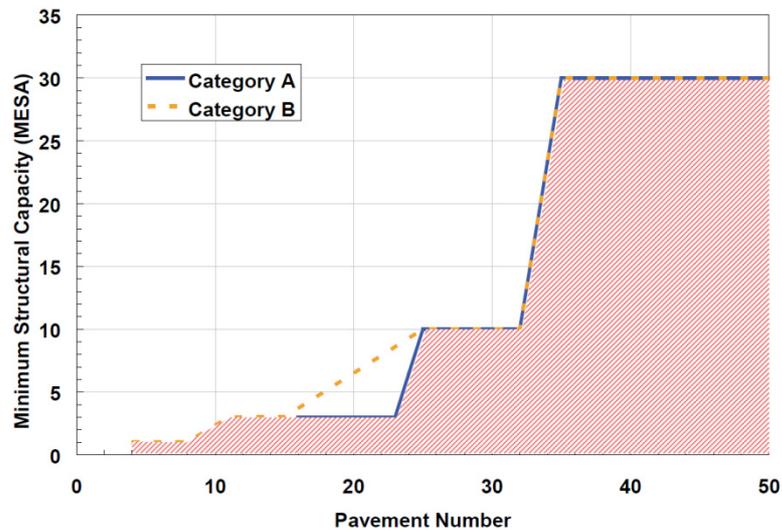


Bild 4. Aufnehmbare Verkehrsbeanspruchung in Abhängigkeit der Structural Number der Befestigung [10]

Als Beispiel sind in Tabelle 14 die Structural Numbers für aus dem deutschen Merkblatt für Kaltrecycling [3] entnommenen Anwendungsbeispiele berechnet und die daraus abgeleiteten aufnehmbaren äquivalenten 10-t-Achsübergänge zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die Untergrundtragfähigkeit durch die Anwendung des Modular Ratio Limits einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung ausübt. Für das erste Beispiel wird tatsächlich eine dimensionierungsrelevante Beanspruchung berechnet, welche der Bauklasseneinteilung gemäß MKRC weitgehend entspricht. Im zweiten Beispiel führt die hohe Untergrundsteifigkeit dazu, dass die Steifigkeit der BSM-Schicht gut ausgenutzt werden kann. Trotz dünner Asphaltdecke resultiert daraus eine hohe Structural Number, welche zu einer erheblich hö-

heren aufnehmbaren Verkehrsbelastung führt als die im MKRC berücksichtigte Bauklasse VI (B < 0,1 Mio).

3.2.5 Vergleich der Regelwerke

Die im Detail betrachteten vier nationalen Regelwerke weisen Unterschiede und Gemeinsamkeiten auf. Im Folgenden wird ein Vergleich der zusammengestellten Inhalte durchgeführt. Dabei werden die im Projekt „CoRePaSol“ [28] zusammengestellten Regeln für KRC-Baustoffe ebenfalls berücksichtigt. Zunächst sind in Tabelle 15 die Anforderungen an Bindemittelgehalte zusammengestellt. Zusätzlich enthält die Tabelle 15 Angaben, in welcher Art Festigkeitsanforderungen (Minimalwert, Maximalwert, Wasserempfindlichkeit) an die Baustoffe gestellt werden

Tabelle 14. Anwendungsbeispiele des Structural-Number Dimensionierungsverfahrens gemäß [10]

Befestigung (M KRC)	Material	Schichtdicke [mm]	Steifigkeit [MPa]			· · /10.00 0	SN	Verkehrsbelastung
			Material	aus Unterlage	maßgeblich · Steifigkeit			
Beispiel 1 (BK III; EV2 ≥ 45 MN/m ²)	AC D	40	3500	5 · 660 = 3.300	3.300	13,2	22, 2	MESA = 8,0; B = 3,3 Mio
	AC T	100	3500	5 · 132 = 660	660	6,6		
	BSM1	180	600	3,0 · 44 = 132	132	2,4		
	Unterlage	90 · 0,6 · 10 = 44 MPa			-	-		
Beispiel 2 BK VI; EV2 ≥ 120 MN/m ²)	AC D	60	3500	5 * 450 = 2.250	2.250	13,5	19, 8	MESA = 6,0 B = 2,5 Mio
	BSM2	140	450	2 * 278 = 556	450	6,3		
	Unterlage	320 · 0,9 · 10 = 278 MPa			-	-		

Tabelle 15. Vergleichende Zusammenstellung der Anforderungen an kalt verarbeitete bitumengebundene Baustoffe aus internationalen Regelwerken [28]

Land	Mischgutart	Bindemittel	Bindemittelgehalt [%]			Anteil < 0,063 mm [%]	Festigkeitsanforderungen				
			Bitumenemulsion	Schaumbitumen	Zement		min.	max.	Wasserempfindlichkeit	Mindeststeifigkeit	
Tschechien	BSM	BE	0,9 – 1,6	-	-	≤ 6	x	-	x	-	
Portugal			≥ 1,5	-	≤ 1 %	0 - 3	x	-	x	-	
Spanien			≥ 1,5	-	≤ 1 %	0 - 3	x	-	x	-	
UK			≥ 3,0	-	-	5 – 22	-	-	x	x	
Irland			3,3±0,3	-	-	0 – 8	x	-	x	-	
Tschechien	SB	SB	-	0,9 – 1,6	-	≤ 6	x	-	x	-	
Finnland			-	≥ 0,8 %	1/3 · B	4 – 8	x	-	x	-	
Südafrika			≤ 3,5	-	≤ 1,0	4 – 10	x	x	x	-	
Frankreich	GE	BE	≥ 3,6	-	-	4 – 8	x	-	x	x	
Frankreich			≥ 4,0	-	-	4 – 8	x	-	x	x	
Schweiz	BCSM	BE	1,8 – 3,0	-	1,5 – 2,5	2 - 12	x	-	x	-	
UK			≥ 3,0	-	≥ 1,0	5 – 22	-	-	x	x	
Schweiz	SB	SB	-	2,5 – 5,0	1,0 – 2,0	3 – 12	x	-	x	-	
Tschechien	SCRM	BE	2 – 3,5	-	2,5 – 5,0	≤ 15	x	x	x	-	
Deutschland			2,0 – 6,0	-	3,0 – 6,0	4 – 9	x	x	x	-	
Tschechien		SB	SB	-	2 – 3,5	2,5 – 5,0	≤ 15	x	x	x	-
Deutschland				-	2,5 – 5,0	1,0 – 3,0	4 – 9	x	x	x	-

3.3 Dauerhaftigkeit

3.3.1 Berichte über Versuchsstraßen

International sind Kaltbauweisen für die Herstellung von bitumengebundenen Tragschichten meistens keine Standardbauweisen, welche im Regelwerk vollständig beschrieben werden. Die Vielzahl von Versuchs- und Untersuchungsstraßen, über die in der internationalen Literatur berichtet wird, zeigt ein großes Interesse an den Bauweisen.

Im Folgenden werden Berichte über Versuchs- und Untersuchungsstraßen sowie Anwendungsstudien vergleichend gegenübergestellt. Dies erfolgt ohne detaillierte Beschreibung der einzelnen Studien sondern in tabellarischer Form (vgl. Tabelle 16), unter Angabe der grundlegenden Zusammensetzung der verwendeten Kaltmischgutsorten sowie Hinweise zu Verkehrsbeanspruchung und Nutzungsdauer.

3.3.2 Praxiserfahrungen zur Dauerhaftigkeit

In Schweden wurden in den 1990er Jahren Versuchsstraßen angelegt, in denen Kaltasphalte unter Verwendung einer Bitumenemulsion mit einem speziellen, den Brechvorgang steuerndem Additiv verwendet wurden. Diese Strecken werden von dem Bitumenemulsionshersteller regelmäßig untersucht. In verschiedenen Veröffentlichungen wird über das Langzeitverhalten berichtet [9] [29] [30].

In [29] wird eine Übersicht über die insgesamt 16 Teststrecken gegeben, von denen für fünf Daten des Langzeitverhaltens vorliegen. Lediglich bei einer Strecke wurde die Kaltasphaltschicht nach 8 Jahren Nutzungsdauer mit einem Dünnschichtbelag instandgehalten. Die anderen Strecken weisen nach 12 bzw. 15 Jahren keine Beeinträchtigungen des Zustands auf.

Im Detail werden in den Veröffentlichungen drei Versuchsstrecken beschrieben, in denen jeweils verschiedene Varianten des bitumenemulsionsgebundenen Kaltmischgutes eingesetzt wurden. Bei der Strecke „Trinnan“ (DTV ca. 200 Fz/24h) wurden zwei Varianten des Kaltmischgutes (Variation der Bindemittelviskosität) in einer Dicke von 6 cm auf die Unterlage eingebaut und verdichtet. Bei der Strecke „Överboda“, mit ca. 35 Schwerfahrzeugen pro Tag etwas stärker beansprucht, wurden drei verschiedene Varianten von Kaltmischgut eingesetzt. Neben der Variation der Bindemittelviskosität in der Bitumenemulsion (160/220 bzw. 330/430) wurde eine Variante unter Verwendung von 70 % Asphaltgranulat hergestellt. Bei der Strecke „Hijåggmark“ wurden zwei Schichten Kaltasphalt verwendet (4 cm 0/44 auf 5 cm 0/16). Jeweils wurden dabei neue Gesteinskörnungen bzw. 80 % Asphaltgranulatanteil eingesetzt.

Die untersuchten Strecken weisen nach 12 bis 15 Jahren Nutzungsdauer einige Kälterisse auf, wel-

che auf einen harten Winter 2003 mit Temperaturen bis $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ zurückgeführt wurden. Spurrinnenbildung von mehr als 5 mm Tiefe konnte bei keiner der Strecken beobachtet werden. Einige Strecken, bei denen Asphaltgranulat verwendet wurde, weisen geringfügige Ermüdungsrissbildung auf. Trotz der hohen Hohlraumgehalte um 10 % wurden an aus Bohrkernen rückgewonnenen Bindemitteln eine vergleichsweise geringfügige Bindemittelverhärtung ermittelt.

