

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung

**Wirksamkeit von Bitumenemulsionen bei der
Wiederverwertung pechhaltiger Materialien
im Straßenbau**

Horst Georg Metz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor - Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Peter Schießl, i.R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich

Die Dissertation wurde am 20.04.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 21.07.2009 angenommen.

Vorwort

Kaltrecyclingverfahren für pechhaltige Materialien haben mich bereits im Rahmen einer Studienarbeit am Sächsischen Landesinstitut für Straßenbau beschäftigt. Meine Dissertation schlägt somit einen thematischen Bogen zum Anfang meiner wissenschaftlichen Laufbahn. Entstanden ist sie im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München.

»So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären, wenn man nach der Zeit und den Umständen das Möglichste getan hat.«

Johann Wolfgang von Goethe

Allen die dazu beigetragen haben, dass ich diesen Punkt erreicht habe, gebührt mein herzlicher Dank, an erster Stelle meinem Doktorvater, Prof. Peter Schießl, für die wissenschaftliche, kritische und sehr konstruktive Begleitung meiner Dissertation. Bei meinem Koreferenten, Prof. Martin Faulstich, möchte ich mich für die außerordentlich gute Zusammenarbeit mit seinem Lehrstuhl sowie für die Unterstützung und das Interesse an meiner Arbeit bedanken. Prof. Christoph Gehlen danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Dr. Thomas Wörner begleitete und förderte meinen wissenschaftlichen Werdegang am cbm und diese Arbeit im Speziellen. Daraus ergaben sich viele wertvolle Hinweise, wichtige Korrekturen und steter Praxisbezug. Danke Thomas, vor allem für die sehr persönliche Hilfe während der Endphase.

Vanessa Fritz, Marlit Köstler und Alfred Schwingenschlögl danke ich sehr herzlich für ihre tatkräftige und zuverlässige laborpraktische Unterstützung sowie die angenehme Zusammenarbeit, die zum Gelingen dieser Arbeit unabdingbar gewesen sind.

Mein besonderer Dank richtet sich an Dr. Johann Bleier, der mich mit seiner profunden Kenntnis der Emulsionstechnologie und mit seinem hohen Engagement bei der Vialit Asphalt außerordentlich unterstützt hat.

Großen Anteil an meiner persönlichen und wissenschaftlichen Entwicklung haben Cyrus Gharabaghy, Dr. Sven van der Sluis und Dr. Horst Dorner. Mit großem Vergnügen erinnere ich mich an unseren bereichernden, anregenden und prägenden Gedankenaustausch, nicht nur zu wissenschaftlichen Fragestellungen.

Liebe Eltern, meine liebe Jolanta, Euch schulde ich wohl den größten Dank, für Eure rückhaltlose Unterstützung, Eure Geduld und für Eure Hartnäckigkeit. Diese Arbeit ist für Euch.

Dresden, im August 2009

Zusammenfassung

Die Wirksamkeit von Bitumenemulsionen bei der Wiederverwertung pechhaltiger Straßenausbaustoffe hängt von ihrer Fähigkeit zur Immobilisierung der im Pech enthaltenen PAK und Phenole sowie von ihrer bautechnischen Eignung bei der Verarbeitung eines konkreten Straßenausbaustoffes ab. Die Arbeit befasst sich mit der Untersuchung und modellhaften Beschreibung des Brechverhaltens handelsüblicher Bitumenemulsionen sowie anhand von pechhaltigem Modellmischgut mit deren Fähigkeiten bei der Einkapselung von PAK. Anhand realer Straßenausbaustoffe werden die tatsächlich erreichbaren umweltrelevanten und bautechnischen Eigenschaften systematisch verifiziert.

Abstract

The effectiveness of bitumen emulsions in the recycling of bituminous road construction materials depends on their ability to encapsulate the PAH and Phenols contained in the pitch (tar) as well as on their technological suitability in the processing of a particular recycling material. The work comprehends the detailed investigation and modeling of the dissociation process of commercial bitumen emulsions as well as investigations concerning their abilities to encapsulate PAH using a bituminous model mixture. The actually achievable technologically and environmentally relevant properties are determined systematically with existing bituminous road construction materials.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielstellung	3
3	Stand der Wissenschaft und Technik	5
3.1	Teer, Pech und Bitumen – Herstellung und Abgrenzung	5
3.2	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	6
3.2.1	Chemische Struktur	7
3.2.2	Umwelt- und gesundheitsrelevante Auswirkungen	8
3.2.3	Lösungsverhalten und Flüchtigkeit	9
3.3	Phenole	11
3.3.1	Chemische Struktur	11
3.3.2	Umwelt- und gesundheitsrelevante Auswirkungen	11
3.3.3	Lösungsverhalten und Flüchtigkeit	13
3.4	Pechhaltige Ausbaustoffe	14
3.4.1	Aufkommen, Arten und Zusammensetzung	14
3.4.2	Nachweis teerstämmiger Materialien	17
3.5	Bitumenemulsionen	19
3.5.1	Zusammensetzung, Arten und Herstellung	19
3.5.2	Normungssituation	22
3.5.3	Brech- und Abbindevorgang	23
3.5.4	Untersuchung des Brechverhaltens	24
3.6	Wiederverwertungsmöglichkeiten pechhaltiger Ausbaustoffe	26
3.6.1	Grundlagen	26
3.6.2	Kaltrecycling mit Bitumenemulsion	28
3.6.3	Kaltrecycling mit hydraulischen Bindemitteln	35
3.6.4	Kaltrecycling mit hydraulischen Bindemitteln und Bitumenemulsion	37
3.6.5	Kaltrecycling mit Schaumbitumen	40
4	Untersuchungsprogramm	41
4.1	Untersuchungsprogramm	41
4.1.1	Erweiterte Untersuchungen zum Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen	41
4.1.2	Modellversuche zur PAK-immobilisierenden Wirkung von Bitumenemulsionen	41

4.1.3	Untersuchungen an den bautechnisch nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen	42
4.1.4	Untersuchungen an den bautechnisch aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen	43
4.1.5	PAK- und Phenolanalytik	44
4.2	Untersuchte Bitumenemulsionen	44
4.3	Untersuchte pechhaltige Straßenausbaustoffe	45
5	Untersuchungen zum Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen	47
5.1	Vorbemerkungen	47
5.2	Versuchsprinzip	47
5.3	Einflussgrößen	48
5.4	Prüftechnik und Versuchsaufbau	48
5.5	Prüfbedingungen	50
5.6	Versuchssystematik und -durchführung	50
5.6.1	Vorversuche mit Wasser und Quarzmehl	51
5.6.2	Hauptversuche mit Bitumenemulsion und Quarzmehl	52
5.7	Versuchsauswertung und -ergebnisse	53
5.7.1	Vorversuche mit Wasser und Quarzmehl	53
5.7.2	Hauptversuche mit Bitumenemulsion und Quarzmehl	55
5.8	Praktische Bedeutung und Umsetzung der Ergebnisse	63
5.9	Zusammenfassung und Ausblick	64
6	Modellversuche zur PAK-Immobilisierung durch Bitumenemulsionen	67
6.1	Voraussetzungen	67
6.2	Zusammensetzung und Herstellung pechhaltigen Labormischgutes	68
6.3	Zusammensetzung und Herstellung des Emulsionsmischgutes	70
6.3.1	Festlegung der Bitumenzugabemengen	70
6.3.2	Herstellung des Emulsionsmischgutes	73
6.4	Untersuchte Größen und Analyseverfahren	74
6.5	Versuchsergebnisse und -auswertung	74
6.6	Zusammenfassung und Ausblick	78
7	Untersuchungen an den nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen	81
7.1	Vorbereitung der Ausbaustoffe	81
7.2	Eigenschaften der pechhaltigen Ausbaustoffe im Ausgangszustand	81
7.2.1	Visuelle und organoleptische Beurteilung	81
7.2.2	Stück- und Korngrößenverteilungen	84
7.2.3	Bindemittelgehalte, optimale Wassergehalte sowie PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Trogeluaten	84
7.3	Eignungsprüfungen anhand von Emulsion Nr. 1	89
7.3.1	Mischgut- und Probekörperherstellung, Probenlagerung	89

7.3.2	Probenbezeichnung	91
7.3.3	Geprüfte Eigenschaften, Ergebnisse, Auswahl der Bitumenzugabemengen	91
7.4	Vergleichende Untersuchungen mit allen Emulsionen	95
7.4.1	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte	95
7.4.2	PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluatn	100
7.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die weiteren Untersuchungen	106
8	Untersuchungen an den aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen	109
8.1	Voraussetzungen und Zielstellung	109
8.2	Aufbereitung und Zusammensetzung der pechhaltigen Ausbaustoffe . .	110
8.3	Eigenschaften der aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe	110
8.4	Mischgut- und Probekörperherstellung, Probenlagerung	114
8.5	Probenbezeichnung	115
8.6	Versuchsdurchführung	115
8.7	Untersuchungsergebnisse	115
8.7.1	Ausbaustoff So	115
8.7.2	Ausbaustoff Bo	120
8.7.3	Ausbaustoff To	123
8.7.4	Gemeinsame Ergebnisse der bautechnisch optimierten Ausbaustoffe	126
8.7.5	Vorschlag für erweiterte Eignungsprüfungen an Kaltrecyclingmischgut mit Bitumenemulsion	128
9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	131
10	Ausblick	137
	Quellenverzeichnis	139
	Stichwortverzeichnis	147
A	Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Bitumenemulsionen	151
B	Brechverhalten der kationischen Bitumenemulsionen	159
C	Mischgutrezepturen	165
D	Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen	173
E	Ergebnisse der PAK- und Phenolanalysen	187

Abbildungsverzeichnis

3.1	Chemische Struktur der PAK	7
3.2	Chemische Struktur der Phenole	12
3.3	Straßenpechabsatz in Deutschland von 1924 bis 1974	15
3.4	Emulgatorhülle einer unstabilen, kationischen Bitumenemulsion	21
3.5	Mikroskopische Aufnahme einer Bitumenemulsion	22
3.6	Brechvorgang einer kationischen Bitumenemulsion	23
3.7	Wirkung unterschiedlicher Verdichtungsverfahren für Emulsionsmischgut	32
3.8	Bruchflächen eines Bohrkerns aus Komplexrecyclingmischgut	37
5.1	Versuchsaufbau zur Untersuchung des Brechverhaltens kationischer Bitumenemulsionen	49
5.2	Zur Untersuchung des Brechverhaltens geeignetes Messpaddel	51
5.3	Verlauf des Drehmomentes bei der Zugabe des Quarzmehls zu Wasser . .	53
5.4	Brechverhalten der acht kationischen Bitumenemulsionen, linear	55
5.5	Brechverhalten der acht kationischen Bitumenemulsionen, logarithmisch .	57
5.6	Brechverhalten der Emulsion Nr. 1	58
5.7	Brechverhalten der Emulsion Nr. 2	60
5.8	Zusammenhang zwischen Parameter c und dem Quarzmehlanspruch QMA	62
6.1	Zweifach mit pechhaltiger Emulsion umhüllte Prüfkörnung	69
6.2	Relative PAK-Konzentrationen in den Eluaten des umhüllten pechhal- tigen Labormischgutes in Abhängigkeit der Bitumenzugaben bzw. der ideellen Schichtdicken der Bitumenfilme	75
7.1	Teilprobe des Granulates S im Ausgangszustand	82
7.2	Teilprobe des Granulates B im Ausgangszustand	82
7.3	Teilprobe des Granulates C im Ausgangszustand	83
7.4	Teilprobe des Teersandes im Ausgangszustand	83
7.5	Stück- und Korngrößenverteilung des Granulates S im Ausgangszustand .	85
7.6	Stück- und Korngrößenverteilung des Granulates B im Ausgangszustand .	85
7.7	Stück- und Korngrößenverteilung des Granulates C im Ausgangszustand .	86
7.8	Stück- und Korngrößenverteilung des Teersandes T im Ausgangszustand .	86
7.9	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff S hergestellten Probekörper	97
7.10	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff B hergestellten Probekörper	97

7.11	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff C hergestellten Probekörper	98
7.12	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff T hergestellten Probekörper	98
7.13	PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff S	101
7.14	PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff B	101
7.15	PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff C	102
7.16	PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff T	102
7.17	Phenolindizes in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff B	105
8.1	Stückgrößenverteilungen der optimierten Ausbaustoffe So und Bo	111
8.2	Stückgrößenverteilung des optimierten Ausbaustoffes To	111
8.3	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff So hergestellten Probekörper	117
8.4	PAK-Konzentrationen in den Eluaten der aus dem Ausbaustoff So hergestellten Probekörper	117
8.5	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausgangsstoff Bo hergestellten Probekörper	121
8.6	PAK-Konzentrationen in den Eluaten der aus dem Ausbaustoff Bo hergestellten Probekörper	121
8.7	Phenolindizes in den Eluaten der aus dem Ausbaustoff Bo hergestellten Marshall-Probekörper	122
8.8	Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausgangsstoff To hergestellten Probekörper	124
8.9	PAK-Konzentrationen in den Eluaten der aus dem Ausbaustoff To hergestellten Probekörper	124
B.1	Brechverhalten der Emulsion Nr. 1	160
B.2	Brechverhalten der Emulsion Nr. 2	160
B.3	Brechverhalten der Emulsion Nr. 3	161
B.4	Brechverhalten der Emulsion Nr. 4	161
B.5	Brechverhalten der Emulsion Nr. 5	162
B.6	Brechverhalten der Emulsion Nr. 6	162
B.7	Brechverhalten der Emulsion Nr. 7	163
B.8	Brechverhalten der Emulsion Nr. 10	163

Tabellenverzeichnis

3.1	PAK- und Phenol-Gehalte bituminöser Bindemittel	6
3.2	Struktur und Wasserlöslichkeit der PAK sowie deren Einstufung in der Liste gefährlicher Stoffe nach RL 67/548/EWG	9
3.3	Struktur und Wasserlöslichkeit der Phenole sowie deren Einstufung in der Liste gefährlicher Stoffe nach RL 67/548/EWG	13
3.4	Verfahren zur Prüfung von Straßenausbaumaterial auf teerstämmige Bindemittel	18
3.5	Zuordnung der Verwertungsklassen und -verfahren für bituminös gebundene Straßenausbaustoffe	27
3.6	Grenzwerte für die Elution von Probekörpern aus gebundenen Ausbaustoffen der Verwertungsklassen B und C	27
3.7	Ergebnisse von Marshall-Versuchen bei 60 °C an Probekörpern aus Emulsionsmischgut	34
3.8	Beispiel für Ergebnisse von Elutionsversuchen an emulsionsgebundenen pechhaltigen Materialien	36
4.1	Untersuchte Bitumenemulsionen	45
4.2	Untersuchte pechhaltige Ausbaustoffe	46
5.1	Brechverhalten der acht untersuchten kationischen Bitumenemulsionen	61
6.1	Berechnung des mittleren Einzelkornvolumens aus Trockenmasse und Rohdichte von sechs Proben des pechhaltigen Labormischgutes	72
6.2	Ideelle Schichtdicken in Abhängigkeit der Bitumenzugabemenge	72
6.3	Relativer Analysefehler der GC/MS in Prozent	77
7.1	Bindemittelgehalte, optimale Wassergehalte, Trockenraumdichten sowie PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Trogeluaten der nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe	87
7.2	Zusammensetzungen der 12 Mischgutvarianten der Eignungsprüfungen	90
7.3	Ergebnisse der Eignungsprüfungen mit Emulsion Nr. 1	92
7.4	In den Eignungsprüfungen ausgewählte Bitumenzugabemengen	95
8.1	Massenanteile der einzelnen Kornfraktionen zur Zusammensetzung der aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe So, Bo und To	112
8.2	Eigenschaften der aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe	113

8.3	Bitumenzugabemengen und rechnerische Gesamtbindemittelgehalte der Mischgutvarianten der aufbereiteten Ausbaustoffe	114
8.4	Bewertung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften aller Mischungen mit dem Ausbaustoff So	119
8.5	Bewertung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften aller Mischungen mit dem Ausbaustoff Bo	123
8.6	Bewertung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften aller Mischungen mit dem Ausbaustoff To	126
A.1	Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Emulsionen Nr. 1, 4 und 7	152
A.2	Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Emulsionen Nr. 2 und 8	153
A.3	Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Emulsionen Nr. 3 und 9	154
A.4	Ergebnisse der Eingangskontrollen an der Emulsion Nr. 5	155
A.5	Ergebnisse der Eingangskontrollen an der Emulsion Nr. 6	156
A.6	Ergebnisse der Eingangskontrollen an der Emulsion Nr. 10	157
C.1	Zur Umhüllung des pechhaltigen Labormischgutes mit Bitumenemulsion verwendete Rezepturen	166
C.2	Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff S	167
C.3	Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff B	168
C.4	Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff C	169
C.5	Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff T	170
C.6	Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit den bautechnisch aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen So, Bo und To	171
D.1	Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes S	174
D.2	Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes B	174
D.3	Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes C	175
D.4	Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes T	175
D.5	Ergebnisse der Proctor-Versuche an den pechhaltigen Ausbaustoffen	176
D.6	Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff S	177
D.7	Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff B	177
D.8	Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff C	178
D.9	Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff T	178
D.10	Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus den Ausbaustoffen So, Bo und To	179
D.11	Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes S	180
D.12	Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes B	180

D.13	Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes C	181
D.14	Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes T	181
D.15	Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes S	182
D.16	Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes B	182
D.17	Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes C	183
D.18	Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes T	183
D.19	Marshall-Stabilitäten der Probekörper der Ausbaustoffe So, Bo und To . . .	184
D.20	Marshall-Fließwerte der Probekörper der Ausbaustoffe So, Bo und To . . .	185
E.1	PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes S	188
E.2	PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes B	189
E.3	PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes C	190
E.4	PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes T	191
E.5	PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes So	192
E.6	PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes Bo	193
E.7	PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes To	194
E.8	Gesamtgehalt an PAK im Feststoff der Ausbaustoffe So, Bo und To	195
E.9	PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgut- varianten und Probekörper des Ausbaustoffes S	196
E.10	PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgut- varianten und Probekörper des Ausbaustoffes B	197
E.11	PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgut- varianten und Probekörper des Ausbaustoffes C	198
E.12	PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgut- varianten und Probekörper des Ausbaustoffes T	199
E.13	PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Probekör- per der Ausbaustoffe So, Bo und To	200
E.14	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 1	201
E.15	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 2	202
E.16	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 3	203
E.17	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 4	204
E.18	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 5	205
E.19	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 6	206
E.20	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 7	207

Tabellenverzeichnis

E.21	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 9	208
E.22	PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 10	209

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Variablen, griechisch

ρ_B	Rohdichte von Bitumen [g/cm ³]
ρ_R	Rohdichte [g/cm ³]
$\rho_{A,T}$	Raumdichte, bestimmt nach DIN 1996-7 [1] [g/cm ³]
ρ_{Pr}	Trockenraumdichte nach Proctor, bestimmt nach DIN 18127 [2] [g/cm ³]
$\rho_{R,bit}$	Mischgutrohndichte, bestimmt nach DIN 1996-7 [1] [g/cm ³]
σ	Standardabweichung
ΣPAK_F	Gesamtgehalt an PAK nach EPA-Standard 610 [3] im Feststoff, bestimmt mittels GC/MS nach FGSV-Arbeitspapier Nr. 27/3 [4] [mg/kg]

Variablen, lateinisch

B_E	Bindemittelgehalt einer Bitumenemulsion [M.-%]
B_{MG}	Rechnerischer Gesamtbindemittelgehalt eines Emulsionsmischgutes
B_P	Bindemittelgehalt (Pech) eines Ausbaustoffes [M.-%]
B_Z	Menge des zugegebenen Bindemittels [M.-%]
$BP_{Fraa\beta}$	Brechpunkt nach Fraaß, bestimmt nach DIN 52012 [°C]
E_{stat}	Statischer Elastizitätsmodul, bestimmt im Spaltzugversuch
E_Z	Emulsionszugabe [M.-%] oder [g]
EP_{RuK}	Erweichungspunkt Ring und Kugel, bestimmt nach DIN 52011 [°C]
FW_{14L}	Marshall-Fließwert, bestimmt nach DIN 1996-11 [5], nach 14 Tagen Lagerung an der Luft [kN]
FW_{7L7W}	Marshall-Fließwert, bestimmt nach DIN 1996-11 [5], nach 7 Tagen Lagerung an der Luft und 7 Tagen Lagerung unter Wasser [kN]

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

H_{bit}	Hohlraumgehalt, bestimmt nach DIN 1996-7 [1] [Vol.-%]
MS_{14L}	Marshall-Stabilität, bestimmt nach DIN 1996-11 [5], nach 14 Tagen Lagerung an der Luft [kN]
$MS_{7L7Wrel}$	MS_{7L7W} bezogen auf MS_{14L} [%]
MS_{7L7W}	Marshall-Stabilität, bestimmt nach DIN 1996-11 [5], nach 7 Tagen Lagerung an der Luft und 7 Tagen Lagerung unter Wasser [kN]
PAK_{T24}	PAK-Konzentration, bestimmt mittels GC/MS nach FGSV=Arbeitspapier Nr. 27/3 [4] im Trogeluat nach TP Min-StB Teil 7.1.2 [6] [$\mu\text{g/l}$]
PI_{T24}	Phenolindex, bestimmt nach DIN 38409-16 [7] im Trogeluat nach TP Min-StB Teil 7.1.2 [6]) [mg/l]
QMA	Quarzmehlanspruch, bestimmt nach DIN 52047-1 [8] [g]
$relMS_{14L}$	MS_{14L} eines Probekörpers, bezogen auf den Mittelwert MS_{14L} einer Probenserie [%]
$relMS_{7L7W}$	MS_{7L7W} eines Probekörpers, bezogen auf den Mittelwert MS_{7L7W} einer Probenserie [%]
$relPAK_{T24}$	PAK_{T24} eines Probekörpers, bezogen auf den Mittelwert PAK_{T24} einer Probenserie [%]
$relPI_{T24}$	PI_{T24} eines Probekörpers, bezogen auf den Mittelwert PI_{T24} einer Probenserie [%]
R	Spannweite der Einzelwerte von Stichproben
S_{w25}	Löslichkeit in Wasser bei 25 °C [g/l]
s	Standardabweichung von Stichprobe
t_A	Ausflusszeit einer Bitumenemulsion, bestimmt nach DIN 52023-1 [s]
V_{Kr}	rechnerisch bestimmtes Volumen eines Einzelkorns [cm^3]
V_K	experimentell bestimmtes Volumen eines Einzelkorns [cm^3]
V_u	Volumen eines mit Bitumen umhüllten Einzelkorns [cm^3]
w_a	Abzug von w_{Pr} [M.-%]
w_{eigen}	Eigenfeuchte eines Ausbaustoffes [M.-%]
w_E	Wassergehalt einer Bitumenemulsion nach DIN 52048 [9] [M.-%]

w_{Pr}	Optimaler Wassergehalt nach DIN 18127 [2] [M.-%]
W_Z	Zugabemenge an Wasser [M.-%]
x_i	Ideelle Schichtdicke, die durch Umhüllung eines Einzelkorns mit Bitumen erzeugt wurde [mm]