3.3.3 Ergebnisse aus Beschleunigten Belastungsversuchen

Ergebnisse einer Studie zum Trag- und Versagensverhalten von verschiedenen Tragschichtsystemen in Asphaltbefestigungen wurden in einem Versuchsstand in Neuseeland untersucht [31]. Verschiedene BSM-Varianten mit Schaumbitumen sowie zwei Kontrollfelder wurden als Tragschichten mit 20 cm Schichtdicke in die Versuchseinrichtung eingebaut:

- B00C00: Schaumbitumen 0 %, Zement 0 %
- B00C10: Schaumbitumen 0 %, Zement 1,0 %
- B12C10: Schaumbitumen 1,2 %, Zement 1,0 %
- B14C10: Schaumbitumen 1,4 %, Zement 1,0 %
- B22C00: Schaumbitumen 2,2 %, Zement 0 %
- B28C10: Schaumbitumen 2,8 %, Zement 1,0 %

Die Befestigungen wurden zunächst für 150.000 Lastwechseln mit 40 kN und später weitere 350.000 Lastwechsel mit 50 kN belastet. Anschließend wurde die Auflast auf 60 kN erhöht und die Belastungsgeschwindigkeit von 40 km/h auf 30 km/h reduziert. Nach insgesamt 1.300.000 Lastwechseln wurde die Tragschichten mit Wasser gesättigt.

Der Verlauf der Spurrinnenbildung auf den verschiedenen Befestigungen ist in Bild 5 dargestellt. Darin kann erkannt werden, dass alle untersuchten Befestigungen nahezu vergleichbare bleibende Verformungen aufweisen. Bis zu einer Überrollungszahl von 1.000.000 weist die ungebundene

Tragschicht B00C00 die höchsten Verformungen auf, gefolgt von der BSM-Variante ohne Zement B22C00 sowie der rein zement-stabilisierten Variante B00C10. Die drei BSM-Varianten mit 1 % Zementzugabe weisen auch nach Wasserzutritt einheitlich die geringsten Verformungen auf.

Während der gesamten Belastung konnte keine Rissbildung in der über der Tragschicht eingebauten Asphaltdeckschicht (5 cm) beobachtet werden. Auch zeigten FWD-Messungen, dass sich das Tragverhalten infolge der Belastung nicht veränderte.

Allerdings war es nicht möglich, Probekörper für Labor-Steifigkeitsversuche aus Bohrkernproben der Befestigung herzustellen, da die Proben wenig Bindung aufwiesen.

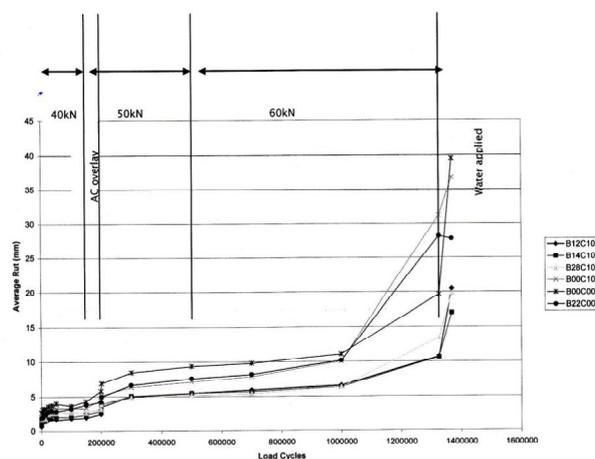


Bild 5. Verlauf der Spurrinnenbildung auf Probebefestigungen mit beschleunigter Belastung [31]

Die beschriebenen Beobachtungen bestätigen die Aussagen von südafrikanischen „BSM-Experten“, dass sich bitumen-stabilisierte Baustoffe eher wie ungebundene Baustoffe verhalten und nicht wie herkömmlicher Heißasphalt [32]. Daher ist es nicht zielführend, Ermdungsrissbildung in der BSM-Schicht als Dimensionierungskriterium zu verwenden. Vielmehr sollte das Verformungsverhalten, z. B. mittels Triaxialversuchen, bei der Konzeption von Straßenbefestigungen mit BSM berücksichtigt werden.

3.4 Einflussfaktoren der Mischgutszusammensetzung auf die mechanischen Eigenschaften

3.4.1 Hohlraumgehalt

Kaltemischgut weist einen hohen Hohlraumgehalt auf, der auf den für die Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit erforderlichen, vergleichsweise hohen Wassergehalt zurückzuführen ist. Dabei zeigen zahlreiche Studien, dass die entstehenden Luftporen sowohl bei Kaltemischgut aus Bitumenemulsion [33] als auch aus Schaumbitumen [36] deutlich kleiner sind als bei herkömmlichen Asphaltmischgut.

Alle Arten von mit Bitumenemulsion oder Schaumbitumen hergestelltem Kaltemischguts weisen nach der Verdichtung einen Hohlraumgehalt auf, der deutlich höher ist als bei Asphaltbeton-Schichten. Der Grund dafür liegt darin, dass die Bitumenemulsion etwa 40 % Wasser enthält, welches erst durch den Brechvorgang frei gesetzt wird. Zusätzlich dazu ist meist weiteres Zugabewasser erforderlich, um eine ausreichend gute Verdichtbarkeit des Mischgutes zu erreichen. Insgesamt weisen die bitumenemulsionsgebundenen Baustoffe direkt nach Einbau und Verdichtung Hohlraumgehalte auf, welche etwa 6 bis 8 % höher sind als die vergleichbarer Walzaphalte [33]. Ein großer Anteil dieses Hohlraumes entsteht beim Brechen der Emulsion und das Konglomerieren der Bitumentropfen. Aus diesem Grund sind die Luftporen erheblich feiner als bei Heiasphalten, wie Bild 6 zeigt [33]. Diese Mikroporen können nicht durch Verdichtung reduziert werden. Durch die kombinierte Wirkung höherer Temperaturen, Trocknung des Materials („Curing“) und Verkehrsbeanspruchung verschwinden die „Mikroporen“ innerhalb mehrerer Monate bzw. Jahre. Dadurch sind Verringerungen des Hohlraumgehaltes während der ersten Jahre der Nutzung um mehrere Prozentpunkte zu beobachten. Dies geht einher mit einer Erhöhung der Steifigkeit des Materials, resultierend in höherer Tragfähigkeit der Befestigung durch die zunehmende Verspannung der Gesteinskörnungen und den dadurch verbesserten Lastabtrag.

Dennoch führt der hohe Hohlraumgehalt zu verringerter Steifigkeit und Festigkeit des Baustoffes. Durch die Zugabe von hydraulischen Bindemitteln kann diesem vermeintlichen Festigkeitsverlust entgegengewirkt werden. Infolge Hydratation bauen sich mineralische Bindungen auf. Diese resultieren jedoch in starren Materialeigenschaften, wodurch die Gefahr der Rissbildung innerhalb der Schicht aus Kaltemischgut wächst.

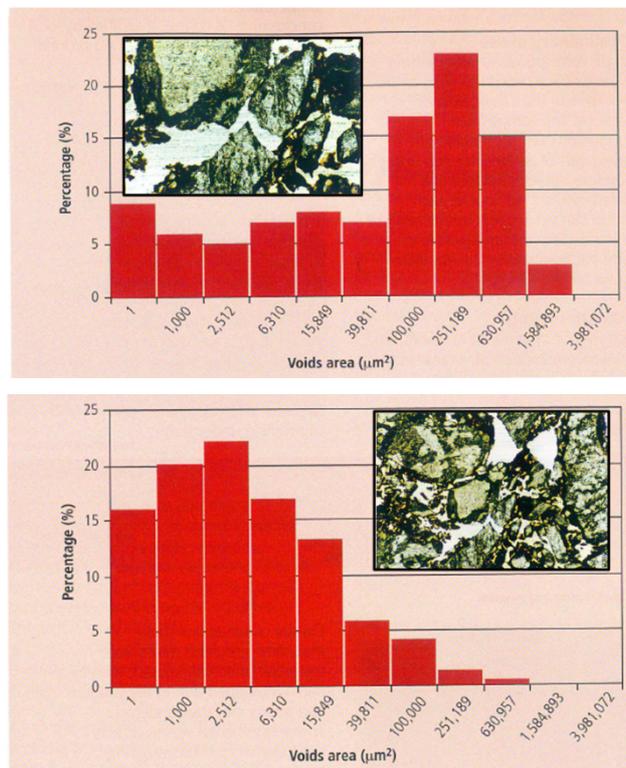


Bild 6. Verteilung der Größe der Luftporen in Heißasphalt (oben) und in bitumenemulsionsgebundenem Kaltemischgut (unten) [33]

3.4.2 Aktive Füller

Um die Festigkeitsentwicklung von Kaltemischgut zu beschleunigen kann anstelle von Zement ein anderer aktiver Füller eingesetzt werden, der zum einen das für Einbau und Verdichtung erforderliche Wasser chemisch bindet und zum anderen mineralische Bindungen aufbaut.

In Großbritannien enthält das Regelwerk für bitumenhaltiges Kaltemischgut [21] den Hinweis, dass die Verwendung von Flugasche als Füller die Festigkeit positiv beeinflusst. Ein Beispiel für die Wirkung von Flugasche zeigt Bild 7. So wird durch den teilweisen Ersatz des Feinanteils durch Flugasche langfristig eine deutliche Steifigkeitszunahme erreicht. Die Autoren der Studie weisen die Festigkeitsentwicklung als Erfolg aus [37]. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Steifigkeitsgewinn hauptsächlich auf puzzolanische Verbindungen im Baustoff zurückgeführt werden kann. Bei Berücksichtigung des Einbauwassergehaltes von 14,5 % ist ein deutlich höherer Hohlraumgehalt zu erwarten als bei den zum Vergleich herangezogenen Asphaltmischgutvarianten. Daher darf bezweifelt werden, ob der resultierende Baustoff die flexiblen Eigenschaften eines Asphaltes aufweist.