Abkürzungen

AM	Ausgangsmaterial
ATS	Asphalttragschicht
B	Braunkohlenteerpechhaltiger Ausbaustoff im Ausgangszustand
BAT	Biologische Arbeitsplatztoleranzwerte
Bo	pechhaltiger Ausbaustoff mit steinkohlestämmigem Pech, bautechnisch aufbereitet (optimierte Stückgrößenverteilung)
C	Carbositumenhaltiger Ausbaustoff im Ausgangszustand
CAS	Chemical Abstracts Service
DEV	Deutsches Einheitsverfahren
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
Em	Emulsion
EPA	Environment Protection Agency
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GC/MS	Gaschromatographie mit Massenspektroskopie
HGT	Hydraulisch gebundene Tragschicht
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
i.O.	in Ordnung
KGV	Korngrößenverteilung
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MG	Mischgut(probe)
MS	Marshall-Stabilität [kN]

M VB-K	Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen [10]
PAK	Polyzyklische(r) aromatische(r) Kohlenwasserstoff(e)
phABS	pechhaltige(r) Ausbaustoff(e)
phLMG	pechhaltiges Labormischgut
PK	Probekörper
PmB	Polymermodifizierte(s) Bitumen
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen [11]
RuVA-StB	Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau [12]
S	Steinkohlenteerpechhaltiger Ausbaustoff im Ausgangszustand
SGV	Stückgrößenverteilung
So	pechhaltiger Ausbaustoff mit steinkohlestämmigem Pech, bautechnisch aufbereitet (optimierte Stückgrößenverteilung)
T	Teersand, steinkohlenteerpechhaltiger Ausbaustoff
TL PmB	Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen [13]
TL PmOB	Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bindemittel für Oberflächenbehandlungen (mit bitumenhaltigen Bindemitteln) [14]
To	pechhaltiger Ausbaustoff in Form von Teersand mit steinkohlestämmigem Pech, bautechnisch aufbereitet (optimierte Stückgrößenverteilung)
TP Min-StB	Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
ZTV T-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau [15]

1 Einleitung

Bis in die siebziger Jahre hinein wurden ca. zwei Drittel der gesamten Steinkohlenteerpechproduktion der Bundesrepublik Deutschland als Bindemittel im Straßenbau eingesetzt. Bevor man zu Beginn der 1980-er Jahre gänzlich auf Straßenpech verzichtete, wurden außerdem Gemische aus Straßenpech und Bitumen als Bindemittel eingesetzt [16]. Pech enthält hohe Konzentrationen an karzinogenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (*PAK*) und Phenolen. Bitumen ist aufgrund anderer Ausgangsstoffe und Herstellungsverfahren in dieser Hinsicht unbedenklich. Wegen der leichten Eluierbarkeit dieser Stoffe ist die Verwendung von Pech und pechhaltigen Stoffen im Straßenbau oder deren Ablagerung auf Bauschuttdeponien heutzutage verboten.

Allein in Bayern fallen jährlich geschätzte 160.000 t pechhaltigen Straßenaufbruchs an [16]. Aus bautechnischer Sicht ist er ein hochwertiger Straßenbaustoff, der sich für eine Wiederverwertung eignet. Daher stellt er im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes im Allgemeinen »Abfall zur Verwertung« dar. Die schadlose Verwertung hat grundsätzlich Vorrang vor der Beseitigung [17].

Die Heißverarbeitung pechhaltiger Ausbaustoffe in der konventionellen Asphaltproduktion ist aus arbeits- und immissionsschutzrechtlichen Gründen nicht zulässig [16]. Daher wurden verschiedene Kaltrecyclingverfahren entwickelt, mit denen die Schadstoffe immobilisiert und die pechhaltigen Materialien einer sicheren Wiederverwertung zugeführt werden sollen. Als besonders vorteilhaft gilt hierbei das Kaltrecyclingverfahren mit Bitumenemulsionen. Den Bitumenemulsionen wird in der Fachwelt die Fähigkeit zugesprochen, pechhaltige Stoffe gegenüber wässrigen Medien abschirmen zu können und auf diesem Wege die darin enthaltenen *PAK* und Phenole besonders sicher einzuschließen. Dies gilt oft als Sicherheitsvorteil gegenüber anderen Bauweisen.

2 Zielstellung

Obwohl Kaltrecyclingverfahren mit Bitumenemulsionen bereits seit längerem in der Anwendung sind, fehlen bislang systematische Untersuchungen zur damit erreichbaren Verringerung des Schadstoffaustrags sowie zu den erzielbaren bautechnischen Eigenschaften der Gemische. Ebenso fehlt der Nachweis einer eigenständigen PAK-immobilisierenden Wirkung von Bitumenemulsionen unter konstanten und reproduzierbaren Bedingungen. Der Erfolg einer Kaltrecyclingmaßnahme mit Bitumenemulsion hängt zu einem großen Teil aber auch von den Verarbeitungseigenschaften des Emulsionsmischgutes ab. Dies setzt wiederum die genaue Kenntnis und Abstimmung des Brechverhaltens der verwendeten Bitumenemulsion voraus. In der vorliegenden Arbeit soll daher den folgenden Fragestellungen nachgegangen werden:

- Wie unterscheidet sich das Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen für Recyclingzwecke? Lassen sich charakteristische Größen zum Brechverhalten finden, welche die gezielte Auswahl einer Bitumenemulsion ermöglichen?
- Sind Bitumenemulsionen tatsächlich in der Lage, den Austrag von PAK aus der pechhaltigen in die wässrige Phase durch bloße Umhüllung des Peches zu verringern?
- Können ggf. unterschiedliche Immobilisierungsraten nachgewiesen oder Zusammenhänge mit kompositionellen Merkmalen der Bitumenemulsionen gefunden werden?
- Welche bautechnischen Eigenschaften ergeben sich durch die Verwendung unterschiedlicher Bitumenemulsionen bei der Wiederverwertung realer pechhaltiger Straßenausbaustoffe?
- Lohnt eine bautechnische Optimierung der Ausbaustoffe? Welche bautechnischen Anforderungen nach ZTV T-StB [15] kann das Emulsionsmischgut dann erfüllen?
- Werden bei den beiden letztgenannten Aspekten die Anforderungen an die PAK- und Phenoleinbindung nach RuVA-StB [12] eingehalten? Gibt es ggf. Unterschiede zwischen einzelnen Bitumenemulsionen?

Die Beantwortung dieser Fragen erleichtert die Aufnahme der Kaltrecyclingbauweise mit Bitumenemulsion in die Regelbauweisen nach den RStO [11]. Dadurch könnte die Wiederverwertungsquote von pechhaltigen Ausbaustoffen deutlich erhöht werden, was Deponiekapazitäten schont und einen hochwertigen Straßenbaustoff im Wertstoffkreislauf hält. Ein Downcycling zu einem qualitativ minderwertigeren Baustoff wird ebenfalls verhindert.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Teer, Pech und Bitumen – Herstellung und Abgrenzung

Teer wird im Wesentlichen bei der Verkokung von Stein- bzw. Braunkohle erhalten und bildet für die chemische Industrie einen wichtigen Rohstoff. Während der Verkokung entweichen bei ca. 300 °C die eingeschlossenen Wasser- und Gasmengen. Zwischen 300 °C und 500 °C bilden sich Schwelteer und Schwelgas, die anschließend bei Temperaturen von 800 bis 1200 °C durch Pyrolyse zu Hochtemperaturteer und -gas umgewandelt werden. Während der Pyrolyse laufen vielfältige chemische Reaktionen wie Dealkylierung, Dehydrierung, Reduktion und Ringkondensation ab. Mit steigender Temperatur bilden sich zunehmend höhermolekulare Verbindungen. Beim Steinkohlenteer sind dies vorrangig Aromaten wie Benzol, Anthracen und Naphthalin. Braunkohlenteer enthält demgegenüber mehr aliphatische Verbindungen, darunter Paraffine und Olefine, sowie niedermolekulare Aromaten, insbesondere Phenole.

Pech entsteht bei der fraktionierten Destillation von Teer. Neben dem Teeröl verbleibt als schwerster Destillationsrückstand das Teerpech, welches einen Anteil von 50 bis 80 % des Teers ausmacht. Von den ursprünglichen etwa 10.000 Teerinhaltsstoffen sind ca. 9.500 im Pech enthalten. Dies sind insbesondere mehrkernige Aromaten, Heteroaromaten sowie Benzol und dessen Derivate. Durch eine anschließende Aufbereitung des Teerpeches entsteht das Straßenteerspezialpech, welches früher im Straßenbau als Bindemittel eingesetzt wurde.

Bitumen entsteht bei der Erdölraffination als Rückstand bei der Vakuumdestillation. Seine Herstellung erfolgt im Wesentlichen auf physikalischem Wege. Da bei der Erdölraffination keine Pyrolyse erfolgt, unterbleiben die chemischen Reaktionen, die beim Teer zur Bildung aromatischer Verbindungen führen, weitestgehend. Der Gehalt des Bitumens an Aromaten ist daher signifikant niedriger als beim Teer oder Pech.

Pech, pechhaltige Bindemittel und Bitumen werden unter dem Begriff *bituminöse Bindemittel* zusammengefasst [18].

Allgemein gültige Angaben zu PAK- und Phenolgehalten von Teer, Pech oder Bitumen lassen sich nicht machen, da diese auf Grund unterschiedlicher Ausgangsstoffe und Herkunft stark schwanken können. In Tabelle 3.1 sind die PAK- und Phenolgehalte einiger früher handelsüblicher teerstämmiger Produkte den durchschnittlichen PAK-Gehalten verschiedener Bitumensorten¹ gegenübergestellt. Der PAK-Gehalt von Bitumen liegt demnach mindestens 3 bis 4 Zehnerpotenzen unter dem der teerstämmigen Produkte. Phenolgehalte von Bitumen sind in der gesichteten Literatur nicht dokumentiert. Auf-

¹Bitumensorten nach DIN 1995 Teil 1 [19]

Tabelle 3.1: PAK- und Phenol-Gehalte bituminöser Bindemittel [22, 23]

Bindemittel	PAK-Gehalt (EPA) [mg/kg]	Phenolgehalt [mg/kg]
Rohteer	164.739	129.050
Pechbitumen	44.628	118.000
T 40/70	190.170	32.985
Braunkohlenstraßenteer	23.778	145.360
Braunkohlenschwelteer	102.795	88.000
PVC-Teer	59.649	170.600
TV 49/51	60.152	141.360
Bitumen 45	24,92	—
Bitumen 80	21,35	—
Bitumen 200	27,01	—

grund des wesentlich geringeren Gesamtgehaltes an Aromaten ist beim Bitumen jedoch von extrem niedrigen Phenolgehalten auszugehen. Die hohen Phenol- und PAK-Gehalte in Teer- und Pechprodukten führten zu einem Verbot teerpechhaltiger Bindemittel im Straßenbau und zu einer Substitution durch Bitumen. Das Steinkohlenteerpech ist in der MAK- und BAT-Werte-Liste der DFG als karzinogener Stoff der Kategorie 1 in Abschnitt III aufgeführt² [20]. Teere, Peche und pechhaltige Bindemittel dürfen nach den TRGS 551 [21] im Straßenbau nicht mehr als Neubindemittel verwendet werden.

3.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Als gesichert nachgewiesen gelten 358 polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Sie kommen nicht nur in teerstämmigen Stoffen und Materialien vor, sondern werden bei jedem unvollständigen Verbrennungsprozess organischer Substanz freigesetzt und sind ubiquitär in der Umwelt vorhanden [24]. Nachweisbar sind PAK unter anderem in Hausbrand- und Autoabgasen, Tabakrauch sowie allgemein in der Luft, im Wasser, im Boden und in Pflanzen. Für den Nachweis von PAK werden heutzutage im Allgemeinen 16 Einzelsubstanzen herangezogen, welche die *U.S. Environment Protection Agency* (EPA) zu diesem Zweck ausgewählt hat [25]. Diese PAK gehören zu den am häufigsten in Steinkohleteeren vorkommenden Substanzen und bilden hinsichtlich ihrer physikalisch-chemischen Kenndaten einen Querschnitt durch die gesamte Stoffgruppe [24]. Im Folgenden bezieht sich das Akronym »PAK« auf die 16 PAK nach EPA-Standard 610 [3].

²Die Kategorie 1 umfasst »Stoffe, die beim Menschen Krebs erzeugen und bei denen davon auszugehen ist, dass sie einen nennenswerten Beitrag zum Krebsrisiko leisten«.

3.2.1 Chemische Struktur

Die PAK sind durch eine Molekülstruktur gekennzeichnet, die mehrere ortho- bzw. peri-annelierte aromatische Ringsysteme aufweist. Bei linearer Anordnung der Ringe handelt es sich um Acene, bei angularer Ringanordnung um Phene [26]. Im engeren Sinne bestehen die PAK lediglich aus Kohlenstoff und Wasserstoff; das entscheidende Strukturmerkmal sind die mindestens zwei fünf- oder sechsgliedrigen Ringe sp^2 -hybridisierten Kohlenstoffes [27]. Bei einigen PAK, wie z. B. Acenaphthen und Fluoren, können an den Benzolringen zusätzlich CH_2 -Gruppen angelagert sein. Abbildung 3.1 stellt die Strukturformeln der PAK dar.

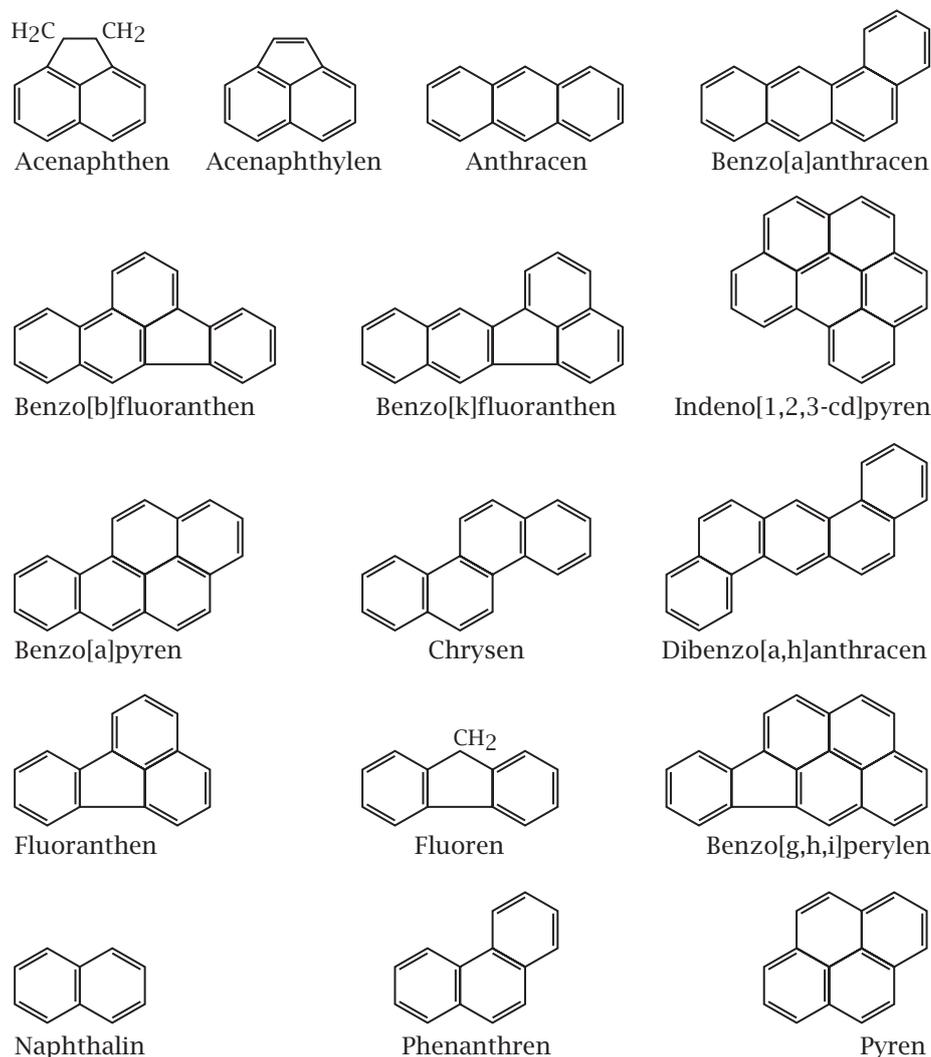


Abbildung 3.1: Chemische Struktur der PAK

3.2.2 Umwelt- und gesundheitsrelevante Auswirkungen

Bereits Ende des 18. Jahrhunderts wurde eine karzinogene Wirkung der PAK vermutet, was jedoch erst 1895 durch die Identifikation des Benzo(a)pyrens als karzinogene Substanz bestätigt wurde. Die karzinogene Wirkung der PAK geht auf ihre gute Bioakkumulation im Organismus zurück. Nach der Aufnahme reichern sie sich im Fettgewebe an und wirken als Prokarzinogene, indem sie bleibende Veränderungen der DNA hervorrufen [26]. Mit Ausnahme des Naphthalins konnte bei den 2- und 3-Ring-PAK bislang keine karzinogene Wirkung nachgewiesen werden, allerdings gelten sie als ökotoxikologisch bedenklich, da sie eine hohe Fischtoxizität zeigen. Die geringere Toxizität der höherkondensierten PAK wird auf deren wesentlich geringere Wasserlöslichkeit zurückgeführt [28].

Tabelle 3.2 enthält neben den Angaben zur Struktur und Wasserlöslichkeit der PAK auch die Kategorien, in die sie nach [29] bezüglich ihrer umwelt- und gesundheitsrelevanten Wirkungen auf den Menschen eingestuft sind.³ Diese Übersicht zeigt, dass bislang keiner der 16 PAK eindeutig als menschliches Karzinogen identifiziert wurde, jedoch sollten mit Ausnahme des Pyrens die PAK mit 4-5 Ringen als karzinogen angesehen werden; bei Naphthalin besteht zumindest der Verdacht auf karzinogene Wirkung beim Menschen. Vermutlich mutagen wirken Chrysen und Benzo(a)pyren, letzteres sollte zudem als beeinträchtigend für die Fortpflanzungsfähigkeit des Menschen angesehen werden. Im Gegensatz zu den Angaben in [28] werden in [29] die 2- und 3-Ring-PAK bis auf das Naphthalin nicht als umweltgefährdend eingestuft, mit Ausnahme des Pyrens dafür jedoch die 4- und 5-Ring-PAK.

Trotz der teilweise widersprüchlichen Einstufung der PAK in Bezug auf ihre Gefährlichkeit, machen diese Betrachtungen deutlich, dass einige Vertreter dieser Stoffgruppe ein sehr hohes Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt in sich bergen, welches zudem über ihre vielzitierte Karzinogenität hinausgeht. Zu diesen Substanzen zählen nach Tabelle 3.2 insbesondere Benzo(a)pyren, Chrysen und Naphthalin, die jeweils drei oder mehr schädliche Wirkungen miteinander kombinieren. Die Tatsache, dass 9 der 16 PAK nach Tabelle 3.2 unschädlich für Mensch oder Umwelt sind, darf nicht darüber

³Mit *Carc. Cat. 2* gekennzeichnete Stoffe sollten für den Menschen als krebserzeugend angesehen werden. Es bestehen hinreichende Anhaltspunkte zu der begründeten Annahme, dass die Exposition eines Menschen gegenüber diesen Stoffen Krebs erzeugen kann. Stoffe der Kategorie *Carc. Cat. 3* geben wegen einer möglichen krebserzeugenden Wirkung beim Menschen Anlass zur Besorgnis. Genügend Informationen für eine befriedigende Beurteilung liegen jedoch nicht vor. In die Kategorie *Muta. Cat. 3* eingeordnete Substanzen geben wegen möglicher erbgutverändernder Wirkung auf den Menschen Anlass zur Besorgnis. Aus geeigneten Mutagenitätsversuchen liegen einige Anhaltspunkte vor, die jedoch nicht ausreichen, um den Stoff in Kategorie 2 einzustufen. Stoffe der Kategorie *Repr. Cat. 2* sollten als beeinträchtigend für die Fortpflanzungsfähigkeit (Fruchtbarkeit) des Menschen angesehen werden. Es bestehen hinreichende Anhaltspunkte zu der begründeten Annahme, dass die Exposition eines Menschen gegenüber diesem Stoff zu einer Beeinträchtigung der Fortpflanzungsfähigkeit führen kann. Der Kategorie *Xn* zugeordnete Substanzen sind gesundheitsschädlich. Substanzen der Kategorie *N* sind umweltgefährlich.