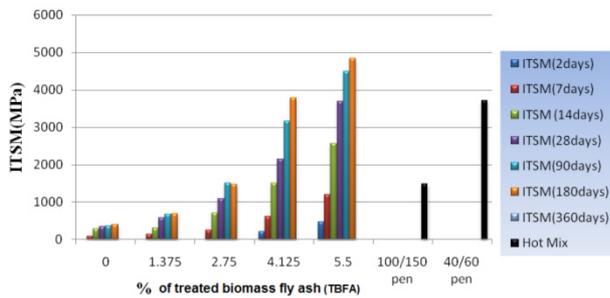


Bild 7. Wirkung von Flugasche-Füller auf die Steifigkeitsentwicklung von Kaltasphalt-Mischgut (0/10, Bitumengehalt 6,4 %) [37]

In BSM-Mischgutvarianten, z. B. [35], wird Kalkhydrat als aktiver Füller eingesetzt. Dadurch kann das für die Mischgutherstellung und die Verdichtung erforderliche Wasser gebunden werden, ohne dass starre Bindungen zwischen den Gesteinskörnungen entstehen, wie es bei der Verwendung von Zement der Fall wäre.

Mittels Elektronenmikroskop-Aufnahmen konnte in [38] die Ausbildung von CSH- und Ettringit-Strukturen in BCSM-Mischgut visualisiert werden, siehe Bild 8. Die Hydratationsprodukte können den Bindemittelfilm um die Gesteinskörnungen durchstoßen und bilden somit starre chemische Bindungen auf. Dadurch kann mit zunehmenden Zementgehalt ein starker Anstieg der mechanischen Festigkeit erreicht werden, der jedoch mit einer Verringerung der Flexibilität verbunden ist.

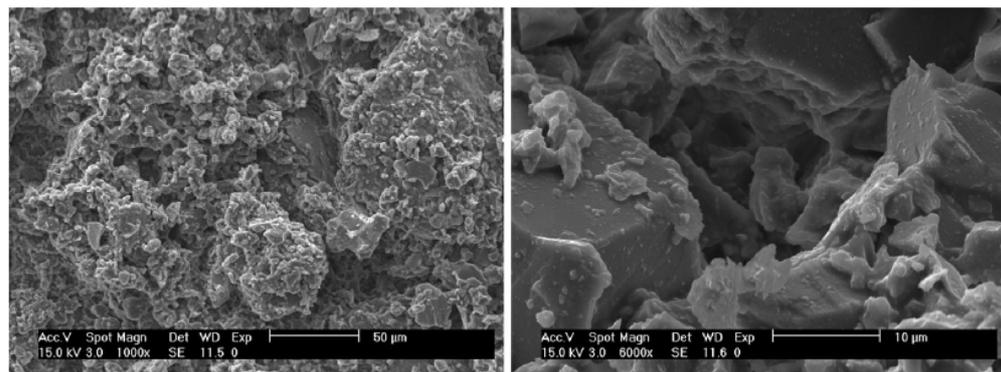


Fig. 9 ESEM images of AEM

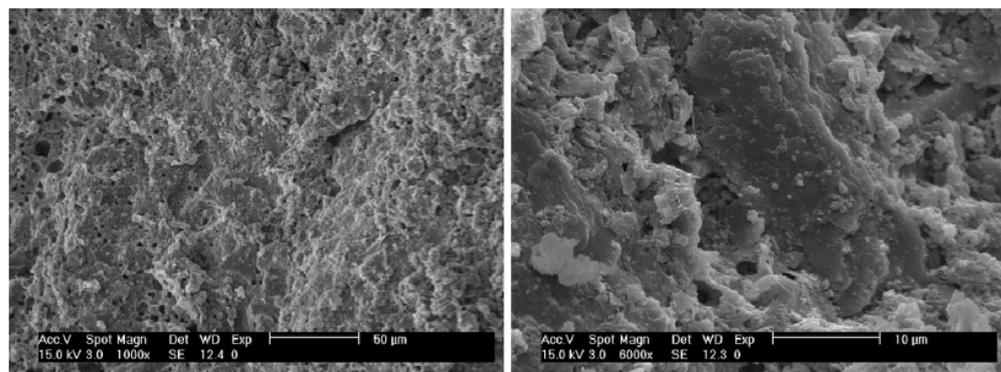


Fig. 10 ESEM images of CAEM

Bild 8. Elektronenmikroskop-Aufnahmen von BSM-BE (oben) und BCSM-BE (unten) [38]

3.5 Zusammenstellung der Verfahrenspraxis

3.5.1 Mix Design – Prüfverfahren

Die sich während der Nutzungsdauer verändernden Materialeigenschaften müssen bei der Optimierung der Mischgutrezeptur berücksichtigt werden. Daher werden im Rahmen des Mix Designs zumindest ein Teil der verschiedenen Lebensphasen des Kaltmischgutes prüftechnisch angesprochen.

- Herstellung, Einbau und Verdichtung:
 - Überprüfung des Brechverhaltens und der Verarbeitbarkeit des Mischgutes
 - Bestimmung der Verdichtbarkeit und des Einbauwassergehaltes
 - Herstellung von Probekörpern im Labor
- Tragfähigkeit nach Einbau und Verdichtung
 - Beschleunigtes Curing der Probekörper im Labor
 - Langzeit-Gebrauchsverhalten
 - Verformungswiderstand
 - Steifigkeit
 - Risswiderstand
 - Wasserempfindlichkeit

International kommen dabei verschiedene Prüfverfahren zur Anwendung.

3.5.1.1 Prüfung der Verarbeitbarkeit

Insbesondere nicht-gebrochene Systeme erfordern eine präzise Prüfung des Brech-Verlaufs nach Mischgutherstellung, weil die Einbau- und Verdichtbarkeit bei fortschreitenden Brechens der Emulsion erschwert bzw. unmöglich ist.

Als Prüfverfahren kommt der Nynas workability test zur Anwendung. Das Prüfverfahren ist seit 2014 in dem Normentwurf prEN 12697-53 „Cohesion increase by spreadability-meter method“ beschrieben. Dabei wird die Kraft gemessen, welche erforderlich ist, um ein lose in eine rechteckige Form gefülltes Mischgut zu verschieben. Diese Prüfung wird an unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Mischgutherstellung durchgeführt. An dem Anstieg der jeweils bestimmten Maximalkraft kann der Verlauf des Brechens (bei nicht-gebrochenen Systemen) bzw. des Koagulierens (bei gebrochenen Systemen) in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden. [39]

3.5.1.2 Prüfung der Verdichtbarkeit und des Einbauwassergehaltes

Zur Abschätzung des Verdichtungsaufwandes bzw. zur Vermeidung von verdichtungsunwilligem Mischgut wird die Verdichtbarkeit im Labor be-

stimmt. Folgende Prüfverfahren kommen dabei zur Anwendung:

- Modifizierter Proctorversuch nach DIN EN 13286-2
- Gyrator-Versuch nach DIN EN 12697-32
- Doppelkolben-Verdichtungsverfahren, Duriez-Verdichtung [3]

Während der Einbauwassergehalt mittels Proctor [15] bzw. Doppelkolbenverdichtung [3] für Kaltrecycling-Gemische prüftechnisch ermittelt werden, sind in den französischen Normen keine Vorgaben zur Bestimmung des Wassergehaltes enthalten. Nach [11] wird dem Mischgut solange Wasser zugefügt, bis visuell eine gute Umhüllung der Gesteinskörnungen festgestellt wird.

3.5.1.3 Beschleunigte Curing-Verfahren im Labor

Kalt hergestellte bitumenhaltige Baustoffe werden mit einem Wassergehalt von ca. 6 % hergestellt und eingebaut. Je nach Witterungsbedingungen nimmt der Wassergehalt nach der Fertigstellung der Schicht bis zu einem natürlichen Feuchtigkeitsgehalt ab. Bei Verwendung von hydraulischen Bindemitteln kommt es zusätzlich zu Hydratation. Mit Abnahme des Wassergehaltes ist meistens eine Zunahme der mechanischen Festigkeit und Steifigkeit verbunden. Dieser Vorgang dauert in der Straßenbefestigung mehrere Monate. In Situ wird das Mischgut durch die Verkehrsbelastung in dieser Zeit weiter verdichtet.

Im Zuge der Erstprüfung muss dieser Trocknungsprozess beschleunigt werden. Bei Vergleich der international nach den verschiedenen Regelwerken angewendeten Lagerungsbedingungen (Dauer, Temperatur, Luftfeuchtigkeit) für das Curing im Labor wird zunächst versucht die Bedingungen in Situ zu simulieren. Jedoch kann die Laborsimulation aufgrund des Zeiteinflusses nicht die realen Verhältnisse nachstellen, die zudem durch zusätzliche Verkehrsbelastung und Nachverdichtung geprägt ist.

Aus diesem Grund wurde im Forschungsprojekt CoRePaSol [13] vorgeschlagen, das Labor-Curing in Abhängigkeit vom Zementgehalt des Mischgutes durchzuführen:

- Zementgehalt ≤ 1 %: Curing bei 50 °C im Trockenschrank für drei Tage
- Zementgehalt > 1 %: Curing bei Raumtemperatur für 14 Tage.

Damit wird keine Simulation der Bedingungen in der Straßenbefestigung erreicht. Jedoch wird damit der baustoffspezifische Endzustand (natürlicher Wassergehalt) erreicht, damit die langfristigen me-

chanischen Eigenschaften im Zuge der Erstprüfung ermittelt werden können.