Tabelle 3.2: Struktur und Wasserlöslichkeit der PAK sowie deren Einstufung in der Liste gefährlicher Stoffe nach RL 67/548/EWG [29]

Name	CAS-Nr.	Benzol- ringe	S_{w25} [g/l]	Einstufung nach RL 67/548/EWG
Naphthalin	91-20-3	2	$3,2 \cdot 10^{-2}$	Carc. Cat 3, Xn, N
Acenaphthylen	208-96-8	2,5	$1,6 \cdot 10^{-2}$	—
Acenaphthen	83-32-9	2,5	$3,5 \cdot 10^{-3}$	—
Fluoren	86-73-7	2,5	$2,0 \cdot 10^{-3}$	—
Phenanthren	85-01-8	3	$1,3 \cdot 10^{-3}$	—
Anthracen	120-12-7	3	$7,3 \cdot 10^{-5}$	—
Fluoranthen	206-44-0	3,5	$2,6 \cdot 10^{-4}$	—
Pyren	129-00-0	4	$1,4 \cdot 10^{-4}$	—
Benzo(a)anthracen	56-55-3	4	$1,4 \cdot 10^{-5}$	Carc. Cat 2, N
Chrysen	218-01-9	4	$2,0 \cdot 10^{-6}$	Carc. Cat 2, Muta. Cat. 3, N
Benzo(b)fluoranthen	205-99-2	4,5	$1,2 \cdot 10^{-6}$	Carc. Cat 2, N
Benzo(k)fluoranthen	207-08-9	4,5	$5,5 \cdot 10^{-7}$	Carc. Cat 2, N
Benzo(a)pyren	50-32-8	5	$3,8 \cdot 10^{-6}$	Carc. Cat 2, Muta. Cat. 3, Repr. Cat 2, N
Dibenzo(a,h)anthracen	53-70-3	5	$5,0 \cdot 10^{-7}$	Carc. Cat 2, N
Benzo(ghi)perylen	191-24-2	6	$2,6 \cdot 10^{-7}$	—
Indeno(1,2,3-cd)pyren	193-39-5	5,5	$6,2 \cdot 10^{-5}$	—

hinwegtäuschen, dass diesen Stoffen in anderen Untersuchungen durchaus ein Gefährdungspotenzial zugeschrieben wird. Zum Beispiel bestehen nach [30] Hinweise auf eine mutagene Wirkung von Phenanthren und Fluoranthen. Da PAK in teerstämmigen Stoffen praktisch immer als Gemisch mehrerer Einzelsubstanzen vorliegen, geht von diesen Materialien eine vielfältige und akute Gefährdung für Mensch und Umwelt aus.

3.2.3 Lösungsverhalten und Flüchtigkeit

PAK besitzen – wie die meisten anderen organischen Substanzen – eine sehr geringe Wasserlöslichkeit. Aufgrund dessen sind sie im Boden und Grundwasser nur wenig mobil (Ausnahme: niedermolekulare PAK wie Naphthalin) [31]. Mit steigender Ringzahl sinkt die Löslichkeit der PAK zudem deutlich ab (siehe Tabelle 3.2). Die Wasserlöslichkeiten der 16 Einzelsubstanzen überstreichen dabei einen Bereich von insgesamt 5 Zehnerpotenzen. Eine Gleichverteilung der nieder- und höhermolekularen PAK in der wässrigen Phase ist mit den üblichen, zeitraffenden Elutionsversuchen folglich nicht erreichbar. Die Ergebnisse solcher Elutionsversuche sind somit stark von der Verteilung

der 16 PAK beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass Feststoffanalysen pechhaltiger Stoffe zu anderen Aussagen führen können als Elutionsversuche [32].

Der PAK-Austrag aus teerstämmigem Material erfolgt im Allgemeinen durch Diffusion der PAK aus der organischen Phase in die Wasserphase. Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Austragsrate sind:

- die dem Wasser zugängliche Oberfläche der organischen Phase,
- die Wasserlöslichkeiten und
- die Diffusionskoeffizienten der PAK.

Da Teer bzw. Pech organische Stoffgemische sind, erreichen die darin enthaltenen PAK in der Wasserphase nie die Konzentrationen, die ihren Wasserlöslichkeiten entsprechen, sondern nur von der Teer- bzw. Pechzusammensetzung abhängige Sättigungskonzentrationen. Eine residuale Teerphase stellt wegen der geringen Wasserlöslichkeit der PAK eine lang anhaltende Emissionsquelle dar. Die Austragsraten der PAK hängen stark von der Verteilung der Teerphase ab. Liegt eine kontinuierliche Teerphase (Teerzusammensetzungen) vor, sind die PAK wegen des geringen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses erst nach mehreren Jahren oder Jahrzehnten vollständig eluiert [26].

Sind in der wässrigen Phase Tenside enthalten, erhöhen diese die Austragsraten der PAK. Tenside steigern die Sättigungskonzentrationen der PAK in der wässrigen Phase, was zu einer Verkürzung der Elutionszeiten führt.⁴ Die solubilisierende Wirkung der Tenside geht darauf zurück, dass hydrophobe organische Substanzen wie PAK in die ebenso hydrophoben Kerne der Tensidmizellen aufgenommen werden. Bei PAK mit geringen Wasserlöslichkeiten ist die Wirkung der Tenside stärker als bei besser wasserlöslichen PAK [26]. Die PAK-Solubilisierung mittels Tensideinsatz wird z. B. bei der Sanierung PAK-kontaminierter Böden im Bereich alter Gaswerksstandorte ausgenutzt.

Die Siedepunkte der PAK liegen bei Temperaturen von über 300 °C und zum Teil über 400 °C. Trotzdem sind sie leichtflüchtig, da sie wesentlich höhere Dampfdrücke aufweisen als es ihre Siedepunkte vermuten lassen. Zudem können PAK bei Erwärmung direkt vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen, sie sublimieren. Bei genügend hohen Inhaltskonzentrationen geschieht dies bereits bei Temperaturen unter 100 °C [23, 33]. Naphthalin sublimiert beispielsweise bereits bei Raumtemperatur [34]. Die Dämpfe, die wir als den charakteristischen, aromatischen Teergeruch wahrnehmen, können sich an kälteren Flächen wieder als Kristalle niederschlagen. Bei der Sublimation spielt es keine Rolle, ob die PAK isoliert oder in Stoffgemischen – beispielsweise Bindemitteln – vorliegen. In Teer, Pech oder Bitumen sind die PAK in gelöster Form enthalten, so dass es sich streng genommen beim Entweichen aus diesen Phasen nicht um eine Sublimation handelt. Nach [33] laufen diese Vorgänge jedoch äußerlich gleich ab, so

⁴In [26] wurde die PAK-Solubilisierung durch anionische und nichtionische Tenside untersucht, wobei die höchste Solubilisierung durch nichtionische Tenside erreicht wurde.

dass vereinfachend von einer Sublimation gesprochen werden kann. Durch Erwärmung können PAK also selektiv aus einer Teer- bzw. Pechphase ausgetrieben werden und entweichen in die Umgebungsluft, wo sie in den Dämpfen nachweisbar sind. Dies ist einer der Gründe für das Verbot der Heißaufbereitung pechhaltiger Straßenausbaustoffe.

3.3 Phenole

Phenole und Phenolderivate sind ebenso wie die PAK nicht nur in teerstämmigen Produkten enthalten, sondern kommen als Farb-, Gerb-, Riech-, Geschmacks- und Wachstumsstoffe zahlreich in unserer natürlichen Umwelt vor [35]. Bekannte Vertreter sind z. B. die Tannine, das Lignin, Vanillin und das Cinnamaldehyd, ein Bestandteil der Zimtrinde. Phenolische Verbindungen sind außerdem im Rotwein enthalten, dessen Geschmack durch diese Stoffe maßgeblich bestimmt wird [36]. Auch in der Medizin finden phenolische Verbindungen Verwendung; ein prominentes Beispiel ist die Acetylsalicylsäure [35]. Phenole werden analytisch nach DIN 38409-16 [7] als Summenparameter über den Phenolindex erfasst. Umwelt- und gesundheitsrelevant sind besonders die wasserdampfflüchtigen und durch Wasser eluierbaren Phenole, von denen 15 Verbindungen zur Festlegung des Phenolindex-Grenzwertes herangezogen wurden [37]. Der Begriff »Phenole« bezieht sich in der vorliegenden Arbeit auf diese nachfolgend erläuterten 15 Verbindungen.

3.3.1 Chemische Struktur

Phenole sind ein- bis zweikernige aromatische Verbindungen, welche eine oder mehrere Hydroxylgruppen enthalten [36]. Im Gegensatz zu den PAK enthalten sie zusätzlich zu Kohlenstoff und Wasserstoff also auch Sauerstoff. Phenol (Hydroxybenzol) und Naphthol stellen mit jeweils nur einer Hydroxylgruppe die einfachsten Vertreter der ein- bzw. zweikernigen Phenole dar. Sind an einen einzelnen Benzolring zusätzliche ein oder zwei Methylgruppen (CH_3) angelagert, handelt es sich um Methylphenole (Kresole) bzw. Dimethylphenole (Xylenole). Je nach Anordnung der beiden funktionellen Gruppen zueinander kann ortho-, meta- oder para-Kresol vorliegen; bei den Xylenolen werden die Positionen der Methylgruppen durch Nummern relativ zur Hydroxylgruppe angegeben. Ethylphenole enthalten statt einer Methylgruppe eine Ethylgruppe (C_2H_5). Analog zu den Kresolen kann wiederum ortho-, meta- oder para-Ethylphenol vorliegen. Abbildung 3.2 zeigt die Strukturformeln der beschriebenen Phenole.

3.3.2 Umwelt- und gesundheitsrelevante Auswirkungen

Auf den Menschen können einige Phenole toxisch sowie erbgut- und gefäßverändernd wirken, das zentrale Nervensystem angreifen und darüber hinaus Nieren und Lungen schädigen. Es wird ihnen außerdem auch eine karzinogene Wirkung zugeschrieben,

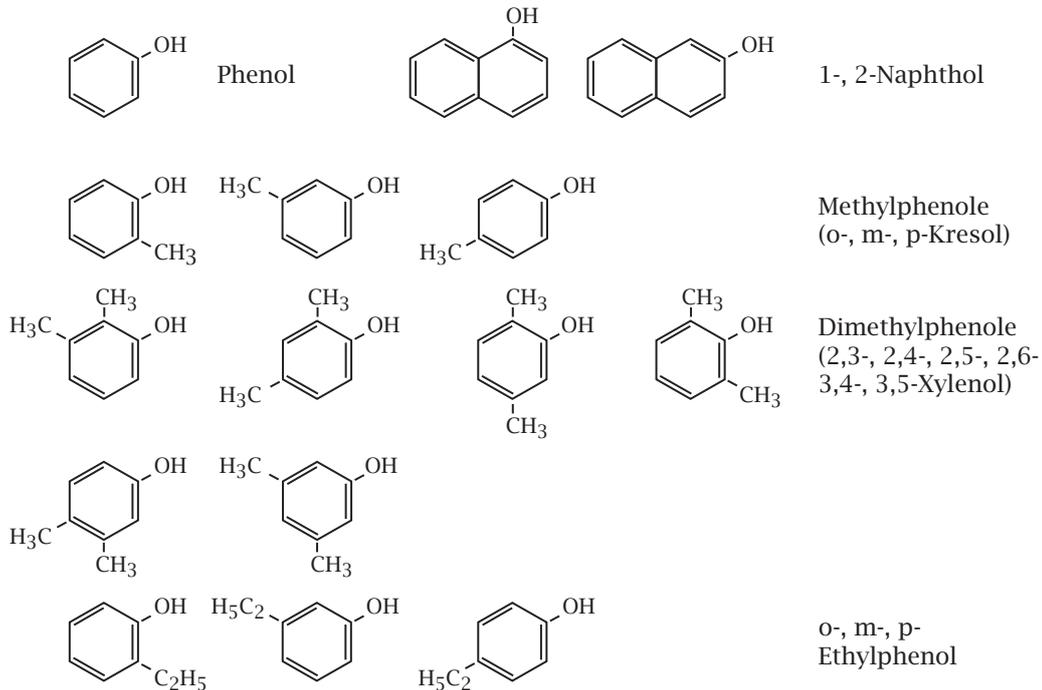


Abbildung 3.2: Chemische Struktur der Phenole

welche jedoch bislang nicht nachgewiesen werden konnte. In Tabelle 3.3 ist neben der Wasserlöslichkeit S_{w25} die Einstufung der Phenole hinsichtlich ihrer umwelt- und gesundheitsrelevanten Auswirkungen nach [29] angegeben.⁵ Danach besteht bei keinem der aufgeführten Phenole Verdacht auf karzinogene Wirkung. Eine nachgewiesene toxische Wirkung auf den Menschen haben das Phenol, die Kresole und die Xylenole. Diese einkernigen Phenole wirken darüber hinaus ätzend. Beim Phenol selbst besteht zudem der Verdacht auf eine mutagene Wirkung beim Menschen. Phenol und Naphthol sind als gesundheitsschädlich eingestuft. Die Xylenole (ausgenommen das 3,5-Xylenol) und das 2-Naphthol gelten als umweltgefährdend. Die Ethylphenole, die in der Liste gefährlicher Stoffe [29] nicht enthalten sind, werden von zahlreichen Herstellern oder Lieferanten zumindest als gesundheitsschädlich (*Xn*) kategorisiert.⁶ Nach Tabelle 3.3 geht das größte

⁵Mit *Muta. Cat. 3* gekennzeichnete Substanzen geben wegen möglicher erbgutverändernder Wirkung auf den Menschen Anlass zu Besorgnis. Aus geeigneten Mutagenitätsversuchen liegen einige Anhaltspunkte vor, die jedoch nicht ausreichen, um den Stoff in Kategorie 2 einzustufen. Mit *T* gekennzeichnete Stoffe haben toxische Wirkung. Mit *Xn* gekennzeichnete Stoffe sind gesundheitsschädlich. Mit *Xi* gekennzeichnete Stoffe wirken reizend. Mit *C* gekennzeichnete Stoffe verursachen Verätzungen. Stoffe der Kategorie *N* sind umweltgefährlich.

⁶Auf die Angabe von Quellen wird an dieser Stelle verzichtet; entsprechende Informationen können bei den Herstellern und Lieferanten online recherchiert werden.

Tabelle 3.3: Struktur und Wasserlöslichkeit der Phenole sowie deren Einstufung in der Liste gefährlicher Stoffe nach RL 67/548/EWG [29]

Name	CAS-Nr.	Benzol- ringe	S_{w25} [g/l]	Einstufung nach RL 67/548/EWG
Phenol	108-95-2	1	84,0	Muta. Cat. 3, Xn, T, C
1-Naphthol	90-15-3	2	0,3	Xn, Xi
2-Naphthol	135-19-3	2	0,74	Xn, N
ortho-Kresol	95-48-7	1	20,0	T, C
meta-Kresol	108-39-4	1	23,5	T, C
para-Kresol	106-44-5	1	20,0	T, C
2,3-Xylenol	526-75-0	1	4,6	T, C, N
2,4-Xylenol	105-67-9	1	6,9	T, C, N
2,5-Xylenol	95-87-4	1	3,5	T, C, N
2,6-Xylenol	576-26-1	1	6,1	T, C, N
3,4-Xylenol	95-65-8	1	4,8	T, C, N
3,5-Xylenol	108-68-9	1	4,9	T, C
ortho-Ethylphenol	90-00-6	1	5,3	—
meta-Ethylphenol	620-17-7	1	11,3	—
para-Ethylphenol	123-07-9	1	4,9	—

Gefahrenpotenzial der insbesondere im Braunkohlenteer enthaltenen Phenole von ihrer Toxizität aus. Die ätzende Wirkung der Phenole ist weniger ausschlaggebend, da der direkte Hautkontakt mit den reinen Substanzen in diesem Fall so gut wie ausgeschlossen ist. Wie auch die PAK liegen die Phenole in teerstämmigen Substanzen immer als Gemisch mehrerer Einzelverbindungen vor, wodurch sich ihre Wirkung potenziert. Deshalb ist davon auszugehen, dass die in teerstämmigen Produkten enthaltenen Phenole eine akute Gefährdung von Mensch und Umwelt darstellen.

3.3.3 Lösungsverhalten und Flüchtigkeit

Wie aus Tabelle 3.3 hervorgeht, übersteigt die Wasserlöslichkeit S_{w25} der Phenole die der PAK bei weitem (vgl. Tabelle 3.2). Das Phenol selbst (Hydroxybenzol) ist sogar verhältnismäßig gut wasserlöslich. Bei Temperaturen oberhalb von 66 °C (kritische Temperatur) ist es vollständig mit Wasser mischbar. Unterhalb von 66 °C liegt eine Mischungslücke; bei 20 °C können sich noch 8,36% bis zur Sättigung im Wasser lösen (siehe Tabelle 3.3, Zeile 1). Das Lösungsverhalten der Kresole und Xylenole ist dem des Phenols sehr ähnlich. Ihre Mischungslücken mit den entsprechenden kritischen Temperaturen sind nur in höhere Temperaturbereiche verschoben. Aufgrund umfangreicher Untersuchungen kann man davon ausgehen, dass alle im Teer bzw. Pech enthaltenen Phenole bei den

vorkommenden Konzentrationen und bei 20 °C so gut wasserlöslich sind, dass sie leicht aus der Teer- bzw. Pechmatrix eluiert werden können [38].

Aufgrund des aromatischen Ringsystems reagieren Phenole in Wasser schwach sauer, wobei Phenol und Phenolat miteinander im Gleichgewicht stehen. Ihr saurer Charakter bedingt darüber hinaus eine gute Wasserlöslichkeit im basischen Milieu. Durch eine Verschiebung des pH-Wertes ist die Löslichkeit der Phenole also leicht beeinflussbar. Bei jedem pH-Wert stellt sich ein Löslichkeitsgleichgewicht ein, welches dem Anteil der Phenolatbildung entspricht. Die Phenolat-Anionen liegen bei pH-Werten über 8,5 vollständig in Wasser gelöst vor. Hinzu kommt, dass die Löslichkeit des Phenols in organischen Medien in dem Maße abnimmt, wie seine Wasserlöslichkeit zunimmt. Eine wirksame Immobilisierung von Phenol bei Wasserzutritt ist daher nur in neutralen und sauren Medien zu erwarten, wenn nicht andere Einflüsse die Eluierbarkeit des Phenols beeinflussen. Im basischen Milieu bilden sich Phenolate (Salze des Phenols). Ihre Wasserlöslichkeit ist unterschiedlich. Alkaliphenolate sind sehr leicht wasserlöslich, Erdalkaliphenolate hingegen weniger gut [38]. Phenolatlösungen können die Löslichkeit der PAK erhöhen, wodurch diese in basischen Umgebungen ebenfalls leichter eluiert werden [23].

Neben der verhältnismäßig guten Wasserlöslichkeit ist Phenol außerdem sehr stark wasserdampflich. Mit Wasserdampf bildet es azeotrope Gemische, so dass es beim Verdampfen aus den meisten Substanzgemischen isoliert werden kann. Diese Eigenschaft wird beispielsweise in der Analytik oder auch großtechnisch bei der Reinigung des Phenols ausgenutzt [39]. Umgekehrt wirkt sie sich sehr negativ aus, wenn phenolhaltiges Material so weit erhitzt wird, dass das darin enthaltene Wasser verdampft. Dies wäre sowohl bei der Heißaufbereitung als auch bei der Überbauung pech- bzw. phenolhaltiger Schichten der Fall. Selbst kleinste Mengen Phenole werden mit dem Kondensat des aus dem Mischgut entweichenden Wasserdampfs angereichert [38]. Neben der Sublimation der PAK (siehe Kapitel 3.2.3) ist dies ein weiterer Grund dafür, dass sich die Heißaufbereitung pechhaltiger Straßenausbaustoffe verbietet.

3.4 Pechhaltige Ausbaustoffe

3.4.1 Aufkommen, Arten und Zusammensetzung

Über den gesamten Zeitraum der Verwendung teerstämmiger Bindemittel⁷ wurden davon große Mengen im Straßenkörper verbaut. Ausgehend von der in Abbildung 3.3 dargestellten Absatzkurve für Straßenpech lässt sich der Gesamtverbrauch im Straßenbau von 1924 bis 1974 auf etwa 6,15 Mio. t abschätzen. Entsprechend den früher geltenden Regelwerken konnten pechhaltige Bindemittel in fast allen Bereichen des Straßenoberbaus verwendet werden, z. B. in:

⁷In den alten Bundesländern wurde Straßenteerspezialpech bis Anfang der Achtziger Jahre verwendet, in den neuen Bundesländern bis 1990.