3.5.1.4 Prüfung des Verformungswiderstandes

Bitumengebundene kalt verarbeitete Baustoffgemische mit Bitumen- und Zementgehalten weisen ein Materialverhalten auf, das zwischen jenem von ungebunden Tragschichten, Asphalt und Beton liegt. Insbesondere die Mischgutvarianten mit geringen Bindemittelgehalten, bei denen keine vollständige Bitumenumhüllung aller Gesteine erreicht wird (BSM-SB, BSM-BE, GE) zeigen ein Schädigungsverhalten welches weniger durch Rissbildung als durch bleibende Verformungen geprägt ist. Daher sollte der Verformungswiderstand in die Mischgutkonzeption einbezogen werden. Das südafrikanische Mix-Design-Verfahren für BSM sieht die Durchführung von Triaxialversuchen vor, mit denen Kohäsion und Bruchwinkel ermittelt werden um so die Scherfestigkeit zu bewerten. GE-Baustoffe werden mittels einaxialen Druckversuchen bewertet (Duriez-Versuche).

3.5.1.5 Prüfung des Steifigkeitsmoduls

Der Steifigkeitsmodul wird nahezu in allen Mix-Design-Vorschriften als Bezugsgröße für die Tragfähigkeit des Baustoffes herangezogen. Dabei hat sich die Durchführung von Spaltzug-Schwellversuchen (mit Lastpause) nach DIN EN 12697-26, Anhang C, als praktikabel erweisen. Dieser Versuch ist im englischen und französischen Regelwerk für die Bestimmung des Steifigkeitsmoduls verankert.

3.5.1.6 Prüfung des Risswiderstandes

Zentrales Prüfverfahren für die meisten Mix-Design-Verfahren zur Einstellung eines geeigneten Bindemittelgehaltes ist der statische Spaltzugversuch. Die Prüfung dient zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit der Baustoffe. Eine Klassifizierung verschiedener Baustoffvarianten, welche Einfluss auf die eingesetzte Schichtdicken nimmt, wird dabei nicht anhand der Spaltzugfestigkeit vorgenommen.

Der Ermüdungswiderstand von kalt hergestellten bitumengebundenen Baustoffen wurde in verschiedenen Forschungsprojekten ermittelt. Darin haben sich im Vergleich zu Heiasphalten durchgehend geringere Ermüdungswiderstände ergeben (z. B. [8], [40]).

3.5.1.7 Prüfung der Wasserempfindlichkeit

Der Nachweis der Wasserempfindlichkeit ist in allen Mix-Design-Verfahren, welche international angewendet werden, implementiert.

Insbesondere bei der Verwendung von Bitumenemulsionen besteht die Gefahr, dass der Brechvorgang durch Wasserzutritt zu dem verdichteten Mischgut rückgängig gemacht wird.

Auch bei Mischgut mit Schaumbitumen, bei dem die Gesteinskörnungen nicht vollständig mit Bitumen umhüllt sind steigt die Gefahr der Störung des Haftverhaltens bei Verwendung von hydrophilen Gesteinen.

3.5.2 Herstellung

Die Herstellung von werksgemischtem bitumenemulsionsgebundenem Kaltmischgut erfolgt in Durchlauf- oder Chargen-Mischanlagen.

Um komplett umhüllte Kaltasphalte herstellen zu können sind besondere Mischtechniken erforderlich. So kann durch Vorumhüllung eines Teils der Gesteinskörnungen vor Herstellung des Gesamt-mischgutes eine vollständige Umhüllung aller Körner erreicht werden. Für die Vorumhüllung und Haupt-Mischung können auch unterschiedliche Bindemittel zu Verwendung kommen. Diese speziellen Mischverfahren sind häufig patentrechtlich geschützt [6].

Gemäß dem englischen Regelwerk soll der Wassergehalt der Gesteinskörnungen vor der Mischgutherstellung $\leq 3,5\%$ betragen [21].

3.5.3 Lagerfähigkeit und Transportbedingungen

Im Normalfall wird werksgemischtes bitumenemulsionsgebundenes Kaltmischgut direkt nach der Mischgutherstellung eingebaut [6]. Eine Lagerzeit von bis zu mehreren Wochen kann durch die Zugabe von Fluxmitteln erreicht werden, wobei dies nur auf Verkehrsflächen mit geringen Beanspruchungen möglich ist.

3.5.4 Einbau und Verdichtung

Der Einbau von werksgemischtem bitumenemulsionsgebundenem Kaltmischgut erfolgt meist mit herkömmlichen Straßenfertigern. Bei Mischgut des Typs GE oder BSM kommen auch Grader zur Anwendung [6] [15].

Kaltmischgut erfordert hohe Verdichtungsenergien, da die Bindemittelviskosität insbesondere in gebrochenen Systemen sehr hoch ist. Für vollständige bindemittelumhüllte Mischgutsorten (Kaltasphalte KA) empfiehlt [6] den Einsatz von Glattmantelwalzen mit oder ohne Vibration. Ein Vorteil der Kaltmischgutsorten gegenüber Heißasphalt ist, dass die Verdichtung nicht zugig nach dem Einbau des Baustoffes erfolgen muss, sondern über einige Stunden erfolgen kann. Für den Mischguttyp GE empfiehlt [6] den kombinierten Einsatz von Vibrati-

ons-Glattenmantel- und Gummiradwalzen. Die Gummiradwalze soll dabei pro Reifen eine Last von mindestens 3 t und einen Luftdruck von 7 bar aufweisen. Durch die zur Verfügung stehende Verdichtungszeit werden etwa 15 Überrollungen der Vibrationswalze und anschließend 20 Überrollungen der Gummiradwalze durchgeführt.

Kaltasphalte mit offener Korngrößenverteilung sowie Grave Emulsion-Schichten erfordern eine Nachbehandlung der Oberfläche, da diese bei direkter Verkehrsbelastung zu Kornausbrüchen neigen. GE-Tragschichten werden meist mit einer Oberflächenbehandlung oder einem Dünnschichtbelag behandelt, damit bis zum Einbau der endgültigen Deckschicht eine Verkehrsfreigabe erfolgen kann [6].

Deckschichten aus offen gestuftem zusammengesetztem Kaltasphalt werden zum Schutz der frisch verlegten Schicht direkt im Anschluss an die Verdichtung mit feinen Gesteinskörnungen 2/4 abgestreut. Dadurch wird die im frischen Zustand empfindliche Oberfläche in der ersten Zeit geschützt [6].

3.5.5 Kurzzeitverhalten – Curing

Nach Abschluss der Verdichtung beginnt der Curing-Prozess der kalt verarbeiteten bitumengebundenen Tragschicht. Dabei nimmt der Wassergehalt der Schicht langsam ab, wodurch die Steifigkeit und mechanische Festigkeit des Baustoffs zunimmt.

Hinsichtlich der Früh-Tragfähigkeit der hergestellten Schicht gehen die Regelwerke weit auseinander. Zum einen wird den hergestellten Schichten eine frühe Belastbarkeit zugeschrieben und die Möglichkeit der frühen Verkehrsfreigabe als Vorteil der Bauweise herausgestellt. Dies betrifft kalt verarbeitete Baustoffe, welche durch eine nicht vollständige Bindung der Gesteinskörnungen charakterisiert sind und ein den Schichten ohne Bindemittel ähnliches Tragverhalten aufweisen (BSM, GE). Für die frühe Belastbarkeit ist die gute Entwässerung des Materials von Bedeutung um Porenwasser-Überdruck zu vermeiden.

Bindemittelreiches Mischgut, bei dem der Entzug des Wassers mittels hydraulischer Bindemittel erreicht wird, sind empfindlicher hinsichtlich Verformungen bei früher Verkehrsfreigabe (BCSM, SCRM).

3.5.6 Klimatische Einflüsse auf den Einsatz bitumenemulsionsgebundener Baustoffe

3.5.6.1 Generelle Einsatzbedingungen

In Frankreich wird seit Jahrzehnten emulsionsgebundenes Kaltmischgut für die Herstellung von Straßenbefestigungen eingesetzt. Bei der Misch-

gutkonzeption wird das regionale Wetter berücksichtigt. So werden nach [11] diese Bauweisen schwerpunktmäßig in Südfrankreich und in der Bretagne eingesetzt. In Südfrankreich erlaubt das trockenere Klima den Einsatz von nicht-vollständig umhüllten Körnungen, während in der Bretagne ausschließlich Kaltasphalte mit vollständig umhüllten Gesteinskörnungen eingesetzt werden.

In [13] wurden Kriterien für die Auswahl von kalt recycelten Baustoffvarianten in Abhängigkeit der klimatischen Verhältnisse erarbeitet:

- BSM – Bitumen-stabilisiertes Mischgut (Zementgehalt $\leq 1\%$):
 - mit Schaumbitumen für flexible Befestigungen in Regionen mit kaltem Klima (z. B. Skandinavien): Die geringe Tragfähigkeit von BSM erlaubt die schadlose Anpassung der Befestigung an Frosthebungen.
 - mit Bitumenemulsion für Befestigungen in Regionen mit warmem Klima (z. B. Mittelmeerraum): die emulsionsgebundenen Baustoffe sind feuchtigkeitsempfindlich. Hohe Temperaturen und Trockenheit sind erforderlich, damit die Baustoffe zur Ausbildung ausreichend hoher Tragfähigkeit trocknen können.
 - mit Bitumenemulsion nicht geeignet für Regionen mit feuchtem Klima: Verringerung des Wassergehaltes kann nicht schnell genug erfolgen kann.
- BCSM – Bitumen-Zement-Stabilisiertes Mischgut (Zementgehalt $> 1\%$):
 - Einsetzbar in Regionen mit feuchtem Klima. Das mineralische Bindemittel reduziert dem Material das für die Verdichtung erforderliche Wasser, sodass hohe Tragfähigkeiten erreicht werden können.
 - Aufgrund eingeschränkter Flexibilität nur geeignet für frostsichere Befestigungen.