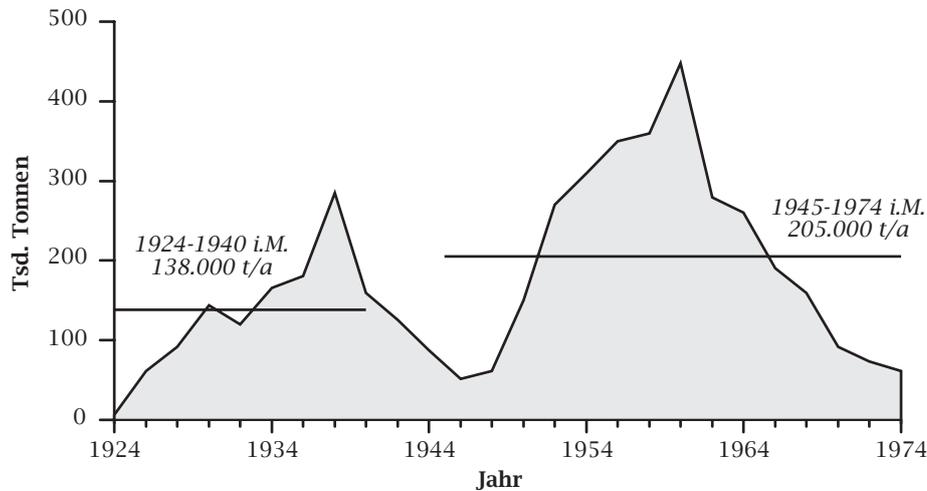


Abbildung 3.3: Straßenpechabsatz in Deutschland von 1924 bis 1974 [41]

- Bodenverfestigungen
- Tragschichten
- Makadam- und Einstreudecken
- Deck- und Binderschichten
- Oberflächenbehandlungen

Bei einem mittleren Bindemittelgehalt von 5 M.-% ergeben sich daraus rund 120 Mio. t pechhaltiger Straßenbaustoffe. Die tatsächliche Menge dürfte wegen der zusätzlichen Verwendung pechhaltiger Bindemittel für Oberflächenbehandlungen und als Anspritzmittel noch weit darüber liegen. Bis zum vollständigen Ersatz des Peches durch Bitumen wurde es zum Teil mit Bitumen verschnitten. Dieses Mischbindemittel wird als Carbobitumen bezeichnet. Da eine homogene Mischung von Pech und Bitumen nur im Verhältnis 3:7 oder 7:3 erfolgen kann, liegen bei Carbobitumen Pechgehalte von mindestens 30 M.-% im Bindemittel vor [40].

Heutzutage kommt pechhaltiges Material hauptsächlich in den unteren Schichten des Straßenoberbaus vor, z. B. als alte Tragschichtlage, da die pechhaltigen Deck- und Binderschichten bereits erneuert wurden. Die verbliebenen pechhaltigen Schichten sind durch wasserundurchlässige Asphaltsschichten überbaut worden. Eine Elution von PAK oder Phenolen aus den pechhaltigen Schichten ist damit weitgehend ausgeschlossen, so dass von ihnen keine Umweltgefährdung ausgeht, solange sie unangetastet bleiben. Werden jedoch Umbau- oder Erneuerungsmaßnahmen am Straßenkörper notwendig, fallen die pechhaltigen Ausbaumaterialien in großen Mengen an.

Pechhaltiges Ausbaumaterial kann in granularer Form (Fräsgut oder Aushub) bzw. in noch zu granulierenden Schollen (Aufbruch) oder auch als Sandkörnung (sog. Teersand) vorliegen. Die Bauweise mit Teersand wurde nur in den alten Bundesländern angewendet, wo dieses Material vor allem in Tragschichten von Bundesautobahnen in Norddeutschland eingebaut wurde. Da in den alten Bundesländern vorwiegend Steinkohlenteerpech als Bindemittel verarbeitet wurde, kommen Teersande nur in steinkohlenteerpechhaltiger Form vor. Pechhaltiger Straßenaufbruch liegt demzufolge in der Regel in einer der folgenden vier Varianten vor:

- steinkohlenteerpechhaltiges Material (Granulat oder Schollen)
- braunkohlenteerpechhaltiges Material (Granulat oder Schollen)
- carbobitumenhaltiges Material (Granulat oder Schollen)
- Teersand (Aushub)

Da die Anforderungen an den Straßenoberbau zu Zeiten der Verwendung pechhaltiger Bindemittel insgesamt geringer waren, wurden aus heutiger Sicht oftmals bautechnisch nicht geeignete Baustoffe oder Bauweisen angewendet. Im untergeordneten Straßennetz fanden beispielsweise Verbreiterungen auch ohne einen ordentlich ausgeführten Straßenoberbau statt. Dabei wurde zum großen Teil bitumenhaltiges Mischgut verwendet, so dass heutzutage pechhaltige und bitumenhaltige Materialien durchaus im gleichen Horizont liegen können [42]. Die nicht selten mangelhafte Dokumentation alter Streckenabschnitte (Lage, Horizont, Dicke der einzelnen Schichten) erschwert die genaue Identifikation pechhaltiger Schichten zusätzlich.

Häufig handelt es sich bei den pechhaltigen Ausbaustoffen um grobkörnigen Aushub in granularer Form mit größeren Zusammenballungen pechhaltigen Bindemittels. Ursache dafür ist die früher oft angewendete Tränkmakadam-Bauweise. Dabei wurde das eingebaute und verdichtete, ungebundene Gesteinsgemisch nachträglich mit pechhaltigem Bindemittel getränkt, um feine Bestandteile zu binden und die größeren Körner miteinander zu verkleben. Eine homogene Bindemittelverteilung oder gar eine Umhüllung der Gesteine war auf diesem Wege selbstverständlich nicht möglich. Das pechhaltige Bindemittel verklumpte mit den feinen Gesteinskörnungen oder versickerte in Hohlräume, wo sich Ansammlungen fast reinen Bindemittels bildeten (kontinuierliche, residuale Teerphasen, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben). Diese Faktoren können zu extremen Schwankungen der PAK- bzw. Phenolgehalte von Ausbauproben als pechhaltig deklarerter Schichten führen. Die Schwankungsbreite der Messwerte kann erfahrungsgemäß bis zu mehreren hundert Prozent betragen. Die exakte Angabe des PAK- bzw. Phenolgehaltes einer pechhaltigen Schicht ist folglich nicht möglich.

Bei der bautechnischen Beurteilung von bituminösem Straßenaufbruch – ob pechhaltig oder nicht – muss grundsätzlich zwischen Stück- und Korngrößenverteilung unterschieden werden. Für die Verarbeitungseigenschaften eines wiederzuverwertenden

Ausbaustoffes (Verdichtbarkeit und Bindemittelanspruch) ist die Stückgrößenverteilung maßgebend; die Korngrößenverteilung hat Auswirkungen auf den Verformungswiderstand. Die Stückgrößenverteilung ergibt sich aus der normalen Absiebung des getrockneten Materials, die Korngrößenverteilung dagegen aus der Absiebung nach Extraktion des enthaltenen Bindemittels. Die Bindemittelextraktion sorgt für die Auflösung der oben beschriebenen Bindemittelzusammenballungen, so dass darin gebundene Feinbestandteile freigegeben werden. Deswegen entsprechen die Korngrößenverteilungen granularer bituminöser Ausbaustoffe normalerweise deutlich feineren Sieblinien als deren Stückgrößenverteilungen. Letztere weisen in der Regel einen typischen Mangel im Bereich des Füllers (0–0,09 mm) und der feinen Gesteinskörnungen (0,09–2 mm) auf, insbesondere bei den Körnungen 0,09–0,71 mm.

3.4.2 Nachweis teerstämmiger Materialien

Besteht bei einem Straßenausbaustoff oder einer Schicht der Verdacht auf darin enthaltene teerstämmige Bestandteile, können diese in verschiedenen Stufen geprüft und ggf. die pechhaltigen Bestandteile nachgewiesen werden. Allen Nachweisverfahren ist gemeinsam, dass sie sich zur Identifikation teerstämmiger Materialien auf die Detektion von PAK bzw. Phenolen stützen. Die Nachweisverfahren lassen sich in die folgenden Kategorien einteilen:

- organoleptische Prüfung
- qualitative und halbquantitative Schnellverfahren
- quantitative Nachweisverfahren

Mit Hilfe der organoleptischen Prüfung (visuelle Merkmale, Geruchsprobe) lassen sich erste Hinweise auf das Vorhandensein pechhaltiger Bestandteile ableiten. Als Anhaltspunkte dienen der jedem Fachmann bekannte, typische Teergeruch, der von sich verflüchtigen PAK herrührt (siehe Kapitel 3.2.3) sowie der an frischen Bruchflächen sichtbare, intensive schwarze Glanz pechhaltigen Bindemittels.

Die Verfahren zur quantitativen Bestimmung der PAK und Phenole in eventuell pechhaltigem Straßenaufbruch oder Bindemittel sind im FGSV-Arbeitspapier Nr.27/3 [4] festgelegt. Neben der Extraktion und Elution behandelt es auch die Probenvorbereitung von Bohrkernen, Fräsgut und Aufbruchmaterial sowie die Probenlagerung. Je nach Methode der Bestimmung und abhängig davon, ob Feststoffgehalt oder Eluatkonzentration untersucht werden soll, werden clean-up- und Aufkonzentrierungsprozeduren festgelegt. Die nach [4] anzuwendenden Analyseverfahren (HPLC und GC/MS) stellen jedoch einen schwierigen, apparativ sowie zeitlich aufwendigen und damit kostspieligen Bereich der Umweltanalytik dar. Deshalb existieren daneben auch mehrere Schnellverfahren zur Prüfung von Straßenausbaumaterial auf teerstämmige Bindemittel, die im FGSV-Arbeitspapier Nr.27/2 [43] beschrieben sind. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick

Tabelle 3.4: Verfahren zur Prüfung von Straßenausbaumaterial auf teerstämmige Bindemittel [4, 43]

Verfahren	PAK			Phenole		
	ql	hqn	qn	ql	hqn	qn
Lackansprühverfahren	•	-	-	-	-	-
Sublimationsverfahren	•	-	-	•	-	-
Dünnschichtchromatographie mit Fluoreszenzdetektion (DC)	•	•	-	-	-	-
Phenolverfahren	-	-	-	•	•	-
Anthrachinonreaktion	•	-	-	-	-	-
Diazoreaktion	-	-	-	•	-	-
GC/MS	•	•	•	•	•	•
HPLC	•	•	•	•	•	•
Phenolbestimmung nach DIN 38409-16	-	-	-	•	•	•

ql... qualitativ; hqn... halbquantitativ; qn... quantitativ

über die in den beiden Arbeitspapieren enthaltenen Verfahren. Auf deren nähere Beschreibung wird hier jedoch verzichtet; weitergehende Informationen finden sich in [33, 7, 37, 4, 43, 44, 45, 46].

Bei der Prüfung von Straßenaufbruch auf pechhaltige Bestandteile gelten die PAK oftmals als Leitsubstanzen. Es wird unterstellt, dass ihr positiver Nachweis in einer Probe auf darin enthaltene pechhaltige Bestandteile schließen lässt. Dieser direkte Zusammenhang trifft aber nur dann zu, wenn es sich steinkohlenteerstämmiges Material handelt, welches große Mengen an PAK enthält. Braunkohlenteerpech kann dagegen einen ebenso niedrigen PAK-Gehalt wie Bitumen bei gleichzeitig extremem Phenolgehalt aufweisen [23]. Solche pechhaltigen Bestandteile würden bei einem exklusiven PAK-Nachweis nicht korrekt klassifiziert. Für abgesicherte Aussagen sind nach dem geltenden Regelwerk daher immer der PAK-Gehalt im Feststoff (PAK nach EPA-Standard 610 [3]) und der Phenolindex im Eluat einer Probe zu bestimmen. Die vorbereitenden Schritte wie Probenahme und Probenvorbereitung einschließlich des Anreicherungsverfahrens sind dabei meist aufwendiger, schwieriger und eher die Quelle von möglichen Fehlern als die abschließende analytische, quantitative Messung des PAK-Gemisches [47]. Besonders störend wirkt sich der im vorangegangenen Kapitel erwähnte inhomogene Charakter des Straßenaufbruchmaterials aus, zumal übliche Homogenisierungstechniken schlecht anwendbar sind. So scheidet Mahlen nach vorangegangener Trocknung bei erhöhten Temperaturen aufgrund der nicht zu vernachlässigenden Flüchtigkeit niedermoleku-

larer PAK, wie z. B. Naphthalin, aus. Nach Trocknen bei Raumtemperatur verhindern die adhäsiven Eigenschaften des enthaltenen Bindemittels meist eine Homogenisierung durch Mahlen. Als Alternative bleibt nur die Untersuchung größerer Probemengen. Eine Übersicht möglicher Methoden der Probenahme und Vorbereitungsverfahren bei der PAK-Bestimmung findet sich in [48].

Zur Untersuchung des besonders umweltrelevanten Schadstoffaustrags aus der Festphase in die wässrige Phase dienen im Allgemeinen die folgenden Auslaugungsverfahren:

- Trogelution nach TP Min-StB [6]
- Elution nach DEV S4 [49]
- Elution mit dem pH-stat-Verfahren [50]

Die Ergebnisse der Auslaugungsverfahren unterliegen vielfältigen Einflussgrößen, so dass ihre Ergebnisse häufig von den Beobachtungen an den realen Standorten abweichen [25]. Zur Untersuchung des Elutionsverhaltens pechhaltigen Straßenaufbruchs gilt heutzutage in Deutschland das Trogelutionsverfahren als allgemein anerkannt. Im Gegensatz zum DEV S4 können damit auch größere Proben untersucht werden. Die Kornoberflächen bleiben durch den Wegfall des Überkopfschüttelns unverändert, wodurch keine ergebnisverändernden neuen Bruchflächen an den Körnern entstehen. Das pH-stat-Verfahren ist gegenüber der Trogelution apparativ wesentlich aufwendiger. Zudem ist das Auslaugverhalten besonders der phenolischen Pechinhaltsstoffe stark pH-abhängig (siehe Kapitel 3.3.3). Daher kann die Verwendung von entionisiertem, kaum gepuffertem Wasser als Elutionsmittel zu schwer interpretierbaren Ergebnisse führen.

Wegen des verhältnismäßig hohen Aufwandes für die quantitative PAK- und Phenolanalytik ist der Anreiz für die Entwicklung neuer, günstigerer Methoden groß. Darunter fällt z. B. ein streifenförmiger Schnelltest auf PAK, beruhend auf Adsorption auf Polymersubstrat mit folgender Fluoreszenzbestimmung [51]. Ebenso lässt sich dazu ein derzeit in der Erprobungsphase befindliches Detektionsverfahren für PAK zählen, welches den menschlichen Geruchssinn mittels einer elektronischen Nase (E-Nose) nachahmt. Die E-Nose misst die geruchsbildenden Gase, die aus der zermahlenden und auf 150 °C erhitzten Probe entweichen. Mittels mehrerer Geruchssensoren werden typische Geruchsmuster erkannt, die mit denen bekannter Proben abgeglichen werden. Im Gegensatz zur organoleptischen Prüfung werden hierbei objektive und reproduzierbare Ergebnisse erzielt [52].

3.5 Bitumenemulsionen

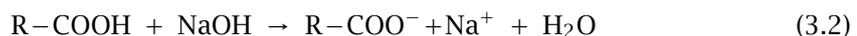
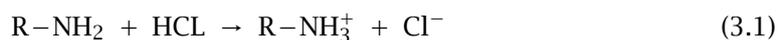
3.5.1 Zusammensetzung, Arten und Herstellung

Emulsionen sind Gemische zweier normalerweise nicht miteinander mischbarer Flüssigkeiten. Die innere Phase (disperse Phase) liegt dabei in feinen Tröpfchen verteilt in der

äußeren Phase (Dispersionsmittel) vor und wird durch einen Emulgator stabilisiert. Je nach Phasenlage handelt es sich um eine Wasser-in-Öl-Emulsion oder um eine Öl-in-Wasser-Emulsion. Als Emulgatoren wirken grenzflächenaktive Substanzen; sie verhindern, dass sich das Gemisch wieder in seine Bestandteile trennt [53]. In einer Bitumenemulsion ist das Bitumen die disperse Phase, das Wasser ist das Dispersionsmittel. Bitumenemulsionen sind also Öl-in-Wasser-Emulsionen. Als Emulgatoren zur Herstellung von Bitumenemulsionen werden in erster Linie Tenside verwendet [54]. Dies sind in der Regel synthetische, waschaktive Substanzen, die aus einem hydrophoben, lipophilen Kohlenwasserstoffrest und einem hydrophilen Molekülteil bestehen. Man unterscheidet folgende Arten von Tensiden:

- nichtionische Tenside,
- anionische Tenside,
- kationische Tenside und
- amphotere (zwitterionische) Tenside [55].

Zum Emulgieren von Bitumen werden hauptsächlich kationische Tenside verwendet, anionische eher selten, weil sich hieraus Nachteile für den Bauablauf ergeben können. Für Spezialemulsionen sind auch amphotere und nichtionische Tenside in der Verwendung. Je nach verwendetem Emulgator spricht man also von *kationischen, anionischen, nichtionischen oder amphoteren Bitumenemulsionen*. Die folgenden Gleichungen zeigen, wie Tenside gebildet werden: kationische Tenside durch Neutralisation aliphatischer Fettamine mit Salzsäure (Gleichung 3.1); anionische Tenside (Laugen) durch Umwandlung von Fett- und Harzsäuren mittels Natriumhydroxid (Gleichung 3.2):



Der lipophile, hydrophobe Molekülrest des Tensids (R) dringt beim Emulgieren in das Bitumentropfen ein, der ionisierte, hydrophile Teil (NH_3^+ oder COO^-) hält das Bitumentropfen im Dispersionsmittel in Lösung. Der Emulgator bildet eine elektrochemische Doppelschicht um jedes der Bitumentropfen, die dadurch nach außen elektrostatisch gleichartig geladen sind und auf diese Weise am Zusammenfließen gehindert werden; die Bitumenemulsion bleibt stabil. In Abbildung 3.4 ist das am Beispiel einer kationischen Bitumenemulsion modellhaft dargestellt.

Abgesehen von unterschiedlich geeigneten Emulgatoren kommt es bei der Emulsionsherstellung auf ein gut emulgierfähiges Bitumen an. Emulsionsbitumen sind nicht speziell genormt. Die Hersteller müssen zur Emulgierung geeignete Bitumen nach ihrer Rohölprovenienz auswählen [56]. *Genaue* Angaben dazu sind jedoch oftmals ein

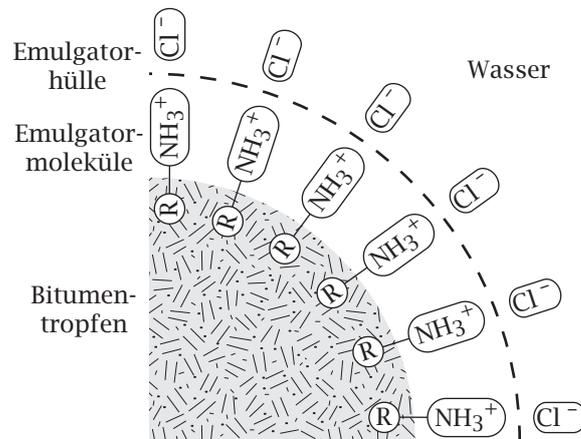


Abbildung 3.4: Emulgatorhülle einer instabilen, kationischen Bitumenemulsion [54]

gut gehütetes Geheimnis der Bitumenproduzenten. Bekanntermaßen eignen sich Bitumen mit einer erhöhten Säurezahl am besten zur Emulgierung, beispielsweise sog. Venezuela-Bitumen [54]. Auch Normbitumen nach DIN EN 12591 und polymermodifizierte Bitumen nach TL PmB können bei entsprechender Eignung emulgiert werden, die nachträgliche Modifizierung einer Normbitumenemulsion mit Polymeren ist ebenfalls möglich. Zusätzlich können herstellereigenspezifische Zusätze, wie z. B. Haftverbesserer bei anionischen Bitumenemulsionen, zugegeben werden.

Im Emulgierprozess wird das heiße (pumpfähige) Bitumen gemeinsam mit Emulsionswasser und Emulgator mit Dosierpumpen durch eine Kolloidmühle gepresst. Eine Kolloidmühle ist ein schnell laufendes Rotor-Stator-System mit einem ringförmigen Scherspalt von wenigen Zehntelmillimeter Dicke. Während der Durchtrittszeit von einigen Zehntelsekunden zieht die Kolloidmühle das Bitumen zu einem extrem dünnen Film aus, der durch Kontakt mit dem Wasser zu feinsten Partikeln zerrissen wird.⁸ Die Bitumenpartikel formen sich zu Kugeln, weil dies die aufzubringende Grenzflächenenergie im thermodynamisch instabilen Wasser-Bitumen-Gemisch minimiert. Die so entstandenen, mikroskopisch kleinen Bitumentropfen werden durch den beigemengten Emulgator umhüllt und bleiben dadurch feinstverteilt in der Wasserphase stabil. Bei schnell brechenden, instabilen Emulsionen werden etwa 0,1–0,3 M.-% Emulgator zugegeben. Die Menge ist so gewählt, dass sie gerade ausreicht, alle Bitumenkügelchen zu umhüllen. Bei langsam brechenden, stabilen Emulsionen wird der Emulgatorgehalt auf bis zu 2 M.-% erhöht, so dass ein gewisser Emulgatorüberschuss entsteht.

Die Feinheit der erzeugten Bitumenpartikel ist entscheidend für die späteren Gebrauchseigenschaften einer Bitumenemulsion. Die im Straßenbau eingesetzten Bitu-

⁸Die schlagartige Volumenvergrößerung heißen Bitumens bei Wasserkontakt (Aufschäumen) wird ebenfalls bei der Schaumbitumenherstellung ausgenutzt.

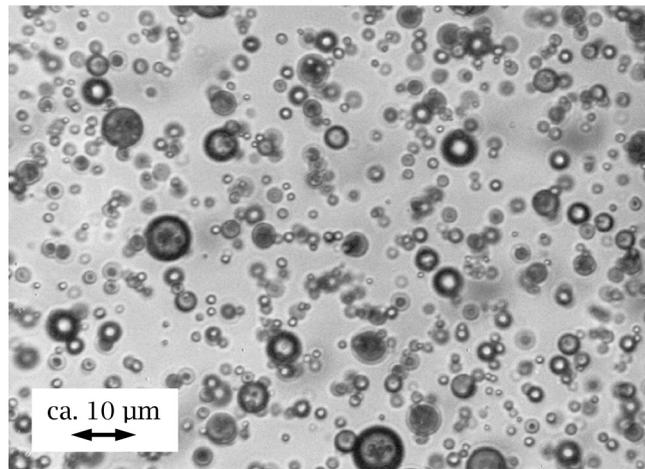


Abbildung 3.5: Mikroskopische Aufnahme einer Bitumenemulsion [57]

menemulsionen weisen im frischen Zustand Partikelgrößen von 1–10 µm auf. Die Partikelgrößen können z. B. durch Laserdiffraktometrie erfasst und als Verteilungsspektren dargestellt werden [56]. Bewährt haben sich Bitumenemulsionen bei denen das Maximum des Verteilungsgrades bei etwa 5 µm oder etwas darunter liegt [54]. Abbildung 3.5 zeigt die Aufnahme einer Bitumenemulsion unter dem Mikroskop, in der die einzelnen Bitumenkügelchen und ihre Größen sehr gut erkennbar sind.

3.5.2 Normungssituation

Auf europäischer Ebene sind die Bitumenemulsionen nach ihrer Ladungsart systematisiert. Anforderungen an kationische Bitumenemulsionen sind in der DIN EN 13808 formuliert [58]. Vor deren Gültigkeit waren kationische und anionische Bitumenemulsionen in der DIN 1995 Teil 3 definiert [59]. Desweiteren existieren einige deutsche Regelwerke mit einengenden Anforderungen für spezielle Einsatzzwecke, wie z. B. die *Technischen Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bindemittel für Oberflächenbehandlungen (mit bitumenhaltigen Bindemitteln) (TL PmOB)*. Ein Regelwerk speziell für Bitumenemulsionen zu Recyclingzwecken besteht derzeit nicht. Die kationischen Recyclingemulsionen lassen sich jedoch in die DIN EN 13808 einordnen. Für die nichtionischen und amphoteren Bitumenemulsionen, welche nur eine äußerst begrenzte Bedeutung als Baustoffe haben, gibt es keine dem Autor bekannte Regelungen.

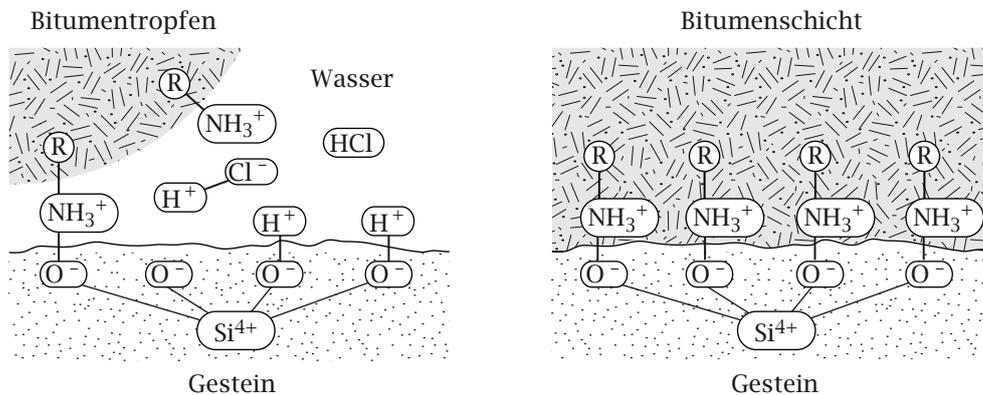


Abbildung 3.6: Brechvorgang einer kationischen Bitumenemulsion [60]

3.5.3 Brech- und Abbindevorgang

Als *Brechen* einer Emulsion wird die Phasentrennung von Wasser und Bindemittel bezeichnet, die beim Kontakt der Bitumenemulsion mit einer (Gesteins-) Oberfläche stattfindet. Der Ablauf des Brechvorgangs ist eine fundamentale Eigenschaft einer Bitumenemulsion. Daher finden sich entsprechende Anhaltspunkte auch in den Emulsionsbezeichnungen wieder (unstable oder stabile Emulsion für schnelles oder langsames Brechen). Der gesamte Vorgang vom Brechen der Emulsion bis zum Vorliegen des reinen Bitumens wird als *Abbinden* bezeichnet. Bei kationischen Bitumenemulsionen verläuft der Abbindevorgang nach [54] modellhaft in drei Stufen:

1. Anlagerung des Bindemittels am Gestein
2. Durchbrechen der Bitumenemulsion
3. Verfestigung des ausgeschiedenen Bindemittels

In der ersten Stufe findet ein spontaner Ladungsausgleich zwischen der Gesteinsoberfläche und dem Emulgator statt, dessen Schutzfunktion damit neutralisiert wird. Erste Bitumenkügelchen lagern sich am Gestein an und bilden einen dünnen Film. Dieser Prozess dauert etwa 1–5 min an, je nach Stabilisierung der Emulsion. Bei stabilen Bitumenemulsionen werden zunächst die freien, im Wasser gelösten Tensidionen »verbraucht«, bevor die Schutzhüllen um die Bitumenkügelchen aufgebrochen werden. Der kationische Emulgator wirkt wasserverdrängend und wird als Haftmittel in der Grenzfläche zwischen Bitumen und Oberfläche fixiert. Durch die dicker werdenden Bitumenfilme verlangsamt sich der weitere Ladungsaustausch zunehmend. In Abbildung 3.6 ist dieser Vorgang anschaulich dargestellt.

In der zweiten Phase wird die Hauptmasse des Bitumens aus der Emulsion ausgeschieden, das Emulsionswasser tritt als klare Flüssigkeit aus. Dieser Vorgang wird von folgenden Prozessen bestimmt:

- weiterer Ladungsaustausch (verlangsamt)
- Absorption von Emulsionswasser durch Kapillarkräfte
- Verdunstung von Emulsionswasser
- Auspressen von Emulsionswasser durch Verdichtung, Bitumentropfen gelangen in molekulare Nachbarschaft und fließen zusammen

Die dritte Phase, die Verfestigung des Bindemittels, beschränkt sich auf das Verdunsteten eingeschlossener Restwasseranteile, die fein verteilt im Mischgut vorliegen [54]. Da die für Deutschland typischen Gesteine mehr oder weniger stark sauer reagieren, bzw. an ihren Bruchflächen negativ geladene Ionen enthalten, ist im Straßenbau die Anwendung kationischer Bitumenemulsionen vorteilhaft, weil diese nach dem oben beschriebenen Schema brechen können [61]. In Deutschland und Mitteleuropa kommen deshalb im Straßenbau fast ausschließlich kationische Bitumenemulsionen zum Einsatz.

Anionische Bitumenemulsionen lagern aufgrund ihrer positiven Ladung das Emulsionswasser zwischen dem Bitumenfilm und der Gesteinsoberfläche ein; dieses Wasser muss nach dem Brechen der Emulsion durch den Verdichtungsprozess verdrängt werden und langsam verdunsten. Erst danach haftet der Bitumenfilm fest auf der Gesteinsoberfläche. Während dieses Zeitraumes kann das Bindemittel noch sehr leicht von der Gesteinsoberfläche abgewaschen werden. Plötzliche Regenereignisse können dadurch eine Straßenbaumaßnahme mit Verwendung anionischer Emulsion sehr leicht gefährden. Deshalb spielen anionische Bitumenemulsionen besonders in Ländern mit warmem Klima bzw. mit großen karbonatischen Gesteinsvorkommen eine Rolle, außerdem finden sie im Bautenschutz Verwendung.

3.5.4 Untersuchung des Brechverhaltens

Das richtig eingestellte Brechverhalten einer Bitumenemulsion spielt für deren Verarbeitungseigenschaften eine entscheidende Rolle. Bislang wurde das Brechverhalten kationischer und anionischer Bitumenemulsionen manuell nach DIN 52047 Teil 1 und 2 untersucht [8, 62]. Mit Einführung der DIN EN 13808 [58] als europäische Anforderungsnorm für kationische Bitumenemulsionen, trat gleichzeitig auch ein neues Prüfverfahren zur Untersuchung des Brechverhaltens in Kraft. Dieses ist in der DIN EN 13075 Teil 1 [63] festgelegt. Für anionische Bitumenemulsionen existiert derzeit kein europäisch genormtes Prüfverfahren.

Prüfverfahren nach DIN 52047

Das *Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen* wird nach DIN 52047-1 [8] untersucht, indem eine Emulsionsprobe von 100 g manuell mit Quarzmehl vermischt wird. Die Zugabe erfolgt mit einem Spatel mit einer Dosierung von 5 g in je 10 s. Der Versuch ist solange fortzusetzen, bis die Emulsion augenscheinlich vollständig gebrochen ist (pastöser, nicht an der Kasserolle haftender Klumpen). Durch Rückwaage wird die Menge des zugegebenen Quarzmehls bestimmt. Der Quarzmehlanspruch üblicher kationischer Bitumenemulsionen liegt zwischen etwa 140 g und 200 g.

Das *Brechverhalten anionischer Bitumenemulsionen* kann nach DIN 52047-2 [62] mit einer Emulsionsprobe von 20 g und mit 100 g eines definiert zusammengesetzten Gemisches aus Basalt-Edelbrechsand und Edelsplitt bestimmt werden. Mit einem Spatel wird die Probe 30 s lang manuell kräftig durchgerührt. Es wird festgestellt, ob innerhalb der Mischzeit Klumpenbildung (Brechen der Emulsion) eintritt.

Beide Verfahren weisen im Grunde die gleichen Nachteile auf und sind auf die Anwendung möglichst einfacher Prüftechnik abgestellt. Der Mischvorgang erfolgt immer manuell, beim Prüfverfahren für kationische Bitumenemulsionen ist zudem die richtige Dosierung schwer einzuhalten. Dies unterwirft die Ergebnisse einem großen individuellen Einfluss des Prüfers und setzt dadurch die Präzision herab. Die Messgrößen (Massen der zugegebenen Prüfkörnungen) sind darüber hinaus Hilfsgrößen und werden nur zu einem einzigen, jedoch variablen Zeitpunkt bestimmt. Die Beobachtung der Viskositätsentwicklung während des Brechens einer Emulsion ist damit nicht möglich. Insgesamt sind diese Prüfverfahren so unsensibel, dass sie für die Unterscheidung von Feinheiten im Brechverhaltens von Bitumenemulsionen ungeeignet sind. Sie liefern lediglich eine Aussage über deren grundsätzliche Eignung für einen bestimmten Zweck (»Schwarz-Weiß-Test«).

Prüfverfahren nach DIN EN 13075-1

Das Prüfverfahren zur Bestimmung des Brechverhaltens kationischer Bitumenemulsionen nach DIN EN 13075-1 [63] arbeitet halbautomatisch. Dabei wird einer festgelegten Menge kationischer Bitumenemulsion ein Referenzfüller mit gleichbleibender Dosierung zugeführt. Die Emulsion wird mit einem Flügelrührer maschinell gerührt, gleichzeitig muss der Behälter mit der Emulsion manuell entgegengesetzt zum Drehsinn des Rührers gedreht werden. Als Prüfkörnung wird ein spezieller, definierter Füller genutzt, sog. »Forshammer-Füller«, dessen Dosierung mittels eines mechanisierten Auslasses stattfindet. Wenn die Emulsion vollständig gebrochen ist, wird die zugefügte Menge an Füller durch Rückwaage bestimmt. Die Masse des Füllers, multipliziert mit 100 und dividiert durch die Menge an Emulsion, ergibt den Brechwert.

Prinzipiell ist dieses Prüfverfahren dem oben beschriebenen Verfahren nach DIN 52074 also sehr ähnlich. Im Gegensatz dazu wird jedoch durch das maschinelle Rühren die Mischleistung konstant und vor allem vergleichbar gehalten. Auch die Zugabe

des verwendeten Prüffüllers ist mechanisiert und somit weitaus weniger von individuellen Einflüssen abhängig, allerdings muss zusätzlich der Probenbehälter manuell gedreht werden. Durch die beibehaltene Bestimmung des Brechzeitpunktes nach Augenschein unterliegt das Prüfergebnis jedoch nach wie vor einer hohen Subjektivität. Zudem wird auch bei diesem Verfahren keine Messgröße bestimmt, die den Verlauf des Brechvorgangs beschreiben kann. Unterschiede in der Viskositätsentwicklung und der Ausbildung der Klebkraft in der Probe können damit ebenfalls nicht erkannt werden. Deshalb handelt es sich auch bei diesem Verfahren um einen »Schwarz-Weiß-Test«.

3.6 Wiederverwertungsmöglichkeiten pechhaltiger Ausbaustoffe

3.6.1 Grundlagen

Pechhaltige Straßenaufbruchmaterialien gelten nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz als Abfälle zur umweltgerechten Wiederverwertung. Die Verwertung hat dabei grundsätzlich Vorrang vor der Deponierung, wenn es technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist [17]. Die TRGS 551 ermöglichen die Wiederverwertung pechhaltigen Straßenaufbruchs durch eine Sonderregelung [21].

Die Grundlage der Verwertung im Straßenbau bilden die *Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau (RuVA-StB)* [12]. Zusätzlich können länderspezifische Regelungen gelten. Die RuVA-StB klassifizieren Straßenaufbruchmaterialien anhand ihres Gesamtgehaltes an PAK im Feststoff und ihres Phenolindex im Eluat in die Verwertungsklassen A, B und C und geben jeweils dafür geeignete Verwertungsverfahren vor. Die Klassifizierung und Zuordnungen sind in Tabelle 3.5 auszugsweise dargestellt [12].

Der PAK-Gehalt eines Ausbaustoffes der Verwertungsklasse A von ≤ 25 mg/kg entspricht dem eines kennzeichnungsfreien Bindemittels im Gemisch, so dass eine Heißaufbereitung zulässig ist. Sie stellt die hochwertigste Form der Wiederverwertung dar. Für die Verwertung von pechhaltigen Ausbaustoffen der Verwertungsklassen B und C existieren mehrere Kaltrecyclingverfahren, die sich anhand der verwendeten Bindemittel in die folgenden vier Kategorien einteilen lassen:

- Kaltrecycling mit Bitumenemulsion
- Kaltrecycling mit hydraulischen Bindemitteln
- Kaltrecycling mit hydraulischen Bindemitteln und Bitumenemulsion
- Kaltrecycling mit Schaumbitumen

Beim Kaltrecycling pechhaltigen Straßenaufbruchs sollen die PAK und Phenole durch Umhüllung mit zugegebenen hydraulischen bzw. bitumenhaltigen Bindemitteln immobi-

Tabelle 3.5: Zuordnung der Verwertungsklassen und -verfahren für bituminös gebundene Straßenbaustoffe [12]

Verwertungs- klasse	Hinter- grund	Gesamtgehalt im Feststoff PAK (EPA) [mg/kg]	Phenolindex im Eluat [mg/l]	Verwertungsverfahren
A	AS, BS GS	≤ 25	≤ 0,1	Heißmischverfahren (Kaltmischverfahren mit Bindemitteln)
B	AS, BS GS	> 25	≤ 0,1	Kaltmischverfahren mit Bindemitteln
C	BS, GS	Wert ist anzugeben	> 0,1	Kaltmischverfahren mit Bindemitteln

AS... Arbeitsschutz; BS... Bodenschutz; GS... Gewässerschutz

Verfahren in Klammern nur in Ausnahmefällen, da keine hochwertige Verwertung

Tabelle 3.6: Grenzwerte für die Elution von Probekörpern aus gebundenen Ausbaustoffen der Verwertungsklassen B und C [12]

Verwertungs- klasse	PAK-Konzentration im Eluat [mg/l]	Phenolindex [mg/l]
B	≤ 0,03	kein Nachweis erf.
C	≤ 0,03	≤ 0,01

lisiert werden. Wird darüber hinaus eine Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften eines Ausbaustoffes angestrebt, können entsprechende Ergänzungskörnungen zur Verbesserung der Sieblinie des Gemisches zugegeben werden. Dies soll aber in geringstmöglichem Umfang erfolgen, um das Volumen der pechhaltigen Schichten so klein wie möglich zu halten und Verdünnungseffekte zu vermeiden. Das Kaltrecyclingmischgut wird anschließend als neue Tragschicht (-lage) wieder eingebaut und mit einer oder mehreren Asphaltsschichten überbaut, welche den direkten Wasserzutritt von oben her verhindern. Für Ausbaustoffe der Verwertungsklassen B und C (siehe Tabelle 3.5) ist die Anwendung der oben angeführten Verfahren jedoch nur dann zulässig, wenn in der Eignungsprüfung nachgewiesen werden kann, dass im Eluat eines Probekörpers die in Tabelle 3.6 angegebenen Grenzwerte eingehalten werden.

Die vier Kaltrecyclingverfahren können prinzipiell sowohl im Zentral- als auch im Baustellenmischverfahren durchgeführt werden. Baustellenmischverfahren liefern erfahrungsgemäß nur dann befriedigende Ergebnisse, wenn Bindemittel und Ausbaustoffe in einem Zwangsmischer verarbeitet werden. Das einfache Einmischen des Bindemittels

mit Hilfe von Fräsen, führt nicht zu den gewünschten Resultaten. Zwar können dabei die erforderlichen Festigkeiten erreicht werden, die Umhüllung des Ausgangsmaterials und damit auch die Schadstoffimmobilisierung sind bei diesen Verfahren jedoch mangelhaft. Baustellenmischverfahren ohne Zwangsmischer sollten deshalb grundsätzlich nicht angewendet werden.

Die Anforderungen für im Zentralmischverfahren hergestelltes, bitumengebundenes Tragschichtkaltmischgut werden künftig im *Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen (M VB-K)* [10] geregelt sein. Dieses geht vom Regelfall der gemeinsamen Verwendung von Bitumenemulsion und hydraulischem Bindemittel aus, deckt darüber hinaus aber auch die reine Emulsionsbauweise sowie das Schaumbitumenverfahren ab.

In der nachfolgenden Erläuterung der Kaltrecyclingverfahren wird nur auf das Kaltrecycling mit Bitumenemulsion ausführlich eingegangen. Der Fokus liegt auf den Baustoffen, den damit erzielbaren Gebrauchseigenschaften und der erreichbaren Immobilisierung der PAK und Phenole, nicht auf der Bauverfahrenstechnik. Die übrigen Kaltrecyclingverfahren werden nur kurz angerissen, um sie gegeneinander abzugrenzen. Weiterführende Informationen zu den einzelnen Bauverfahren sind in den zitierten Literaturstellen und der sonstigen einschlägigen Fachliteratur zu finden.

3.6.2 Kaltrecycling mit Bitumenemulsion

Die Emulsionsbauweisen begannen sich in Deutschland Mitte bis Ende der achtziger Jahre zu entwickeln, als man nach Möglichkeiten suchte, Ausbauasphalt und pechhaltige Aufbruchmaterialien bei normalen Umgebungstemperaturen wiederverwerten zu können. Die Notwendigkeit der Kaltverarbeitung pechhaltigen Straßenaufbruchs wurde bereits in den Kapiteln 3.2.3 und 3.3.3 begründet. In Frankreich werden Emulsionsbauweisen wegen des wesentlich dünneren Netzes von Asphalt heißmischanlagen bereits seit langem eingesetzt. Bei der Entwicklung von Kaltrecyclingverfahren mit Bitumenemulsionen konnte man auf dieses Wissen teilweise zurückgreifen. Im Jahre 1993 fasste man die mit der Emulsionsbauweise bis dahin gesammelten Erfahrungen im *Merkblatt für die Wiederverwendung pechhaltiger Ausbaustoffe im Straßenbau unter Verwendung von Bitumenemulsionen* [64] zusammen. Bis zur Veröffentlichung des M VB-K [10] galt es unverändert. Für im Baustellenmischverfahren hergestelltes Emulsionsmischgut existieren keine neueren Regelungen. Diese Verfahren stellten sich bezüglich der erreichten Festigkeiten als problematisch heraus, was der reinen Emulsionsbauweise an einigen Stellen einen schlechten Ruf eingetragen hat. Die erreichbaren Festigkeiten bei reiner Emulsionsbindung sind naturgemäß etwas niedriger als bei der hydraulischen oder der kombinierten Bindung und es erfordert eine möglichst gute Abstimmung der Baustoffe, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Der folgenden Beschreibung muss vorweggeschickt werden, dass mit dieser Bauweise erzielte Resultate nur spärlich in der Literatur dokumentiert sind.

Mischgutkonzeption

Emulsionsmischgut besteht immer aus

- (meist pechhaltigem) Ausbaumaterial,
- Bitumenemulsion,
- Zugabewasser und
- ggf. Zusatzkörnungen zur Verbesserung der Stückgrößenverteilung.

Neben der Stückgrößenverteilung ist der zeitliche Verlauf der Ausbildung kohäsiver Eigenschaften eines Emulsionsmischgutes von entscheidender Bedeutung für dessen Verarbeitungseigenschaften und damit auch für die Qualität der fertigen Schicht. Der Verlauf wird durch das Brechverhalten der Bitumenemulsion (siehe Kapitel 3.5.3) sowie die Dosierung des Zugabewassers beeinflusst. GLET hat für die Festigkeitsentwicklung eines Mischgutes mit kationischer Bitumenemulsion ein Modell mit fünf Stufen (*Fünf-Stufen-Modell*) entwickelt [61]:

1. Die erste Stufe umfasst den Mischvorgang von Bitumenemulsion und Gestein. Die Emulsion ist noch nicht gebrochen, so dass die Bitumentropfen in der Trägerphase noch frei beweglich sind und sich homogen im Mischgut verteilen können.
2. Während der zweiten Stufe sind die Bitumentropfen noch voneinander getrennt aber an der Gesteinsoberfläche fixiert. Daher sind sie nicht mehr frei beweglich. Die Gesteinsoberflächen sind überall mit Bitumen bedeckt. Die Emulsion beginnt das Emulsionswasser in die Hohlräume des Mischgutes auszuschleiden. Diese zweite Stufe ist als Beginn des Brechvorgangs einer Emulsion anzusehen.
3. In der dritten Stufe beginnen die einzelnen Bitumentropfen miteinander zu verschmelzen, wodurch sich nach Abschluss dieses Prozesses ein geschlossener Bitumenfilm an der Gesteinsoberfläche gebildet hat. In den Randzonen gibt es noch einzelne Bitumentropfen, die Fixierung ist aber bereits so stark, dass ein Abwaschen des Bindemittels nicht mehr möglich ist. Obwohl das Bitumen bereits einen geschlossenen Film bildet, ist die Kohäsion innerhalb des Bitumens noch nicht ausgeprägt. Aus diesem Grund können die einzelnen Gesteinskörner leicht gegeneinander verschoben werden. Das frei werdende Wasser wirkt zusätzlich als Trennschicht zwischen den mit Bitumen umhüllten Körnern.