3.5.6.2 Wettervoraussetzungen für den Einbau

In Großbritannien sind folgende Randbedingungen hinsichtlich der Wetterbedingungen für Einbau und Verdichtung im Regelwerk verankert [21] [22]:

- Lufttemperatur $\geq 3\text{ °C}$
- Kein starker Regenfall, welcher zu unzulässig hohem Wassergehalt des Mischgutes führen würde
- Einbauperiode üblicherweise zwischen April bis September (Irland)
- Keine Frosteinwirkung auf frisch eingebaute (feuchte) Schicht, bevor der Wassergehalt reduziert werden konnte

Gemäß dem südafrikanischen Regelwerk [10] wird für die Herstellung von BSM mit Bitumenemulsion eine Mindesttemperatur von $T \geq 5 \text{ °C}$ gefordert. Weiterhin wird angegeben, dass höhere Temperaturen wegen der besseren Verdunstungsgeschwindigkeit vorteilhaft für die Entwicklung von Steifigkeit und Festigkeit ist.

Für BSM mit Schaumbitumen wird als Mindesttemperatur der zur Mischgutherstellung verwendeten Gesteinskörnungen 10 °C gefordert [10]. Die Mindesttemperatur für die Kaltmischgutherstellung mit Schaumbitumen hängt mit der Viskosität des Bindemittels zusammen. Je höher die Temperatur, desto einfacher lässt sich das Mischgut verdichten. In Kalifornien wird bei Verwendung von Straßenbaubitumen 70/100 für das Schaumbitumen die gleiche Mindesttemperatur gefordert. Allerdings kann BSM mit Schaumbitumen bei Verwendung von weicheren Bitumen (z. B. 160/220) auch bei niedrigeren Temperaturen verarbeitet werden [41].

3.5.7 Einsatzgrenzen hinsichtlich der Verkehrsbeanspruchungen

Nach Angaben von [11] können in Frankreich bitumenemulsionsgebundenes Kaltmischgut in Oberbauschichten in Straßenbefestigungen eingesetzt werden, wenn die Verkehrsbelastung unter 700 Schwerfahrzeuge pro Tag beträgt. Dies entspricht etwa der Belastungsklasse Bk3,2 bis Bk10 gemäß RStO. Ähnliche Obergrenzen für Bauweisen, bei denen das kaltverarbeitete Mischgut nur durch eine dünne Asphaltdeckschicht überbaut wird, sind auch in anderen Regelwerken enthalten, siehe Kapitel 3.2.

Bei Einsatz kalt verarbeiteten Mischgutes als Tragschicht in Kombination mit dickeren Asphaltbefestigungen sind auch höhere Verkehrsbeanspruchungen möglich, wie Dimensionierungsregeln in der Schweiz [20] und dem Vereinigten Königreich [21] zeigen.

Weiterhin zeigen diverse Anwendungsbeispiele (vgl. Tabelle 16), dass bei guter Abstimmung der Baustoffe mit den örtlichen Verhältnissen auch Befestigung mit hohen Verkehrsbeanspruchungen umgesetzt werden können.

3.5.8 Dimensionierung von Befestigungen mit bitumenemulsionsgebundenem Kaltmischgut

In der in Frankreich verwendeten Dimensionierungsvorschrift NF P98-086 (2011) sind keine Verfahren für die Schichtdickendimensionierung von Straßenbefestigungen mit Schichten aus bitumenemulsionsgebundenen Kaltmischgut be-

schrieben. Der von [11] berichtet praktikable Ansatz sieht vor, dass die für Heißasphalt-Tragschichten ermittelte Schichtdicke bei Verwendung von Grave Emulsion oder Kaltasphalt um 50 % erhöht wird.

In ähnlicher Weise werden in den Schweizerische Dimensionierungsverfahren den kaltverarbeiteten bitumengebundenen Fundationsschichten eine geringere Tragfähigkeit als Asphalttragschichten zugeordnet, wodurch um 25 % dickere Tragschicht erforderlich werden.

Insbesondere für geringe bis mittlere Verkehrsbeanspruchungen werden Befestigungssysteme beschrieben, bei denen die kaltverarbeitete bitumengebundene Schicht nur durch eine dünne Deckschicht überbaut wird.

3.6 Ökobilanzielle Erkenntnisse

In Deutschland wird der überwiegende Teil der flexiblen Straßenbefestigungen in Heiasphaltbauweise ausgeführt. Seit einigen Jahren nimmt die Verwendung von viskosittsverndernden Zusätzen mit dem Ziel der Reduzierung der Herstelltemperaturen von Asphaltmischgut zu. Jedoch ist hierbei nicht die Energieeinsparung bei der Asphaltherstellung das primäre Ziel, sondern der Arbeit- und Gesundheitsschutz durch Reduzierung der Emissionen.

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauprodukten und –verfahren fasst die DIN EN 15804 [42] Grundregeln zusammen. Unter anderem wird beschrieben, welche inhaltlichen Aspekte des Lebenszyklus von Bauwerken bei der Bewertung berücksichtigt werden können, siehe Bild 9. So werden drei verschiedene Arten der Umweltproduktdeklaration unterschieden:

- von der Wiege bis zum Werkstor, Herstellung der Baustoffe unter Berücksichtigung der Herstellung aller Ausgangsstoffe sowie der Transportvorgänge.
- von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen.
- von der Wiege bis zur Bahre.

Je nach Inhalt des betrachteten Szenarios werden die Umweltindikatoren (z. B. Treibhauseffekt – Masse der quivalenten CO_2 -Emission) bezogen auf die Baustoffmasse ($\text{kg CO}_2/\text{t}$) angegeben. Dabei werden lediglich die Phasen A1 bis A3 betrachtet:

- A1: Rohstoff-Bereitstellung,
- A2: Transport,
- A3: Herstellung.

Alternativ werden Gesamt-Emission einer bestimmten, abgegrenzten Baumaßnahme (z. B. kg

CO₂ / km Autobahn) berechnet, wobei die Phasen A (Herstellungsphase) und B (Nutzungsphase) verpflichtend betrachtet werden. Falls die Ökobilanz die Herstellungsphase eines Bauwerkes und dessen Nutzungsphase berücksichtigen soll, so sind spezifische Bauwerksszenarien zu untersuchen. Hier sind insbesondere beim Vergleich verschiedener Baustoffe (z. B. Heißasphalt bzw. kalt verarbeitetes bitumengebundenes Mischgut) unterschiedliche Befestigungsstrukturen (Schichtdicken, Überbauung) zu berücksichtigen. Bei Berücksichtigung der Nutzungsphase (B1 bis B5) hat die Nutzungsdauer der Befestigung einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Lebenszyklus-Bewertung. Hierbei ist anzumerken, dass insbesondere für innovative Bauweisen, aber auch für herkömmliche Baustoffe, fundierte Kenntnisse der Nutzungsdauern nicht vorliegen. Ökobilanzielle Studien sind dann auf grobe Schätzungen oder auf systematische Sensibilitätsstudien angewiesen.

In zahlreichen internationalen Studien wurden die ökobilanziellen Effekte der Verwendung von Kaltasphalt im Vergleich zu Heißasphalt untersucht. Die Ergebnisse der im Folgenden kurz vorgestellten Ökobilanz-Studien sind in Tabelle 17 vergleichend gegenübergestellt.

Zunächst ist das Ergebnis einer Ökobilanz für Heißasphalt angegeben [1]. Demnach hat die Mischgutproduktion mit 39 % einen signifikanten Anteil an den gesamten äquivalenten CO₂-Emissionen, welche beim Neubau eine Autobahnbefestigung (Länge 1 km) und deren Erhaltung über 50 Jahre anfallen. Der Einsatz von kalt hergestellten Baustoffen kann somit die CO₂-Bilanz signifikant verbessern.

Für ein Bauprojekt in Schweden wurde die Herstellung der Asphalttragschicht in Heiß- und Kaltbauweise verglichen. Das in einem Steinbruch betriebene Mischwerk lag 48 km entfernt von der Einbaustelle. Sowohl Kalt- als auch Heißmischgut wurde über die gleiche Distanz transportiert. Auch Einbau und Verdichtung erfolgte in der Studie mit den gleichen Verfahren. Im Ergebnis resultiert die Herstellung von Heißasphalt in CO₂-Emissionen von 42,3 kg je t eingebauten Heißasphaltmischgut. In Kaltbauweise unter Verwendung einer Bitumenemulsion mit speziellem Brech-Additiv werden 13,7 kg CO₂ je t Mischgut erreicht. Rein rechnerisch reduzieren sich die CO₂-Emissionen dadurch auf ein Drittel des Wertes für Heißasphalt [30].

Im Zuge der Erneuerung bestehender Asphaltbefestigungen mit weiteren Nutzung der bestehender Tragschichten in Frankreich werden in [43] Kaltrecycling (In-Situ)-Bauweisen mit der Erneuerung der Asphaltdecke mit Heißasphalt verglichen. Dabei werden Reduktionen der Treibhausgasemissionen von 30 % (bei der Erneuerung der Asphaltdecke in der Dicke von 12 cm) bzw. bei Verwendung von Schaumbitumen von 23 % erreicht.

In [44] werden zwei Bauweisen mit werksgemischtem bitumengebundenen Kaltmischgut mit der Vergleichsbauweise unter Verwendung von Heißasphalt verglichen. Demnach kann der Ausstoß von Treibhausgasen durch die Anwendung einer Grave Emulsion mit natürlichen Gesteinskörnungen um 56 % gegenüber der Anwendung von Heißasphalt reduziert werden. Durch Verwendung von Asphaltgranulat anstelle von natürlichen Gesteinskörnungen wird die CO₂-Bilanz weiter auf -64 % verbessert. Der Bericht enthält allerdings keine Details zu den untersuchten Szenarien sowie den genauen Zusammensetzungen der analysierten Baustoffe und Befestigungen.

Für Kanadische Erhaltungsbauweisen werden In-Situ-Kaltrecycling-Bauweisen mit herkömmlichen Erneuerungsverfahren (Ausbau und Ersatz mit Heißasphalt) verglichen [45]. Ohne Informationen zu Details zu Baustoffzusammensetzung und Befestigungsstruktur werden Reduktionen der äquivalenten CO₂-Emissionen um 52 % berechnet.