4. Der Übergang von Stufe drei nach vier ist im Wesentlichen eine Folge der Verdichtung des Emulsionsmischgutes. Die Bitumentropfen sind alle zusammengefloßen, das Bindemittel bildet einen kompakten Film und das Emulsionswasser wird durch die aufgewendete Verdichtungsarbeit in die Hohlräume des Mischgutes verdrängt. Die Kontaktflächen zwischen den Gesteinskörnern werden durch die zunehmende Verdichtung ständig größer.
5. Die fünfte Stufe kennzeichnet den Endzustand der Aushärtung eines Emulsionsmischgutes. Die verklebende Wirkung des Bitumens ist voll ausgeprägt und das Korngerüst ist endverdichtet. In den Hohlräumen des Mischgutes hat sich das Emulsionswasser gesammelt.

Das Fünf-Stufen-Modell von GLET macht deutlich, in welchem Zustand sich ein Emulsionsmischgut während des Mischens, des Lagerns, des Transports, des Einbaus und des Gebrauchszustandes befinden muss. Im Zentralmischverfahren hergestelltes Recyclingmischgut muss die Stufe zwei schnell durchlaufen, anschließend aber längere Zeit in Stufe drei verharren, um sicherzustellen, dass das Bindemittel während des Transportes nicht mehr abgewaschen werden kann, das Mischgut aber noch körnig und gut verdichtbar bleibt. Im Baustellenmischverfahren eingebautes Recyclingmischgut kann die Stufe drei dagegen schnell durchlaufen, weil die Transportzeit entfällt. Weiterhin zeigt es die Bedeutung des Wassers in einem Emulsionsmischgut auf. Das Wasser übernimmt sowohl eine trennende als auch eine verdichtungsunterstützende Funktion. Wasserhaltiges Mischgut verhält sich hauptsächlich nach erdbautechnischen Regeln. Die Wassermenge muss daher genau dosiert sein, damit sich die verdichtungsfördernde Wirkung nicht umkehrt. Als Bezugswert zur Bestimmung der optimalen Wassermenge dient der Proctor-Wassergehalt. Allerdings wirkt auch das noch nicht kohäsive Bitumen in Stufe drei und vier zum Teil verdichtungsunterstützend. Näherungsweise wird es daher bei der Ermittlung des optimalen Wassergehaltes zur Hälfte mit berücksichtigt. Erfahrungen haben außerdem gezeigt, dass der Proctor-Wassergehalt bei der Rezeptur des Emulsionsmischgutes etwas unterschritten werden sollte [64, 61]. Unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte der Ausgangsstoffe lautet die Gleichung zur Berechnung des optimalen Wassergehaltes eines Emulsionsmischgutes daher:

$$w_{eigen} + w_E + 0,5 \cdot B_E + W_Z = w_{Pr} - w_a \quad (3.3)$$

Darin sind:

w_{eigen}	Eigenfeuchte des Ausbaustoffes in M.-%
w_E	Wassergehalt der Emulsion in M.-%
B_E	Bindemittelgehalt der Emulsion in M.-%
W_Z	Zugabemenge an Wasser in M.-%
w_{Pr}	Proctor-Wassergehalt in M.-%
w_a	Abzug vom Proctor-Wassergehalt in M.-%

Der Abzug w_a ist nach [64] mit etwa 2 M.-% anzusetzen. Bei hohem $w_{Proctor}$ kann er vergrößert und bei einem kleinen entsprechend reduziert werden. Die auf der linken Seite der Gleichung stehende Summe muss immer auf dem trockenen, das heißt auf dem linken Ast der Proctor-Kurve liegen. Wird dies nicht beachtet, schiebt und schwimmt das Mischgut beim Verdichten, so dass die Verdichtung unterbrochen werden muss, bis das ausgetretene Wasser abgelaufen ist [61].

Diese Regelung hat zwei Nachteile. Bei einer strengen Interpretation obiger Gleichung erhält man bei niedrigen Proctor-Wassergehalten der Ausbaustoffe sehr niedrige Bindemittelzugabemengen, so dass unter Umständen keine optimale Einbindung der PAK und Phenole erreicht wird und die Verklebung der Körner beeinträchtigt sein kann. Andererseits lässt die Regelung offen, wann und um wie viel w_a reduziert werden oder gar entfallen kann. Eine korrekte Abminderung ist ohne Vorkenntnis des Materials daher nur schwer möglich. Besser wäre die Festlegung eines variablen, vom Proctor-Wassergehalt abhängigen Abzugsbetrages, so wie es für das Kaltrecycling in situ in [65] umgesetzt wurde. Nach der aktuellen Entwurfsfassung wird im M VB-K [10] überhaupt kein Abminderungsbetrag mehr vorgesehen sein; die oben dargestellten Zusammenhänge werden damit völlig außer Acht gelassen.

Wie bereits im Kapitel 3.5.3 erwähnt, finden in Deutschland wegen ihres bautechnisch günstigeren Brechverhaltens fast nur noch kationische Recyclingemulsionen Verwendung, anionische Emulsionen dagegen kaum. Das Brechverhalten der verwendeten Bitumenemulsion muss immer den konkreten Einsatzbedingungen angepasst sein. Im Falle des Zentralmischverfahrens sollten wegen der nötigen Transportzeit langsam brechende Emulsionen Verwendung finden, damit das fertige Mischgut möglichst lange in Phase 3 des Fünf-Stufen-Modells verbleibt. Bitumenemulsionen gemäß DIN 1995-3 oder TL PmOB sind dafür ungeeignet, da sie zu schnell brechen. Günstige bautechnische Erfahrungen sind mit Bitumenemulsionen gemacht worden, welche den nachfolgend aufgeführten Kriterien entsprechen (umweltrelevante Aspekte werden später erläutert):

- äußere Beschaffenheit: glatt, homogen, dünnflüssig, bräunliche Farbe
- Bitumensorte: 50/70 oder 70/100
- Bitumengehalt: 60–65 M.-%
- Ausflusszeit: $\leq 12,0$ s bei 20 °C [10]

Nachteilig für den Bauablauf ist unter Umständen die geringe Anfangsstabilität rein emulsionsgebundener Schichten. Diese ist jedoch auch stark von der Sieblinie des Recyclingmischgutes abhängig und kann durch eine Sieblinienoptimierung erhöht werden.

Eignungsprüfungen

Nach dem Merkblatt für die Wiederverwendung pechhaltiger Ausbaustoffe im Straßenbau unter Verwendung von Bitumenemulsionen [64] ist für im Zentralmischverfahren

herzustellendes Emulsionsmischgut die Probekörperherstellung im Labor mit einem modifizierten Marshall-Verfahren vorgesehen, bei dem die Probekörperhülse zusätzlich seitliche Schlitze aufweist, um das Austreten des Emulsionswassers zu ermöglichen. Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand ist diese Vorgehensweise als nicht praktikabel anzusehen. Da Wasser nicht komprimierbar ist, kann das Hohlraumvolumen bei wasser-gefüllten Poren nicht verkleinert werden. Die Trägheit des Wassers ist aber zu groß, als dass sie durch die einzelnen Verdichtungsschläge überwunden werden könnte. Aus diesem Grund kann das Emulsionswasser bei Anwendung der Marshall-Verdichtung nicht ausreichend mobilisiert und aus den Hohlräumen des Mischgutes ausgetrieben werden. Die Folge ist eine unzureichende Verdichtung des Emulsionsmischgutes. Bereits vor Erscheinen des Merkblattes lagen Arbeiten vor, in denen statische Verdichtungsverfahren vorgeschlagen wurden, mit denen sich das Wasser aus dem Emulsionsmischgut besser auspressen lässt [66, 67]. Vergleichend können die in Abbildung 3.7 dargestellten Ergebnisse aus [68] herangezogen werden. Sie zeigen, dass mit einem statischen Laborverdichtungsverfahren die höchsten Raumdichten erzielt werden können.

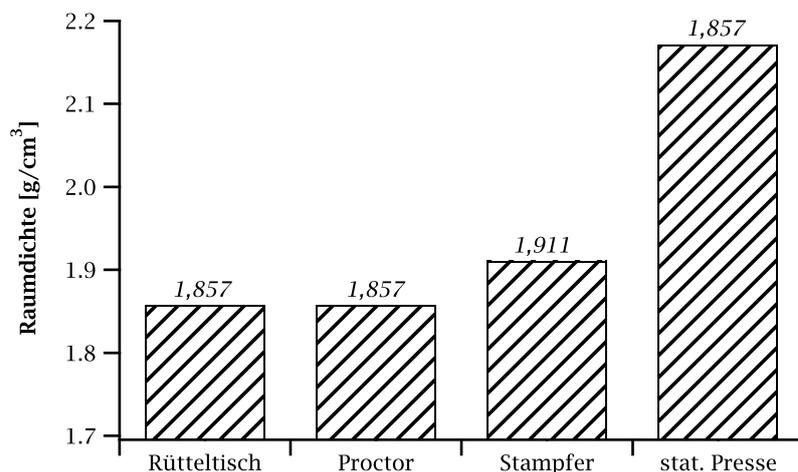


Abbildung 3.7: Wirkung unterschiedlicher Verdichtungsverfahren für Emulsionsmischgut

Die in der Fachliteratur dokumentierten Verdichtungsverfahren für Emulsionsmischgut nehmen im Grunde alle Bezug auf ein aus Frankreich stammendes Verdichtungsverfahren zur Herstellung und Prüfung von Probekörpern aus bitumengebundenem Mischgut (*Duriez-Verfahren*) [69]. Die Probekörper werden hierbei nach dem Doppelkolbenprinzip durch eine statische Auflast verdichtet, deren Größe sich nach dem enthaltenen Größtkorn richtet:

- für Größtkorn ≤ 14 mm: 60 kN (11,94 N/mm²)
- für Größtkorn > 14 mm und < 32 mm: 120 kN (10,61 N/mm²)

Auch die Probekörperdurchmesser und die Mischguteinwaagen sind in Abhängigkeit des enthaltenen Größtkorns verschieden:

- für Größtkorn ≤ 14 mm: 8 cm bei 1,0 kg Einwaage
- für Größtkorn > 14 mm und < 32 mm: 12 cm bei 3,5 kg Einwaage

Bei einer angenommenen mittleren Raumdichte von $2,300 \text{ g/cm}^3$ ergeben sich also folgende Probekörperhöhen:

- für Größtkorn ≤ 14 mm: ca. 8,5 cm
- für Größtkorn > 14 mm und < 32 mm: ca. 13,5 cm

Es werden mehrere Probekörper hergestellt, die man 7 Tage altern (reifen) lässt. Ein Teil der Probekörper wird danach weitere 7 Tage trocken an der Luft gelagert, der andere während des gleichen Zeitraumes im Wasser. Anschließend werden die Probekörper einer einaxialen Druckprüfung unterzogen. Die Druckprüfung mit und ohne Wasserlagerung erlaubt die Einschätzung des Haftverhaltens des verwendeten Bindemittels bzw. der Wasserempfindlichkeit des Mischgutes. Das Duriez-Verfahren schreibt somit sehr genau die Probekörperherstellung und Prüfung vor; die Probekörpergrößen und Prüfmethode weichen jedoch stark vom deutschen Regelwerk ab.

In [67] wird daher für die Eignungsprüfung von emulsionsgebundenem Mischgut eine an das Duriez-Verfahren angelehnte Methode vorgeschlagen, die auf vorhandene Prüftechnik zurückgreift und bei der die ermittelten Kennwerte mit denen der in Deutschland üblichen Bauweisen vergleichbar sind. Die Probekörper besitzen die Abmessungen von Marshall-Probekörpern, werden aber statisch nach dem Doppelkolbenprinzip verdichtet. Die Auflast beträgt 65 kN, muss nach 5 min erreicht sein und für weitere 5 min gehalten werden. Diese Last entspricht einer eingetragenen Druckspannung von $8,02 \text{ N/mm}^2$. Mit diesem Verdichtungsverfahren werden Raumdichten erreicht, die mit denen realer Baumaßnahmen vergleichbar sind. Als Prüfverfahren wird die Marshall-Prüfung bei 60°C empfohlen. Zuvor müssen die Probekörper 14 Tage nach der Systematik des Duriez-Verfahrens lagern (Luft- bzw. Luft-/Wasserlagerung). In Tabelle 3.7 sind Marshall-Stabilitäten und -Fließwerte von Probekörpern aufgeführt, die mit diesen Methoden hergestellt und geprüft wurden, um die damit erreichbaren Größenordnungen zu verdeutlichen. Bis auf einen Wert nach Luft-/Wasserlagerung liegen alle Stabilitäten deutlich über 2 kN, dem Mindestwert für Asphalttragschichten nach den ZTV T-StB 95/02 [15]. Durch die Wasserlagerung ergibt sich im Allgemeinen ein Stabilitätsabfall, der als Maß für die Wasserempfindlichkeit des Mischgutes angesehen werden kann. In Anlehnung an die Prüfsystematik des Duriez-Verfahrens muss die Stabilität nach Luft-/Wasserlagerung mindestens 50% der Stabilität nach Luftlagerung betragen. Ansonsten ist die Wasserempfindlichkeit des Mischgutes zu hoch.

Bei der am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München angewendeten Methode werden ebenfalls Probekörper mit den Dimensionen von Marshallkörpern hergestellt, wie oben beschrieben gelagert und anschließend geprüft. In

Tabelle 3.7: Ergebnisse von Marshall-Versuchen bei 60 °C an Probekörpern aus Emulsionsmischgut [67]

14 d Luftlagerung		14 d Luft-Wasser-Lagerung		
Stabilität in kN	Fließwert in mm	Stabilität in kN	Fließwert in mm	Stabilitäts- abfall in %
3,55	6,70	3,05	6,00	14
3,70	2,80	2,90	4,50	12
2,46	—	1,60	—	35
4,90	6,80	3,90	7,00	20
3,30	3,80	2,50	4,20	25

Abwandlung des Verfahrens nach [67] findet die Probekörperherstellung jedoch mit einer direkt aus dem Duriez-Verfahren abgeleiteten statischen Auflast von 100 kN statt. Diese ergibt sich aus der Umrechnung der im Duriez-Verfahren verwendeten Flächenpressung auf die Stirnseitenfläche eines Marshall-Probekörpers nach Gleichung 3.4. Die Verdichtungskraft wird über beide Probekörperstirnseiten in das Mischgut eingetragen. Mit dieser Vorgehensweise werden Hohlraumgehalte erzielt, die in den nach ZTV T-StB 95/02 zulässigen Größenordnungen liegen.

$$F = 11,94 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (101,6 mm)^2 = 96,8 kN \approx \underline{100 kN} \quad (3.4)$$

Nach der 14-tägigen Luft- bzw. Luft-/Wasserlagerung der Probekörper werden diese im konventionellen Marshall-Versuch bei 60 °C geprüft. Die Stabilitäten und Fließwerte liegen hierbei erfahrungsgemäß im Bereich der in Tabelle 3.7 aufgeführten Werte.

Diese Betrachtungen zeigen, dass es für die Eignungsprüfung von Emulsionsmischgut sehr verschiedene prüftechnische Ansätze gibt. Wegen der oftmals uneinheitlichen Vorgehensweisen ergibt sich aus den in der Literatur dokumentierten Einzelergebnissen kein zusammenhängendes Bild über die erreichbaren bautechnischen Eigenschaften. Ein direkter Vergleich der Gebrauchseigenschaften mit denen der hydraulisch gebundenen Mischgutvarianten ist im Grunde unmöglich, weil für diese in Anlehnung an die Betontechnologie eine Druckprüfung vorgesehen ist [70].

Umweltrelevante Aspekte

Bezüglich der Immobilisierung von PAK und Phenolen werden den Bitumenemulsionen in der Fachwelt gewisse Vorteile gegenüber anderen Bindemitteln (hydraulisch oder Schaumbitumen) unterstellt. Man geht im Allgemeinen modellhaft davon aus, dass sich die Emulsion als Film um das pechhaltige Material legt und nach Beendigung des Brechvorganges eine geschlossene Bitumenschicht vorliegt. Diese soll den Wasserzutritt von außen verhindern und so die eingeschlossenen PAK bzw. Phenole gegen eine Elution

abschirmen. Wenn dieses Modell zutreffend ist, könnten die PAK- und Phenolfrachten im Eluat bereits durch die bloße Umhüllung (ohne Oberflächenreduktion durch Verdichtung) abgesenkt werden, sofern die Emulsion richtig auf das Ausgangsmaterial abgestimmt ist. In diesem Fall besäße die Emulsionsbauweise einen Sicherheitsvorteil gegenüber den anderen Verfahren und wäre in Bezug auf die Schadstoffimmobilisierung unempfindlicher gegenüber Verdichtungsmängeln.

In jedem Fall muss die verwendete Bitumenemulsion frei von Löse- und Fluxmitteln sein. Anionische Bitumenemulsionen eignen sich für die Wiederverwertung phenolhaltiger Ausbaustoffe wegen ihres basischen Charakters nicht. Hierfür sollten ausschließlich kationische Bitumenemulsionen zur Anwendung kommen, die die Bildung wasserlöslicher Phenolate durch ihren sauren Charakter vermindern (siehe Kapitel 3.3.3). Daher sind für die Bindung von Mischgranulat mit pechhaltigen Ausbaustoffen der Verwertungsklasse C gemäß RuVA-StB (siehe Tabelle 3.5 auf Seite 27) nur kationische Emulsionen mit einem pH-Wert ≤ 3 geeignet [10].

Ergebnisse von Elutionsversuchen (siehe Beispiel in Tabelle 3.8) zeigen, dass die PAK- und Phenolgehalte der Eluate aller Proben durch eine Einkapselung mit kationischer Bitumenemulsion um mindestens eine Zehnerpotenz reduziert werden können [71]. Leider geht aus der Literaturstelle nicht hervor, ob es sich um verdichtete oder unverdichtete Proben handelte, so dass sich nicht abgrenzen lässt, ob die Reduktion der PAK- und Phenolfrachten ausschließlich auf die Umhüllung mit Bitumenemulsion zurückzuführen ist oder auch die Reduktion der eluierbaren Oberfläche eine Rolle spielte. Weiterhin ist unbekannt, ob die PAK als Summenparameter nach EPA oder TrinkwV⁹ bestimmt wurden, weswegen ein Vergleich mit den Ergebnissen anderer Arbeiten nicht möglich ist. Das Erscheinungsdatum (2/89) lässt vermuten, dass es sich um die Summe der PAK nach TrinkwV handelt. In anderen Veröffentlichungen wird die gute schadstoffimmobilisierende Wirkung der Umhüllung mit Bitumenemulsion bestätigt, insbesondere im Hinblick auf die Phenolfrachten. Beispielsweise konnte in [72] der Phenolindex des pechhaltigen Granulates von 188,0 µg/l durch Umhüllung mit Bitumenemulsion auf 60 µg/l verringert werden. Weitere Quellen dokumentierten die Ergebnisse mit dieser Bauweise leider zumeist unvollständig. Es fehlen verwertbare Angaben zu den Schadstoffgehalten der Ausbaustoffe und zu den Randbedingungen der Analysen, so dass die Quellen im Sinne dieser Arbeit nicht auswertbar sind.

3.6.3 Kaltrecycling mit hydraulischen Bindemitteln

Die Technologie des Kaltrecyclings mit hydraulischen Bindemitteln beruht im Wesentlichen auf den gleichen Methoden wie die Bodenverfestigung oder die Herstellung einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT). Anforderungen an die Baustoffe und die Bauausführung dieser Bauweise sind in [70] und ab der Veröffentlichung in [10] geregelt.

⁹Die TrinkwV definiert eine Liste von 6 umweltrelevanten PAK, die eine Teilmenge der 16 PAK nach EPA-Standard 610 sind.

Tabelle 3.8: Beispiel für Ergebnisse von Elutionsversuchen an emulsionsgebundenen pechhaltigen Materialien [71]

Probe			PAK [mg/kg] ^a	Phenolindex [mg/kg] ^a
1	Teersand	original	0,033	0,32
		eingekapselt	0,004	0,018
2	Vermörtelung	original	0,007	0,136
		eingekapselt	0,0005	0,086
3	Teersand	original	1,151	13,0
		eingekapselt	0,011	0,4

^aNach Ansicht des Autors müsste es [mg/l] lauten.