Zusammenfassend kommen die betrachteten Studien zum Ergebnis, dass der Ausstoß von Treibhausgasen durch den Einsatz von kalt verarbeiteten Mischgut anstelle von Heißasphalt zwischen 23 % und 64 % reduziert werden kann. Die große Spannweite dieser Treibhausgaseinsparungen zeigt, dass die tatsächlichen Vorteile in Nachhaltigkeitsaspekten (Ökobilanz, Treibhauseffekt, Lebenszykluskosten) nur beding allgemein beschrieben werden können. Zur Erfassung tatsächlicher ökobilanzieller Vorteile verschiedener Bauweisen sind projektspezifische Untersuchungen erforderlich.

Die größten Effekte werden dabei bei Kombination der Kaltbauweise mit hohen Recyclinganteilen sowie kurzen Transportwegen (insbesondere In-Situ-Bauweisen oder der Einsatz von Mischwerken in Baustellennähe) erreicht.

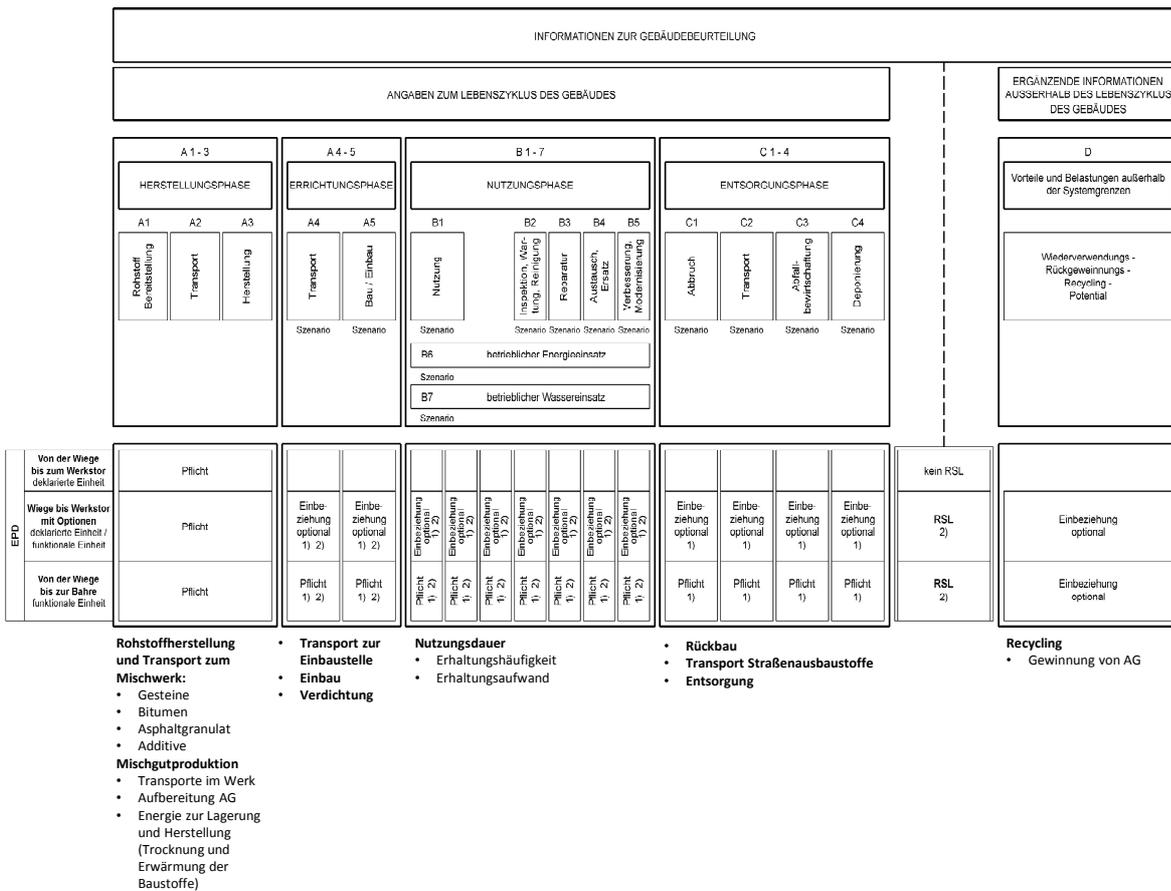


Bild 9. Inhalt einer Lebenszyklus-Analyse (DIN EN 15804) [42] mit ergänzten Beispielen für die Herstellung von Asphaltmischgut

Tabelle 17: In ökobilanziellen Studien erfasste CO₂-Emissionen je t eingebauten Baustoffes kg CO₂/t)

Quelle	Inhalt der Studie (Phasen)	kg CO ₂ -Emissionen je t eingebauten Mischgutes [kg CO ₂ / t] bzw. für das betrachtete Bauwerk [kg CO ₂ / Bauwerk]								Reduzierung [%]	Art der Kaltbauweise
		Rohstoffgewinnung		Mischgutherstellung		Transport, Einbau & Verdichtung		Gesamt			
		HMA	KMA	HMA	KMA	HMA	KMA	HMA	KMA		
[1]	A1 – B7	869.000	-	620.000	-	103.000	-	1.592.000	-		
[30]	A1 – A5	1,5	1,5	35,5	7,1	5,3	5,1	42,3	13,7	-67 %	KA-BE
[43]	A1 – A5	nicht im Detail veröffentlicht								-30 %	BSM-BE
[43]	A1 – A5	nicht im Detail veröffentlicht								-23 %	BSM-SB
[44]	A1 – A5	1.104	713	1.491	330	154	151	2.748	1.194	-57 %	GE-BE
[44]	A1 – A5	1.104	444	1.491	382	154	151	5748	978	-64 %	BSM-BE

4 Anwendungspotenzial in Deutschland

4.1 Einsatzpotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen Asphalt in Deutschland

Die verbreitete Anwendung von bitumenhaltigen Kaltmischgut für die Herstellung von tragfähigen Schichten in Fahrbahnkonstruktionen in verschiedenen Ländern mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen lässt ein hohes Anwendungspotenzial auch in Deutschland erwarten. Eine Umsetzung in bisher in Deutschland üblichen Fahrbahnkonstruktionen als Ersatz für Heißasphalt ist dabei nicht zielführend. Vielmehr müssen die jeweils spezifischen Materialzusammensetzungen, die verschiedenen Arten des Lastabtrages in den Straßenbefestigungen sowie die regionalen Klimaverhältnisse und Verkehrsbelastungen berücksichtigt werden.

Insbesondere können anhand der vorliegende Auswertung des internationalen Kenntnisstandes zu den Baustoffgemischen folgende Anwendbarkeiten für die verschiedenen Baustoffvarianten und Bauweisen für Deutschland identifiziert werden:

4.1.1 Kaltasphalt (KA)

Bindemittelreiches kalt verarbeitetes Mischgut, welches durch eine vollständige Bitumenumhüllung der Gesteinskörnungen gekennzeichnet ist, wird zum einen in Skandinavien und zum anderen in Frankreich eingesetzt. Bei Umgebungstemperaturen ist dies nur bei Verwendung von Bitumenemulsion möglich.

Anhand der Studie der Regelwerke sowie von Forschungsberichten ist eine sehr genaue Abstimmung der Bitumenemulsion und der Gesteinskörnungen erforderlich. Um ein verarbeitbares Mischgut zu erhalten sind ungebrochene Systeme zu bevorzugen. Dies kann durch die Verwendung speziell das Brechverhalten steuernde Additive erreicht werden oder durch die Verwendung sehr langsam brechender Emulsionen. In Frankreich werden auch anionische Bitumenemulsionen eingesetzt, bei denen die Bindung zwischen Bitumen und Gestein während der Verdichtung und danach durch Austrocknen des Emulsionswassers erfolgt. Im feuchten Zustand liegt das Materialverhalten einer ungebundenen Tragschicht vor.

Der Einsatz von Kaltasphalt ist demnach in sehr flexiblen Befestigungen möglich, welche geringe Verkehrslasten aufnehmen müssen (Prinzip Skandinavien) oder auf tragfähiger Unterlage, wobei ein zügiger Wasserentzug erfolgen muss. Letzteres er-

fordert eine offene Korngrössenverteilung sowie trockene Klimaverhältnisse.

Aufgrund der beschriebenen Randbedingungen ist der Einsatz von Kaltasphalt in Deutschland als wenig vielversprechend einzuschätzen.

4.1.2 Grave Emulsion (GE)

Bei Kaltmischgut nach dem GE-Prinzip wird ein Kaltmischgut mit Bitumenemulsion erzeugt, welches im gebrochenen Zustand eingebaut und verdichtet wird. Die Verwendung dieses Mischguttyps in Frankreich und Irland weist eine generelle Eignung auch für deutsche Klimaverhältnisse aus. Auch bei GE ist eine gute Abstimmung der Bitumenemulsion auf das verwendete Gesteinskrnungsgemisch erforderlich. Weiterhin übernimmt das Gesteinskrnungsgemisch den Lastabtrag, sodass eine hohe Anforderung an die Zusammensetzung gestellt wird. Die aufgrund des hohen Hohlraumgehaltes geringere Steifigkeit der Schicht erfordert Befestigungen, in denen die Tragschicht aus GE etwa das 1,5-fache der Schichtdicke von Asphalttragschichten beträgt.

Schichten aus Grave Emulsion erfordern einen tragfähigen Untergrund, was die Verwendung im Rahmen von Erneuerungsmaßnahmen auf bestehenden Befestigungsschichten nahelegt.

4.1.3 Bitumen-Stabilisiertes Mischgut (BSM)

Die internationale Anwendung von BSM auf Straßen mit geringer Verkehrsbeanspruchung sowie vereinzelt auch auf höher belasteten Strecken zeigt die Anwendbarkeit des Baustoffes. Aufgrund der geringen Bindemittelgehalte ist die Baustoffproduktion mit vergleichsweise geringen Kosten verbunden. Das Tragverhalten von BSM ähneln jenem einer ungebundenen Tragschicht, sodass die bisher nach RStO angewendeten Befestigungsaufbauten wahrscheinlich nicht geeignet sind.