Durch die hydraulische Bindung weisen entsprechende Schichten bei ordnungsgemäßer Ausführung gute Anfangsfestigkeiten auf und sind schon nach einem Tag befahrbar [73]. Für die Bauausführung ergibt sich daraus eine gewisse Sicherheit, weshalb dieses Verfahren sehr häufig und gern angewendet wird. Gleichzeitig ist die hydraulische Bindung aber auch ein Nachteil der Bauweise, da bei hydraulisch gebundenen Schichten wegen ihres Abbindeverhaltens und der Empfindlichkeit gegenüber thermisch induzierten Spannungen rissbeschränkende Maßnahmen getroffen werden müssen. So sind hydraulisch gebundene Kaltrecycling-Schichten ebenso wie HGT im Abstand von maximal 5 m zu kerben [70]. Wird dies vernachlässigt, schlagen die Risse nach oben durch und ermöglichen ungehinderten Wasserzutritt. Die Immobilisierung der PAK und Phenole beruht bei dieser Bauweise auf der Einkapselung der Einzelstücke und einer möglichst hohen Dichte der eingebauten Schicht. Eine hohe Dichtigkeit der fertigen Schicht vermindert die für die Elution zur Verfügung stehende Oberfläche, indem die innere Oberfläche dem auslaugenden Medium weitgehend entzogen wird [74]. Eine echte chemische Bindung zwischen hydraulischem Bindemittel und den PAK bzw. Phenolen ergibt sich nach [73] nicht. Die Einbindung der PAK verursacht der Literatur zufolge keine Schwierigkeiten, bei der Immobilisierung von Phenolen kann es aber zu Problemen kommen. Zementsuspensionen weisen durchaus pH-Werte im Bereich um 13 auf, sind also stark basisch. Wie im Kapitel 3.3.3 beschrieben, erhöht sich die Löslichkeit der Phenole im basischen Milieu drastisch, so dass sie durch zutretendes Wasser leicht aus entsprechenden Schichten ausgewaschen werden können. In [75] wird aus den Untersuchungsergebnissen geschlussfolgert, dass die Phenolgehalte der Eluate mit Zement behandelte granulierter Proben sogar über denen der Ausgangsmaterialien liegen. Diese zahlenmäßig nicht belegte Feststellung stimmt mit den Ergebnissen in [76] überein. Die Solubilisierung der Phenole ist bei der Wiederverwertung pechhaltiger Ausbaustoffe die wesentliche Schwachstelle des Kaltrecyclings mit hydraulischen Bindemitteln. Um dieses zu unterbinden, müsste ein Wasserzutritt zu den entsprechenden Schichten

vollständig vermieden werden. Das ist baupraktisch jedoch nicht möglich und über die Liegezeit solcher Schichten auch nicht sicher zu stellen. Daher lassen sich diese Schichten nur so gut wie möglich gegen Wasserzutritt schützen, indem man die dem Niederschlagswasser zugänglichen Außenränder mit Bitumen, Bitumenemulsion oder bitumenhaltiger Schlämme abdichtet [70] und sie mit Asphaltmischgut überbaut.

3.6.4 Kaltrecycling mit hydraulischen Bindemitteln und Bitumenemulsion

Bezüglich der verwendeten Materialien handelt es sich hierbei um eine Kombination der in den beiden vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Kaltrecyclingverfahren. Es wird eine sog. *Komplexbindung*¹⁰ angestrebt, die eine Kombination der hydraulischen Bindung und der Bindung mit bitumenhaltigen Bindemitteln darstellt. Dieses Verfahren wird daher auch als *Komplexrecycling* bezeichnet. Abbildung 3.8 zeigt die Bruchflächen eines aufgebrochenen Bohrkernes aus Komplexrecyclingmischgut. Die um die Gesteinskörner herum sichtbaren hellen bzw. dunklen Bereiche zeigen die homogene Vermischung hydraulischen und bitumenhaltigen Bindemittels.

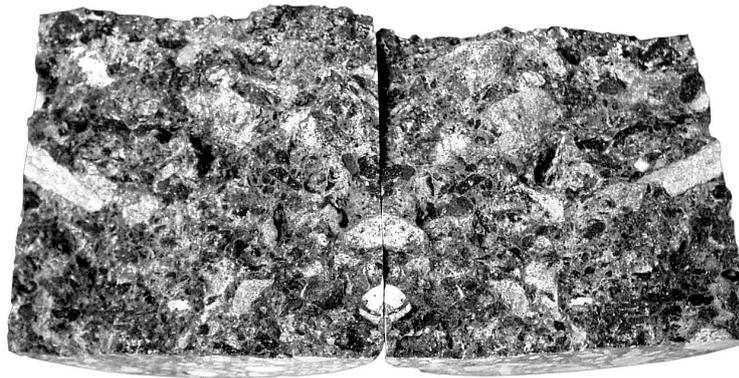


Abbildung 3.8: Bruchflächen eines Bohrkerns aus Komplexrecyclingmischgut [42]

Die Komplexbindung soll die Vorteile beider Bindungsarten vereinen und deren spezifische Nachteile ausgleichen. So soll die hydraulische Komponente eine Festigkeit erbringen, die mit Bitumenemulsion allein nur schwer, z. B. bei sehr günstigen Kornabstufungen, erreichbar wäre. Die Bitumenemulsion soll dagegen die Rissempfindlichkeit rein hydraulisch gebundener Gemische ausgleichen und durch ihren organischen Charakter die Einbindung von PAK und Phenolen verbessern. Die angestrebte mechanische

¹⁰Der Begriff Komplexbindung bezieht sich nur auf das gleichzeitige Vorhandensein hydraulisch bzw. mit Bitumen gebundener Bestandteile. Das Bitumen und das hydraulische Bindemittel gehen keine gemeinsame Bindung ein.

Wirksamkeit der Komplexbindung wurde unter anderem durch eine frühere Forschungsarbeit des Autors nachgewiesen [42]. Als entscheidend hat sich darin die richtige und auf das pechhaltige Ausgangsmaterial abgestimmte Dosierung beider Bindemittel herausgestellt. Die mengenmäßigen Bindemittelanteile lassen sich jedoch nach dem Abbinden der hydraulischen Bindemittelkomponente nicht mehr bestimmen. Daher müssen deren Anteile indirekt über die mechanischen Bindungseigenschaften ermittelt werden. Entsprechend des jeweiligen Verhältnisses der hydraulischen und der bitumentypischen mechanischen Bindungseigenschaften, gliedern sich die Komplexrecyclinggemische in bitumendominant¹¹ bzw. hydraulisch dominant¹² gebundene Gemische. Die Unterscheidung der mechanischen Bindungseigenschaften erfolgt anhand des statischen Elastizitätsmoduls E_{stat} , bestimmt im Spaltzugversuch an zylindrischen Probekörpern [65, 77]. Der Spaltzugversuch ist für die mechanische Ansprache der Komplexrecyclinggemische besonders geeignet, weil er im Gegensatz zu anderen etablierten Prüfverfahren sowohl auf hydraulisch gebundene als auch auf bitumengebundene Gemische anwendbar ist. Um deren mechanische Bindungseigenschaften beurteilen zu können ist es erforderlich, das Spannungs-Dehnungsverhalten der Gemische zu untersuchen. Dieses drückt sich im Elastizitätsmodul als Quotient aus Spannung und Dehnung aus. Zur Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls E_{stat} im Spaltzugversuch ist also zusätzlich zur klassischen Spaltzugprüfung die Messung der Querdehnung u erforderlich. Der statische Elastizitätsmodul errechnet sich dann nach Gleichung 3.5. Auf deren Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet. Der Autor hat den Berechnungsansatz sowie prüftechnischen Randbedingungen und Voraussetzungen in [78] ausführlich dargestellt.

$$E_{stat} = \frac{P \times (0,273 + \mu)}{h \times u} \quad (3.5)$$

Darin sind:

E_{stat}	Statischer E-Modul in N/mm ²
P	Bruchlast in N
μ	Querdehnungszahl (für bitumengebundene Gemische ca. 0,35)
h	Mantelhöhe der zylindrischen Probe in mm
u	Querdehnung der Probe bei Erreichen von P in mm

Aufgrund der erreichbaren höheren Festigkeiten wird dieses Kaltrecyclingverfahren häufiger angewendet als die reine Emulsionsbauweise. Es kann sowohl im Zentral- als auch im Baustellenmischverfahren durchgeführt werden. Anforderungen für das Zentralmischverfahren sind im MVBK geregelt [10]. Im Falle des Baustellenmischverfahrens spricht man vom *Kaltrecycling in situ*, für welches das *Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau (M KRC)* gilt [65].

¹¹Gemische mit eher hohen Dehnungen und geringeren Festigkeiten

¹²Gemische mit eher geringen Dehnungen und hohen Festigkeiten

Von wesentlicher Bedeutung für die Qualität des Komplexrecyclingmischgutes ist die Einhaltung der richtigen Dosierreihenfolge der beiden Bindemittel. Um ein Mischgut mit homogener Bindemittelverteilung zu erzeugen, muss zuerst das hydraulische Bindemittel gleichmäßig im Ausbaustoff verteilt sein. Erst dann darf die Bitumenemulsion zudosiert werden. Die Einhaltung dieser Reihenfolge ist sehr wichtig, weil die hohe spezifische Oberfläche des hydraulischen Bindemittels Einfluss auf den Brechvorgang der Emulsion hat und diesen in gewissem Maße steuert und weil das hydraulische Bindemittel bei Vorhandensein von Bitumenemulsion nicht homogen verteilt wird sondern einfach verklumpt.

In der Praxis wird beim Komplexrecycling einem potenziellen Festigkeitsmangel häufig durch die Überdosierung der hydraulischen Komponente »entgegengewirkt«, insbesondere dann, wenn die zugegebenen Neubindemittel nur beim Fräsen mit dem Ausbaustoff vermengt werden und keine richtige Zwangsmischung stattfindet. Die Homogenisierungsmängel solcher Verfahren sollen durch den erhöhten Anteil an hydraulischem Bindemittel kompensiert werden und die nach [10] und [65] für die Kontrollprüfung vorgesehene Spaltzugfestigkeit lässt sich leichter erreichen. Bei einer im Jahre 1998 durch den Autor vorgenommenen Untersuchung sächsischer Erprobungsstrecken für die Komplexrecyclingbauweise wurden an einigen Stellen Bohrkerne entnommen, die augenscheinlich einer HGT gleichkamen. In den Deckschichten der betroffenen Strecken wurden ausgeprägte Querrisse festgestellt, wie sie z. B. bei ungenügend gekerbten HGT auftreten [42]. Dieser Umstand ist wegen der Erzeugung eines basischen Milieus durch die Überdosierung hydraulischen Bindemittels und der damit einhergehenden verstärkten Solubilisierung der Phenole (siehe Kapitel 3.3.3) insbesondere bei der Wiederverwertung pechhaltiger Schichten mit braunkohlestämmigem Straßenteerpech als äußerst kritisch einzuschätzen.

Die in den RuVA-StB geforderten Grenzwerte für die PAK- und Phenolkonzentrationen in den Eluaten von Probekörpern (siehe Tabelle 3.6 auf Seite 27) können mit diesem Kaltrecyclingverfahren erfüllt werden. Entsprechende Ergebnisse von Eignungsprüfungen sind unter anderem in [44] dokumentiert. Die Immobilisierung der Schadstoffe geht vermutlich auf das Zusammenwirken mehrerer Wirkungen zurück. Offenkundig reduziert die Bindemittelzugabe die Hohlraumanteile, welche durch die mechanische Verdichtung des Mischgutes allein nicht geschlossen werden könnten (Porosität). Außerdem verbindet sich während des Misch- und Einbauprozesses das hydraulische Bindemittel in erster Linie mit dem Zugabewasser und dem aus der Bitumenemulsion austretenden Wasser, verdrängt dadurch das in der Emulsion enthaltene Bitumen von den freien Gesteinsoberflächen und lagert sich bevorzugt an diese an. Die Affinität des anorganischen Zementleims zu den organischen, pechhaltigen Bestandteilen ist eher gering, so dass diese Oberflächen vom Zementleim weit weniger beansprucht werden. Das Bitumen hat als organische, artverwandte Substanz dagegen eine sehr hohe Affinität zu den pechhaltigen Mischgutbestandteilen und lagert sich bevorzugt an diesen

Flächen an. Dadurch hüllt es die pechhaltigen Substanzen ein und reduziert so die PAK- und Phenolelution.

3.6.5 Kaltrecycling mit Schaumbitumen

Das Kaltrecycling mit Schaumbitumen wurde in den Neunziger Jahren insbesondere von der Firma WIRTGEN GMBH propagiert und angewendet. Als Vorteile des Schaumbitumenverfahrens führen die Befürworter die höhere Wirtschaftlichkeit gegenüber den Emulsionsbauweisen ins Feld. Diese liegt ihrer Argumentation zufolge in den niedrigeren Kosten für das verwendete Bitumen anstelle der teureren Bitumenemulsion sowie dem geringeren Transportaufwand aufgrund des niedrigeren Volumens begründet. Des Weiteren ist reines Bitumen im Gegensatz zu Bitumenemulsion praktisch überall verfügbar [79].

Neben der aufwendigen Eignungsprüfung, bildet die mit dem Schaumbitumenverfahren erzeugte Verteilung des Bitumens im Mischgut den Hauptnachteil bei der Wiederverwertung pechhaltiger Materialien. Das Bitumen kann zwar homogen in das Ausbaumaterial eingemischt werden, eine Umhüllung der einzelnen Körner gelingt mit diesem Verfahren jedoch nicht. Das Bitumen klebt prinzipbedingt punktuell und fleckenartig an den Kornoberflächen, bildet aber keine geschlossenen Filme aus. Schaumbitumen wird durch den schlagartigen Kontakt von heißem Bitumen und Wasser erzeugt. Das Wasser wird dem heißen Bitumen zugehüst und verdampft sofort. Dies führt zum blitzartigen Aufschäumen des Bitumens. Die sich dadurch bildenden Bindemittelfilme werden durch die fortschreitende Volumenvergrößerung zu feinen Bindemittelteilchen zerrissen, die im sofort darauf folgenden Mischprozess in das Ausgangsmaterial eingemischt werden. Für die Verklebung der einzelnen Körner ist diese Technologie ausreichend, für die sichere Immobilisierung der Schadstoffe jedoch von großem Nachteil. Die Reduzierung der PAK- und Phenolfrachten basiert daher fast ausschließlich auf der Reduktion der von außen wasserzugänglichen Oberflächen. Aus diesem Grund kann von einer sicheren Schadstoffimmobilisierung bei diesem Verfahren keine Rede sein.

4 Untersuchungsprogramm

4.1 Untersuchungsprogramm

Zur Beantwortung der in der Zielstellung (siehe Seite 3 formulierten Fragestellungen, dient das in den folgenden Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.5 erläuterte Untersuchungsprogramm.

4.1.1 Erweiterte Untersuchungen zum Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen

Wie in Kapitel 3.6.2 beschrieben, beeinflusst das Brechverhalten einer Bitumenemulsion maßgeblich die Verarbeitungseigenschaften des entsprechenden Kaltrecyclingmischgutes. Die genaue Kenntnis des Brechverhaltens kann daher über Erfolg und Misserfolg einer Kaltrecyclingmaßnahme entscheiden. Deswegen ist es wünschenswert, das Brechverhalten von Bitumenemulsionen mit einem verbesserten, aber an die europäische Normung angelehnten Prüfverfahren zu untersuchen. Wesentliche Ziele im Rahmen dieser Arbeit sind die weitestgehende Befreiung des Untersuchungsverfahrens von subjektiven Einflüssen und die Ableitung einer oder mehrerer charakteristischer Größen zur Beschreibung des Brechverhaltens kationischer Bitumenemulsionen. Hierfür ist eine Apparatur erforderlich, welche die gleichmäßige Zudosierung einer mineralischen Substanz zu den Bitumenemulsionsproben ermöglicht und deren homogene und reproduzierbare Durchmischung sicherstellt. Außerdem muss die Prüfeinrichtung zur kontinuierlichen Erfassung der Messgröße(n) in der Lage sein, um in der Versuchsauswertung den Ablauf des Brechprozesses und eventuelle charakteristische Kenngrößen ableiten zu können.

Die Versuche beziehen sich nur auf kationische Bitumenemulsionen, da anionische Bitumenemulsionen für das Kaltrecycling pechhaltiger Straßenausbaustoffe nur eine sehr untergeordnete Rolle spielen und darüber hinaus abweichende Versuchsbedingungen erfordern.

4.1.2 Modellversuche zur PAK-immobilisierenden Wirkung von Bitumenemulsionen

Diese Modellversuche haben den Nachweis der tatsächlichen PAK-immobilisierenden Wirkung von Bitumenemulsionen durch Umhüllung pechhaltiger Substanzen unter reproduzierbaren Bedingungen zum Ziel. Dafür ist es zunächst erforderlich, ein praktikables und ungefährliches Verfahren zur Herstellung pechhaltigen Mischgutes im Labor zu finden. Das Labormischgut selbst muss eine hohe Homogenität aufweisen, um

sicherzustellen, dass innerhalb des Mischgutes und zwischen allen davon herzustellenden Chargen vergleichbare Oberflächenverhältnisse vorliegen (vergleichbare spezifische Oberfläche und Oberflächenbeschaffenheit der Einzelkörner). Zusätzliche Effekte mit Einfluss auf die Schadstoffaustragsraten, wie z. B. die Verringerung der eluierbaren Oberfläche durch Verdichtung oder Koagulationen, sind so weit wie möglich auszuschließen. In die Versuche wird ein repräsentativer Querschnitt von Bitumenemulsionen einbezogen. Zur Bestimmung quantitativer Einflüsse auf die PAK-Immobilisierung wird das pechhaltige Modellmischgut mit variierenden Bitumenmengen umhüllt. Als Bewertungskriterium für die Wirksamkeit der Umhüllung gilt die PAK-Konzentration im Trogeluat der umhüllten Proben nach 24 h Elutionsdauer. Als Referenz für die vergleichende Bewertung wird die PAK-Konzentration im Trogeluat der unbehandelten Proben nach 24 h Elutionsdauer herangezogen. In die Bewertungen sollen auch kompositionelle Merkmale der Bitumenemulsionen einfließen. Bezüglich der PAK-Immobilisierung sind auch die Schichtdicken der erzeugten Bitumenfilme von Interesse, weil dazu in der Literatur bislang keinerlei Daten dokumentiert sind.

4.1.3 Untersuchungen an den bautechnisch nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen

In Voruntersuchungen sind zunächst sowohl bautechnische (Korn- und Stückgrößenverteilung, Bindemittelgehalt und optimaler Wassergehalt) als auch umweltrelevante Kenngrößen (PAK-Konzentration und Phenolindex im Trogeluat nach 24 h Elutionsdauer) der unbehandelten pechhaltigen Ausbaustoffe zu bestimmen. In den darauf folgenden Eignungsprüfungen mit allen pechhaltigen Ausbaustoffen und einer ausgewählten Bitumenemulsion sollen durch Variation der Bitumenzugabemengen Rezepturen für jeden pechhaltigen Ausbaustoff festgelegt werden. Die pechhaltigen Ausbaustoffe bleiben hierbei hinsichtlich ihrer Stückgrößenverteilungen unverändert (keine bautechnische Optimierung der Gemische). In den Trogeluaten dieser Mischgutvarianten sowie der daraus herzustellenden Probekörper werden die PAK-Konzentrationen und Phenolindizes bestimmt. Weitere Proben und Probekörper dienen zur Ermittlung der bautechnischen Eigenschaften (Marshall-Stabilitäten und -Fließwerte sowie Hohlraumgehalte). Da die Wiederverwertung von Kaltrecyclingmischgut aus pechhaltigen Materialien in erster Linie in Tragschichten erfolgt, wird entgegen den Regelungen des M VB-K [10] zur bautechnischen Beurteilung der Gemische die Marshall-Prüfung nach DIN 1996 Teil 11 [5] herangezogen. Damit können die bautechnischen Prüfgrößen den Anforderungen der ZTV T-StB [15] gegenübergestellt werden. Dies ebnet den Weg für die mögliche Einordnung der Emulsionsbauweise in das Standard-Regelwerk.

Die aus diesen Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse ermöglichen die Auswahl einer geeigneten Referenzrezeptur für jeden Ausbaustoff, wobei das Hauptaugenmerk bei der Eignungsbewertung auf den umweltrelevanten Eigenschaften liegt. Diese haben für

die *schadlose* Wiederverwertung pechhaltigen Materials in jedem Falle übergeordnete Bedeutung.

Unter Beibehaltung der ermittelten Referenzrezepturen werden mit weiteren Bitumenemulsionen Mischgutproben und Probekörper hergestellt. Von wesentlicher Bedeutung hierbei ist die Einhaltung der in den Eignungsprüfungen festgelegten Bitumenzugabemengen. Bei konstanter Emulsionszugabe wären die Ergebnisse wegen der unterschiedlichen Bitumengehalte der einzelnen Bitumenemulsionen zwangsläufig verschieden. Dieser Effekt ist auszuschließen. Die Bestimmung der bautechnischen und umweltrelevanten Parameter erfolgt analog zu den oben beschriebenen Eignungsprüfungen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die vergleichende Bewertung der erzielbaren bautechnischen Eigenschaften und Schadstoffimmobilisierungsraten bei Verwendung unterschiedlicher Bitumenemulsionen. Desweiteren sind Aussagen darüber möglich, welche Anforderungen der ZTV T-StB ein Kaltrecyclingmischgut aus bautechnisch nicht verbesserten Ausbaustoffen überhaupt erfüllen kann.

4.1.4 Untersuchungen an den bautechnisch aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen

Die bautechnische Aufbereitung der pechhaltigen Ausbaustoffe beinhaltet die Optimierung ihrer Stückgrößenverteilungen, da diese entscheidenden Einfluss auf Marshall-Stabilität und -Fließwert hat. Nach der Zerlegung der Ausbaustoffe in die üblichen Kornklassen, werden die ausgesiebten Bestandteile erforderlichenfalls durch Brechen bzw. Mahlen zu den fehlenden oder zu gering vertretenen Körnungen aufbereitet. Dadurch ist es bei der darauf folgenden Mischgutherstellung möglich, vorab ausgewählte Idealsieblinien entsprechend den Anforderungen der ZTV T-StB [15] zusammensetzen.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchen mit den bautechnisch nicht aufbereiteten Ausbaustoffen, werden für diese Untersuchungen drei Bitumenemulsionen ausgewählt, die eine hohe Spreizung der Ergebnisse erwarten lassen. Mischgut- und Probekörperherstellung sowie deren Untersuchung erfolgen analog zu den oben beschriebenen Eignungsprüfungen. Gleiches gilt für die Ergebnisauswertung, bei der ergänzend die Vergleiche zwischen den bautechnisch verbesserten und den bautechnisch nicht verbesserten Mischgutvarianten hinzukommen. Die bautechnische Aufbereitung der Ausbaustoffe reduziert deren extreme Heterogenität. Gleichzeitig kommen aber durch das Brechen bzw. Mahlen frische Bruchflächen an den Ausbaustoffen hinzu, die das für die Elution verfügbare Schadstoffpotenzial ungünstig beeinflussen. Die Ergebnisauswertung hat dann die Beantwortung der Frage zum Ziel, ob eine bautechnische Aufbereitung pechhaltiger Ausbaustoffe im Sinne einer *schadlosen* Wiederverwertung überhaupt machbar bzw. sinnvoll ist.