Aufgrund der nicht erforderlichen Abstimmung zwischen Bindemittel- und Gesteinseigenschaften erscheint die Anwendung von BSM mit Schaumbitumen in Deutschland durch die Vielzahl von Mischgutproduzenten nherliegender als der Einsatz von Bitumenemulsion. Zudem besteht bei erneutem Wasserzutritt die Gefahr der Re-Emulgierung des Bitumens und somit der Ablösung des Bindemittels von den Gesteinskörnungen.

Vor der Anwendung von BSM in einer deutschen Baumaßnahme sollte das mechanische Verhalten des Baustoffes weitergehend analysiert werden, um eine geeignete Befestigungsdimensionierung zu ermöglichen.

4.1.4 Bitumen-Zement-Stabilisiertes Kaltmischgut (BCSM)

Da der deutsche Erfahrungshintergrund hinsichtlich kalt verarbeitetem bitumenhaltigen Mischguts im Bereich der bitumen- und zementgebundenen Baustoffe liegt, erscheint die Anwendung dieses Baustoffes am einfachsten umsetzbar zu sein. Es ist jedoch zu untersuchen, ob durch die Anwendung alternativer Dimensionierungsverfahren die Wirtschaftlichkeit von Befestigungen erhöht werden kann. So deutet der internationale Vergleich der angewendeten Befestigungen darauf hin, dass eine Reduzierung der die BSM-Schicht abdeckenden Asphaltsschichten möglich ist. Dies würde neben den Kosten auch die Nachhaltigkeit dieser Bauweisen verbessern.

4.1.5 Versiegelnde KRC-Baustoffe (SCRM)

Die vergleichsweise hohen Bindemittelgehalte der bisher zur Immobilisierung von Schadstoffen in Straßen-Ausbaustoffen eingesetzten Mischgutvarianten führen zu unwirtschaftlichen Mischgutzusammensetzungen, wenn schadstofffreie Ausbaustoffe eingesetzt werden.

4.2 Vorschlag eines Arbeitsplanes für die Erprobung der Kaltbauweise in Deutschland

Die Erfahrungen aus dem Ausland zeigen, dass ein hohes Anwendungspotenzial für Kaltbauweisen auch in Deutschland besteht. Um praktische Erfahrungen mit potentiellen Bauweisen gewinnen zu können wird folgender Arbeitsplan vorgeschlagen, der Aktivitäten im Bereich der Forschung (Laboruntersuchungen), der praktischen Erprobung (Untersuchungsstrecken) sowie der Lebenszyklus-Bewertungen enthält.

4.2.1 Forschungsaktivitäten

Trotz umfangreicher internationaler Anwendungserfahrungen bestehen Kenntnislücken zum mechanischen Verhalten von bitumengebunden, kalt verarbeiteten Baustoffen. Insbesondere zum Einfluss des kombinierten Einsatzes bituminöser und hydraulischer Bindemittel auf die mechanischen Eigenschaften besteht Forschungsbedarf. Dabei sollten Schadensmechanismen erarbeitet werden, welche die Implementierung der Baustoffe in rechnerische Dimensionierungsverfahren ermöglicht. Insbesondere muss vermieden werden, dass für Heißasphalt verwendete Modellvorstellungen unverändert auf Kaltmischgut übertragen werden, da hierbei die Gefahr besteht, dass die baustoffspezifischen Materialeigenschaften nicht bzw. falsch abgebildet werden.

Die international für die empirische und mechanistische Dimensionierung von Straßenbefestigungen mit Schichten aus Kaltmischgut verwendeten Verfahren sollten mit den in Deutschland standardisierten Verfahren nach RStO und RDO abgeglichen werden. Dadurch kann eine Einbindbarkeit der Baustoffe in das Befestigungssystem, welches in Deutschland angewendet wird, analysiert werden. Dies kann in einer theoretischen Studie typischer Dimensionierungs-Situationen bei Variation der Verkehrsbelastung, der Untergrundtragfähigkeit und der Frosteinwirkung erfolgen.

Ein Umsetzung eines Teiles dieser Forschungsaktivitäten in internationalen Verbundprojekten kann dabei die im Ausland vorhandenen Erkenntnisse und Erfahrungen auch für Deutsche Forschungsinstitutionen zugänglich machen.

4.2.2 Untersuchungsstrecken

Bestehende Untersuchungsstrecken in Deutschland sollten hinsichtlich der Dauerhaftigkeit weiterführend überwacht werden, wie es z. B. im Rahmen der B 52 [34] in einem internen BAST-Projekt durchgeführt wird. Jedoch sind weitere Bauweisen, welche anhand der internationalen Erfahrungen als vielversprechend eingestuft werden können, in Untersuchungsstrecken zu erproben. Anhand von Ergebnissen der vergleichenden Dimensionierungsstudie (s. o.) können geeignete Befestigungen ausgewählt werden. Für die Ausführung der Probestrecken sollte eine Beteiligung von in den Bauweisen international erfahrener Unternehmen in Betracht gezogen werden, um auch auf der Ebene der praktischen Umsetzung nicht vollständig auf theoretische Erkenntnisse zurückgreifen zu müssen.

4.2.3 Lebenszyklus-Bewertungen

Die Ergebnisspreizung der in Ökobilanzen berechneten CO₂-Emissionssenkungen zeigen, dass eine projektspezifische Betrachtungsweise erforderlich ist, um den für Deutschland zu erwartenden Nachhaltigkeitsnutzen in Bezug auf ökologische und ökonomische Einflüsse zu bewerten. Bei der Erstellung von Untersuchungsstrecken sollten Lebenszyklus-Bewertungen erstellt werden, um für Deutschland typische Nutzen der Kaltbauweisen zu quantifizieren.

4.2.4 Standardisierung

In die vorgeschlagenen Aktivitäten sollten Arbeitskreise der FGSV eingebunden werden um zum einen baupraktische Erfahrungen berücksichtigen zu können und zum anderen die Erkenntnisse frühzeitig für die Erstellung von Wissenspapieren zugänglich machen zu können. Hierbei sind insbesondere Arbeitskreise der AG 4 und 7 einzubeziehen.

5 Zusammenfassung

Kalt hergestellte, bitumenhaltige Baustoffe werden international in verschiedenen Ländern zur Herstellung von Tragschichten in flexiblen Fahrbahnbefestigungen eingesetzt. Im vorliegenden Projektbericht werden die verschiedenen Baustoffsysteme anhand von Regelwerken sowie Forschungs- und Baustellenberichten beschrieben. Aufgrund der dabei berichteten guten Erfahrungen hinsichtlich Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit sowie Herstellbarkeit in verschiedenen Ländern unterschiedlicher klimatischer Bedingungen (Skandinavien, Frankreich, Brasilien) erscheint die Technologie grundsätzlich auch in Deutschland anwendbar zu sein. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Mischguttypen in Anwendung sind, welche international unterschiedliche Bezeichnungen tragen:

- **Kaltasphalt:** Asphaltmischgut, bei dem die Gesteinskörnungen nach Brechen der Emulsion vollständig mit Bitumen umhüllt sind. Ein Einsatz in Trag-, Binder- und Deckschichten ist möglich (KA-BE).
- **Grave Emulsion (GE):** Als Tragschicht verwendeter Straßenbaustoff, bei dem die nicht-vollständig bitumentumhüllten groben Gesteinskörnungen in Mörtel eingebettet sind. Der Asphaltmörtel besteht aus dem vollständig mit Bitumen gebundenen Feinanteil mit feinen Gesteinskörnungen
- **Bitumen-Stabilisiertes Mischgut** mit Bitumenemulsion (BSM-BE) oder Schaumbitumen (BSM-SB).
Beim BSM-BE mit Bitumenemulsion liegt ein nicht vollständig mit Bitumen gebundener Asphaltmörtel vor, in dem die groben Gesteinskörnungen eingebettet sind.
Bei BSM-SB mit Schaumbitumen sind grobe und feine Gesteinskörnungen punktuell durch Asphaltmörtel-Tropfen miteinander verklebt
- **Bitumen-Zement-Stabilisiertes Mischgut** mit Zementgehalten von mehr als 1 % und Bitumenemulsion (*BCSM-BE*) oder Schaumbitumen (*BCSM-SB*). Neben den für BSM genannten Bindungen sind die Gesteinskörnungen zusätzlich mit mineralischen Bindemitteln verklebt.
- **Kaltrecycling-Baustoff für schadstoffhaltige Straßenausbaustoffe** (SCRM) mit höheren Bindemittelgehalten zur Immobilisierung von Schadstoffen aus Straßenausbaustoffen.

Die Verarbeitbarkeit bei Umgebungstemperatur wird durch das im Mischgut enthaltene Wasser erreicht. So brechen eingesetzte Bitumenemulsionen zumeist kurz nach der Mischgutherstellung. Das im

Mischgut enthaltene Wasser verhindert – wie auch bei Mischgut mit Schaumbitumen – die vollständige Verfestigung des Materials. Erst durch die Verdichtung wird Wasser aus den Kontaktbereichen der bitumentumhüllten Gesteine verdrängt, wodurch ein gebundener Baustoff entsteht.

Spezielle Additive erlauben jedoch die Herstellung von ungebrochenen Mischgut-Systemen. Hier erfolgt das Brechen der Emulsion erst während der Verdichtung, wodurch eine bessere Verarbeitbarkeit erreicht wird als bei gebrochenen Systemen.

Hinsichtlich des mechanischen Verhaltens weisen die hier beschriebenen Baustoffe jedoch grundsätzliche Unterschiede zu Heißasphalt auf, sodass eine Anwendung auch eine Adaption der Verfahren für die Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen sowie für die Qualitätssicherung bedarf.

Charakteristisch für die Baustoffe ist ein erheblich höherer Hohlraumgehalt, welcher aus dem Vorhandensein des für die Verdichtung bzw. die Emulgierung erforderlichen Wassers, des vergleichsweise geringen Bindemittelgehaltes sowie der geringen Verdichtbarkeit der Baustoffe resultiert. Dadurch weisen die verschiedenen Baustoffe insbesondere direkt nach Herstellung und Verdichtung geringere mechanische Festigkeiten im Vergleich zu Heißasphalt auf. Infolge der Reduzierung des Wassergehaltes durch Versickern und/oder Verdunsten sowie der Entwicklung mineralischer Bindungen beim Einsatz von hydraulischen Bindemitteln nimmt die Festigkeit und Steifigkeit der Baustoffe insbesondere zu Beginn der Nutzungsdauer zu, während eine Abnahme des Hohlraumgehaltes zu beobachten ist. Dieser als „Curing“ bezeichnete Vorgang kann dabei mehrere Monate und sogar einige Jahre dauern.

Die Mischgutrezeptur im Labor erfolgt meist unter Vorgaben einer stark eingegrenzten Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches, welche insbesondere kurz nach der Herstellung maßgeblich die Tragfähigkeit und Verformungsbeständigkeit der eingebauten Schicht bestimmt. Weiterhin werden Anforderungen an die mechanische Festigkeit gestellt, welche nach einer Simulation des Curings im Labor bestimmt wird. Dabei hat die Wasserempfindlichkeit eine große Bedeutung für die Dauerhaftigkeit des Baustoffes.

Verschiedene Ökobilanzen zeigen, dass durch die Anwendung von kalt verarbeitbaren Mischgut eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um bis zu 60 % gegenüber der Verwendung von Heißasphalt möglich ist.

Literatur

- [1] D. Deutscher Asphalt Verband, „Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen,“ 2009, p. S. 33.
- [2] E. A. P. A. EAPA, „Asphalt in Figures,“ 2013.
- [3] FGSV, Merkblatt für Kaltrecycling in Situ von Straßen M KRC, 2005.
- [4] FGSV, Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen M VB-K, 2007.
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 16/2015,“ 2015.
- [6] SFERB, Routes des France, Bitumen Emulsions, Saint-Just-La-Pendue, 2008.
- [7] D. Needham, Developments in bitumen emulsion mixtures for roads, Nottingham: PhD-Theseis, University of Nottingham, 1996.
- [8] M. Radenberg, M. Miljkovic und V. Schäfer, „Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht,“ Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft S 86, 2015.
- [9] P. Redelius, R. Lundberg, L. Thunell und Ö. Otterström, „Long term performance of cold mix asphalt,“ in *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012*, Istanbul, 2012.
- [10] Asphalt Academy, Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials, Pretoria: Asphalt Academy, 2009.
- [11] V. Gaudefroy und Y. Brosseaud, Interviewees, *Expert Interview on Grave Emulsion*. [Interview]. 2 Juni 2016.
- [12] F. Batista, M. De Lurdes Antunes, K. Mollenhauer und C. McNally, „Building blocks for a best practice guide on cold in place recycling,“ in *5th Eurasphalt & Eurobitume congress*, Istanbul, 2012.
- [13] K. Mollenhauer, D. Simnofske, J. Valentin, Z. Cizkova, J. Suda, F. Batista und C. McNally, „Mix designs for cold recycled pavement materials considering local weather and traffic conditions,“ in *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1st - 3rd June 2016*, Prag, 2016.
- [14] A. Grilli, A. Graziani und M. Bocci, „Compatibility and thermal sensitivity of cement-bitumen-treated materials,“ *Road Materials and Pavement Design*, Bde. %1 von %2Vol. 13, No. 4, 2012.
- [15] Wirtgen, Wirtgen Cold Recycling Technology, Windhagen: Wirtgen GmbH, 2012.
- [16] NF P98-121, „Assises de chaussées - Grave-émulsion - Définition - Classification - Caractéristiques - Fabrication - Mise en oeuvre,“ 2014.
- [17] NF P 98-139, „Enrobés hydrocarbonés-Couches de roulement: bétons bitumineux à froid,“ 1994.
- [18] NF P 98-150-2, „Enrobés hydrocarbonés à froid - Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement. Partie 2 : Enrobés hydrocarbonés à froid — Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en oeuvre,“ 2011.
- [19] VSS Forschung und Normierung im Strassen- und Verkehrswesen, SN 640492 - Fundationsschichten aus Asphaltbeton in Kaltbauweise. Anforderungen an das Mischgut, Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten, 2014.
- [20] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, SN 640 324. Dimensionierung des Strassenaufbaus. Unterbau und Oberbau., 2011.
- [21] Department for Transport, „Manual of contract documents for highway works. Volume 1: Specification for highway works. Series 900. Road Pavements - Bituminous bound materials,“ 2008.

- [22] Department of Transport, Tourism and Sport, „Guidelines on the depth of overlay to be used on rural regional and local roads,“ 2014.
- [23] D. Merrill, M. Nunn und I. Carswell, „A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements,“ TRL, 2004.
- [24] FGSV, Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen RStO, 2012.
- [25] Asphalt Academy, „Bitumen Stabilisation,“ [Online]. Available: <http://asphaltacademy.co.za/bitstab.php>. [Zugriff am 09 August 2016].
- [26] W. P. J. M. H. a. N. M. Powell, The structural design of bituminous roads., TRRL Report LR 1132, 1984.
- [27] Asphalt Academy, „DETERMINATION OF TRIAXIAL SHEAR PARAMETERS USING SIMPLE TRIAXIAL TESTS,“ [Online]. Available: http://www.asphaltacademy.co.za/Bitstab/Downloads/Method_7_Simple_Triaxial_Test_Procedure-May09.pdf.
- [28] F. Batista, J. Valentin, Z. Cizkova, T. Valentova, D. Simnofske, K. Mollenhauer, A. Tabakovic, C. McNally und M. Engels, „Report on available test and mix design protocols for cold-recycled bitumen stabilised materials. CoRePaSol deliverable D1.1,“ Prag, 2014.
- [29] P. Redelius, J.-A. Östlund und H. Soene, „Field experience of cold mix asphalt during 15 years,“ *Road Materials and Pavement Design RMPD*, Bd. 17, Nr. 1, pp. 223-242, 2016.
- [30] R. Lundberg, T. Jacobson, P. Redelius und J.-A. Östlund, „Production and durability of cold mix asphalt,“ in *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress | 1-3 June 2016 | Prague, Czech Republic*, paper EE74, 2016.
- [31] D. Lee, „Findings from Cold-in-Place Recycling Research on Optimum Foamed and Emulsified,“ in *TRB-Workshop 118 - In Place Recycling*, Washington D.C., 2013.
- [32] D. Collings und K. Jenkins, Interviewees, *Wirtgen BSM Workshop, Kassel*. [Interview]. 6 Juni 2016.
- [33] J.-P. Serfass, X. Carbonneau, F. Delfosse und J.-P. Triquigneaux, „Emulsified Asphalt Mixes: towards a complete design method,“ *Revue Générale des Routes*, pp. 2-22, 2010.
- [34] H. Müssenich und O. Rienhoff-gembus, „Kaltrecycling (KRC) in situ an der B 52,“ *Straße und Autobahn*, Nr. 9, pp. 650 - 658, 2010.
- [35] Wirtgen GmbH, „kaltrecycling für die Sanierung des Ayrton Senna Highways,“ Windhagen, 2016.
- [36] H. Lacalle Jiménez, N. Thom und J. Edwards, „Comparison between laboratory results for cold recycled bound materials,“ in *Procs. E&E conference*, Prag, 2016.
- [37] H. Al Nageim und S. Al-Busaltan, „Stiffness, Creep Properties and XRD Analysis of a New Fast-Curing Cold Mix Asphalt for Use in Highway Pavement,“ in *Procs. E&E conference*, Prag, 2016.
- [38] S. Du, „Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures,“ *Materials and Structures*, Bd. 47, pp. 1149-1159, 2014.
- [39] p. 12897-53, „Bituminous mixtures — Test methods — Part 53: Cohesion increase by spreadability-meter method,“ 2014.
- [40] A. Stimilli, A. Ferrotti, A. Graziani und F. Canestari, „Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt,“ *Road Materials and Pavement Design*, 2013.
- [41] D. Dave Jones (University of California, Interviewee, *Interview während Wirtgen BSM Workshop, Kassel*. [Interview]. 06 Juni 2016.
- [42] DIN EN 15804, „nachhaltigkeit vo Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte,“ 2012.
- [43] B. Eckmann, F.-. Delfose und E. Chevalier, „Reducing emissions and consumption of virgin aggregates through cold in-place recycling,“ in *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Istanbul, 2012.

- [44] X. Guyot, „Bitumen Emulsion Mixes: "Grave Emulsion" and "High RAP Content Cold Mix",“ in *3rd ISAP APE symposium*, Sun City, 2015.
- [45] B. Lane, T. Kazmierowski und A. E. Alkins, „Sustainable pavements - Environmental, Economic and Social Benefits of In-Situ Pavement Recycling,“ in *Annual Conference of the Transport Association of Canada*, Toronto, 2008.
- [46] D. Day und H. Soenen, Interviewees, *Expert interview on Cold Bitumen Emulsion Mixtures*. [Interview]. 2 Juni 2016.
- [47] I. Marek, B. Przemyslaw und M. Grzegorz, „The water resistance recycled base with the foamed bitumen in the aspect of hydraulic road binder,“ in *Procs. E&E conference*, Prag, 2016.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2011

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de](http://bast.opus.hbz-nrw.de) heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgebundenen, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hüniger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen
Weise, Schrang € 19,50

- S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung
Kemper, Schacht, Klapproth, Oeser, Beyer € 16,50
- S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50
- S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren
Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt
Böhm, Beara
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt
Wistuba, Alisov, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial
Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50
- S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013
Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50
- S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern
Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00
- schungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels
Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50
- S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)
Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50
- S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester(Kokosester)
Alisov, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt
Zander, Buch, Birbaum
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen
Schellenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt
Mollenhauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

- S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden
Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50
- S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften
Radenberg, Nytus, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 107: Baustoffe für standfeste Bankette
Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50
- S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines For-

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de