4.1.5 PAK- und Phenolanalytik

Die Eluate werden im Trogelutionsverfahren nach TP Min-StB Teil 7.1.2 [6] gewonnen. Die im FGSV-Arbeitspapier Nr. 27/3 [4] beschriebenen Verfahrensweisen dienen als Grundlage für die PAK- und Phenolanalysen, wobei die quantitative Bestimmung der PAK mittels GC/MS stattfindet.

Alle in der vorliegenden Arbeit dokumentierten Elutionen und chemischen Analysen fanden am LEHRSTUHL FÜR WASSERGÜTE UND ABFALLWIRTSCHAFT DER TU MÜNCHEN und am LEHRSTUHL FÜR TECHNOLOGIE BIOGENER ROHSTOFFE DER TU MÜNCHEN statt. Insofern stellen diese Versuche und Analysen keine eigene Leistung des Autors dar. Aus diesem Grunde wird hier auf eine genaue Beschreibung der angewendeten Probenvorbereitungs-, Extraktions- und Analyseverfahren verzichtet. Sie sind in [44] ausführlich beschrieben.

4.2 Untersuchte Bitumenemulsionen

Für die geplanten Untersuchungen sind insgesamt 10 handelsübliche Bitumenemulsionen vorgesehen. Bei Auswahl und Beschaffung der Proben sind folgende Aspekte zu beachten:

- Die Hersteller legen ihre Produktionsanlagen im Winter still, da Bitumenemulsionen nur in frostfreien Jahreszeiten verarbeitet werden können.
- Recyclingemulsionen werden von einigen Anbietern nur bei Bedarf produziert, weil die Nachfrage im Vergleich zu anderen Produkten geringer ist.
- Da Bitumenemulsionen zeitlich begrenzte Lagerstabilitäten haben, können immer nur die Mengen beschafft werden, die in absehbarer Zeit zu verarbeiten sind.

Um den Arbeitsfortschritt nicht zu verzögern, war es deswegen unvermeidbar, die Muster in mehreren Chargen zu beschaffen und ggf. auf Laborproben anstelle von Produktionsmustern auszuweichen. Tabelle 4.1 dokumentiert die ausgewählten Bitumenemulsionen und die Anzahl der jeweils untersuchten Chargen. Jede Emulsion wird im weiteren Verlauf der Arbeit mit der in Spalte 1 angegebenen Nummer bezeichnet.

Mit Ausnahme der Emulsion Nr. 6 handelt es sich um sog. Recyclingemulsionen. Die Emulsion Nr. 6 enthält anstelle eines Bitumens 160/220 ein mit Rapsöl angefluxtes Bitumen 70/100, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern. Sie ist eigentlich für Oberflächenbehandlungen konzipiert. UV-Licht und Sauerstoffkontakt sollen nach der Verarbeitung der Emulsion zur Verharzung des Rapsöls und damit zu einer »Rückverhärtung« des Bindemittels führen. Dies soll die ursprünglichen Eigenschaften des Ausgangsbitumens wiederherstellen. Da diese Bitumenemulsion ein neues, bautechnisch interessantes Produkt ist, wird sie ergänzend zu den klassischen Recyclingemulsionen in die Probenmatrix aufgenommen. Emulsion Nr. 8 ist mittlerweile nicht mehr erhältlich. Sie kann daher

nur für einen Teil der Untersuchungen verwendet werden. Aus den in den Kapiteln 3.5.3 und 3.6.2 erläuterten Gründen, ist im Probenfeld nur eine anionische Bitumenemulsion (Nr. 9) vertreten. Die Probenmatrix entspricht damit etwa den realen Marktverhältnissen.

Tabelle 4.1: Untersuchte Bitumenemulsionen

Nr.	Hersteller	Ladungsart	Bitumenart (lt. Hersteller)	Bitumensorte (lt. Hersteller)	Chargen
1	a	kationisch	Straßenbaubitumen	70/100+160/220 (Verschnitt)	2
2	b	kationisch	PmB	65	5
3	b	kationisch	Straßenbaubitumen	70/100	3
4	c	kationisch	Straßenbaubitumen	160/220	2
5	d	kationisch	Straßenbaubitumen	160/220	6
6	d	kationisch	Straßenbaubitumen	70/100+Rapsöl	6
7	e	kationisch	Straßenbaubitumen	70/100	2
8	f	kationisch	Straßenbaubitumen	70/100	1
9	d	anionisch	PmB + Zusatz	k. A.	3
10	g	kationisch	Straßenbaubitumen	70/100	5

An allen Chargen finden nach Anlieferung Probeneingangskontrollen statt. Die Prüfungen erfolgen entsprechend DIN 1995-3 [59] und den zugehörigen Prüfnormen¹. Auf die Darstellung der Ergebnisse der Eingangskontrollen wird verzichtet; sie sind in [44] vollständig dokumentiert.

4.3 Untersuchte pechhaltige Straßenausbaustoffe

Von den im Kapitel 3.4.1 aufgeführten vier Varianten pechhaltigen Straßenaufbruchs wird jeweils eine Probe beschafft. Diese steht stellvertretend für die jeweilige Kategorie. Trotzdem sind die Ergebnisse der Untersuchungen nicht unbedingt auf andere Ausbaustoffe der gleichen Kategorien übertragbar, da pechhaltige Ausbaustoffe naturgemäß sehr heterogen sind. Im Kapitel 3.4.1 wurde das eingehend erläutert. Tabelle 4.2 stellt Art und Herkunft der Materialien sowie die im weiteren Verlauf der Arbeit benutzten Kurzbezeichnungen für die Ausbaustoffe dar.

¹Die DIN EN 13808 [58] sowie die meisten der entsprechenden europäischen Prüfnormen hatten während des Bearbeitungszeitraumes noch Entwurfsstatus.

Tabelle 4.2: Untersuchte pechhaltige Ausbaustoffe

	Pechgranulat steinkohle- stämmig	Pechgranulat braunkohle- stämmig	Granulat mit Carbositumen	Teersand stein- kohlestämmig
Kurzbezeich- nung	S	B	C	T
Herkunft	Bayerische Asphalt- mischwerke, Hofolding	B 247 bei Gotha, Langensalzaer Str.	Autobahn- zubringer BAB A5 bei Offenburg	Baustellen- halde auf BAB A7
Entnahme	Werkshalde	Ausbauhalde	Ausbauhalde	Ausbauhalde
Beschaffenheit	Granulat, gebrochen	Granulat, unbehandelt	Fräsgut, ungesiebt	Aushub

5 Untersuchungen zum Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen

5.1 Vorbemerkungen

In den Kapiteln 3.5.3 und 3.6.2 sind Ablauf und Bedeutung des Brechvorganges von Bitumenemulsionen ausführlich beschrieben. Kapitel 3.5.4 stellt die üblichen Prüfverfahren zur Untersuchung ihres Brechverhaltens dar und verdeutlicht, dass beide Verfahren für die *eingehende* Analyse dieser fundamentalen Eigenschaft ungeeignet sind.

Aus den dort erläuterten Gründen wird im Rahmen dieser Arbeit ein weiterentwickelter Versuch zur besseren Untersuchung und Beurteilung des Brechverhaltens von Bitumenemulsionen angewendet. Um außerdem gemäß der Zielstellung (siehe Kapitel 2 auf Seite 3) aus dessen Ergebnissen charakteristische Größen ableiten zu können, wird anschließend versucht, einen physikalisch interpretierbaren, mathematischen Zusammenhang zwischen den Messgrößen der Versuche zu finden. Gelingt dies, ist ein Stoffgesetz gefunden, dessen Parameter die exakte Beurteilung und Beschreibung des Brechverhaltens kationischer Bitumenemulsionen ermöglichen.

5.2 Versuchsprinzip

Das Versuchsprinzip lehnt sich an das halbautomatische Verfahren nach DIN EN 13075 Teil 1 an [63]. Entsprechend der in Kapitel 4.1.1 gesetzten Zielstellung, soll es jedoch möglichst frei von subjektiven Einflüssen sein. Aus diesem Grund muss der Versuch vollautomatisch ablaufen und die Messgröße(n) reproduzierbar sowie kontinuierlich erfassen. Das halbautomatische Verfahren nach DIN EN 13075 Teil 1 sieht einen Rührer vor, um den die Emulsionsprobe unter gleichzeitiger Zugabe von Quarzmehl¹ bewegt wird. Dieses Prinzip wird vom Grundsatz her beibehalten. Der Bitumenemulsion wird mit konstantem Volumenstrom Quarzmehl zudosiert. Das Gemisch aus Quarzmehl und Bitumenemulsion wird durch den ablaufenden Brechvorgang zunehmend kohäsiver, wodurch das Drehmoment ansteigt. Die Bitumenemulsion gilt als gebrochen, wenn sich ein kompakter Klumpen aus Bitumen, Quarzmehl und eingeschlossenem Restwasser gebildet hat.

Als wesentliche Messgröße lässt sich dabei das am Rührer angreifende Drehmoment erfassen, welches sich durch die stetige Zugabe von Quarzmehl mit der Zeit verändert. Folglich sind durch die Messtechnik mindestens Drehmoment und Zeit zu erfassen.

¹Quarzprüfstaub VP315-001 der QUARZWERKE GMBH Frechen nach DIN 52047-1 [8]

5.3 Einflussgrößen

Prinzipbedingt hängt das Drehmoment bei der oben beschriebenen Vorgehensweise nicht nur von der zunehmenden Kohäsion des Emulsion-Quarzmehlgemisches durch Brechen der Bitumenemulsion ab, es wird darüber hinaus von den folgenden drei Faktoren beeinflusst:

1. Viskosität der Bitumenemulsion,
2. innere Reibung durch Kornumlagerung (Rühren) der stetig zunehmenden Quarzmehlmenge,
3. äußere Reibung des Quarzmehls am Probenbehälter und am Rührer.

Um also den Brechprozess der Bitumenemulsionen in der Versuchsauswertung so exakt wie möglich beschreiben zu können, müssten diese drei Effekte beseitigt oder wenigstens quantifiziert werden. Die dafür gewählten Ansätze werden im Folgenden beschrieben.

Die Viskosität der frischen Emulsionsprobe (ohne Quarzmehl) ist im Versuch leicht erfassbar. Das Messpaddel rotiert zu Beginn des Versuches eine gewisse Zeit in einer ungestörten Emulsionsprobe, so dass deren Viskosität als Drehmoment gemessen und ihr Einfluss auf das Gesamtdrehmoment somit quantifizierbar wird. Die innere Reibung in der Quarzmehlprobe und deren äußere Reibung am Probenbehälter sowie am Rührer nehmen durch die kontinuierliche Quarzmehlzugabe zwangsläufig stetig zu. Das Drehmoment nimmt folglich kontinuierlich zu, auch wenn die Emulsion nicht bricht und sich keine kohäsive Wirkung des Bitumens ausbildet. Dieser Effekt ist dem gewählten Versuchsprinzip immanent. Es ist allerdings nicht vorstellbar, wie diese Effekte getrennt voneinander zu erfassen und zu beschreiben wären. Daher müssen diese beiden Effekte gemeinsam erfasst und quantifiziert werden.

5.4 Prüftechnik und Versuchsaufbau

Ähnliche Versuche wie das hier angestrebte Verfahren werden bei der Viskositätsprüfung von Zementsuspensionen durchgeführt. Daher lag es auf der Hand, diese bereits bewährte Prüftechnik für die Untersuchung des Brechverhaltens von Bitumenemulsionen zu nutzen. Als Prüfeinrichtung dient ein VISKOMAT NT der Firma SCHLEIBINGER GERÄTE TEUBERT UND GREIM GMBH. Dieses Gerät ist ein Universalviskosimeter, welches üblicherweise bei der Konsistenzbestimmung von Suspensionen wie Zementleim, Zementmörtel, Putz und ähnlichem Verwendung findet. Die Suspensionen dürfen eine maximale Korngröße von zwei Millimetern aufweisen. Das Messgefäß, welches die Proben aufnimmt, wird von außen durch ein umgebendes Wasserbad temperiert. Der Viskomat erfasst während des Versuchsablaufes im Wesentlichen das am starren Messpaddel angreifende Drehmoment, die Umdrehungsgeschwindigkeit des Messgefäßes,

die Probentemperatur und die Zeit. Die maschinelle und damit reproduzierbare Zudosierung des Quarzmehls erfolgt mit Hilfe einer speziell für diese Versuche angefertigten Schneckenförderanlage der Firma NOVEGA PRODUKTIONSSYSTEME GMBH, deren Fördergeschwindigkeit stufenlos einzustellen ist. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

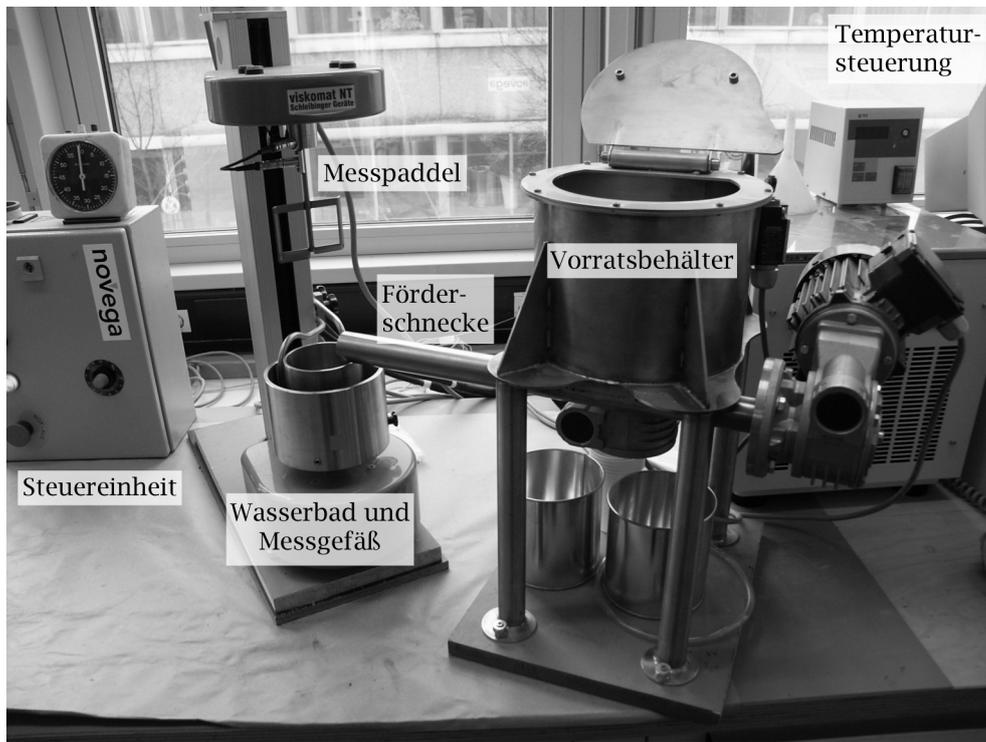


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Brechverhaltens kationischer Bitumenemulsionen

Im Vordergrund ist die Dosiereinrichtung zu sehen, welche das Quarzmehl aus dem Vorratsbehälter über die Förderschnecke mit einem konstanten Volumenstrom in das Messgefäß fördert. Unterhalb des Auslaufes der Förderschnecke ist das Messgefäß mit dem umgebenden Wasserbad zur Temperierung angeordnet. Beide sind während der Versuche fest miteinander verbunden und rotieren mit einer vorgegebenen Umdrehungsgeschwindigkeit. Über dem Messgefäß und dem Auslauf der Dosiereinrichtung ist das Messpaddel zu erkennen. Es wird starr in eine Kraftmessdose eingesetzt, welche das Drehmoment misst, das durch die rotierende Probe am Messpaddel angreift. Ein Messcomputer zeichnet kontinuierlich Messzeitpunkt, Umdrehungsgeschwindigkeit, Temperatur des Wasserbades und Drehmoment auf.

5.5 Prüfbedingungen

Für die Untersuchung des Brechverhaltens von Bitumenemulsionen sind in Vorversuchen zunächst geeignete Prüfbedingungen festzulegen. Diese müssen so gewählt sein, dass die Versuche möglichst einfach durchführbar sind und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Durchführbarkeit und Versuchsergebnisse hängen hierbei im Wesentlichen ab von:

- der Art des eingesetzten Messpaddels,
- der Umdrehungsgeschwindigkeit,
- dem Volumenstrom des zudosierten Quarzmehls,
- der geprüften Emulsionsmenge sowie
- der Prüftemperatur.

Als Ergebnis der Vorversuche mit unterschiedlichen Messpaddeln ist festzuhalten, dass eine homogene Vermischung von Bitumenemulsion und Quarzmehl nur mit dem in Abbildung 5.2 gezeigten Zementleimpaddel zu erreichen ist. Die Vorversuche zeigen darüber hinaus, dass sich Quarzmehl und Bitumenemulsion am besten vermischen lassen, wenn das Messgefäß mit 180 U/min rotiert. Niedrigere Umdrehungszahlen führen zur Ausbildung von Quarzmehlklumpen, welche die Drehmomentenmessung erheblich stören; bei noch höheren Umdrehungszahlen kann die Emulsion aus dem Gefäß geschleudert werden. Der Quarzmehlvolumenstrom wird auf 30 g/min festgelegt. Dieser Wert ergibt sich aus der nach DIN 52047 Teil 1 [8] vorgegebenen Dosiermenge von 5 g alle 10 s. Ebenfalls daraus übernommen werden die zu prüfende Emulsionsmenge von 100 g sowie die Prüftemperatur von 25 °C. Die teilweise Anlehnung der Prüfbedingungen an das bestehende Regelwerk stellt eine gewisse Vergleichbarkeit der Ergebnisse her.

5.6 Versuchssystematik und -durchführung

Um den Einfluss von innerer und äußerer Reibung im Quarzmehl zu quantifizieren (siehe Kapitel 5.3), sind zunächst Vorversuche notwendig, bei denen kein Brechvorgang stattfindet und deshalb nur die Drehmomentensteigerung durch die stetig zunehmende Quarzmehlmenge erfasst wird. Um diese Verhältnisse exakt nachzubilden, müsste man eine Flüssigkeit verwenden, welche die gleiche Viskosität wie die zu prüfende Bitumenemulsion besitzt. Dies wäre z. B. mit einem Öl entsprechender Viskosität möglich. Um aber wirklich exakt zu sein, müsste man zusätzlich je nach Bitumenemulsion entweder mit verschiedenen Ölen arbeiten oder die Viskosität des Öls über dessen Temperatur einstellen. Dies stellt einen prüf- und labortechnischen Aufwand dar, der



Abbildung 5.2: Zur Untersuchung des Brechverhaltens geeignetes Messpaddel (Zementleimpaddel, nicht in Originalgröße)

kaum zu rechtfertigen ist. Das verwendete Quarzmehl wäre nur einmal einsetzbar, weil sich die nachträgliche Extraktion des Öles für die Rückgewinnung des Quarzmehls nicht lohnt und das erzeugte Öl-Quarzmehl-Gemisch wäre als Sondermüll zu entsorgen. Daher fanden diese Versuche mit einem Quarzmehl-Wasser-Gemisch statt. Der durch die niedrigere Viskosität des verwendeten Wassers erzeugte Fehler ist gegenüber der Gesamtviskosität des Gemisches als gering einzuschätzen. Zudem sind dadurch die Versuchsdurchführung sowie die Rückgewinnung des Quarzmehls durch Trocknung sehr einfach.

Im Anschluss an die Vorversuche finden die Hauptversuche mit den Bitumenemulsionen und Quarzmehl bei gleichem Versuchsablauf statt. Die Vor- und Hauptversuche werden in den folgenden beiden Kapiteln 5.6.1 und 5.6.2 erläutert.

5.6.1 Vorversuche mit Wasser und Quarzmehl

Bei den Versuchen mit Wasser und Quarzmehl kann die Temperierung der Materialien und Probenbehälter entfallen. Alle Komponenten haben unter den üblichen Laborbedingungen Raumtemperatur; die Viskosität des Wassers ist unter diesen Bedingungen als konstant anzusehen.

In das Messgefäß werden 100 g (ml) Wasser eingefüllt. Dieses wird anschließend in den Behälter für das Wasserbad eingesetzt und darin arretiert. Bei Versuchsstart beginnt das Wasserbad mit dem Messgefäß zu rotieren. Der Messkopf mit dem Messpaddel senkt sich soweit nach unten ab, dass zwischen dem Messpaddel und dem Boden des Messgefäßes etwa 1 mm Abstand verbleibt. Das Messpaddel taucht dadurch etwa zur Hälfte in das Wasser ein. Ab diesem Zeitpunkt beginnt auch die Erfassung der Messwerte:

- Zeit
- Drehmoment
- Umdrehungsgeschwindigkeit
- Temperatur

Nach einer Minute Vorlaufzeit, in welcher das Messgefäß eine konstante Umdrehungsgeschwindigkeit von 180 U/min erreicht, wird die Dosiereinrichtung zugeschaltet. Das Quarzmehl rieselt im Drehsinn des Messbechers gesehen vor das feststehende Messpaddel. Dadurch werden Wasser und Quarzmehl sofort homogen miteinander vermischt. Die Quarzmehlzugabe erfolgt solange, bis das Messsystem bei Überschreitung der 200 Nmm Messgrenze² selbsttätig abschaltet. Der Messkopf fährt anschließend nach oben zurück, Messwerterfassung und Rotation des Messgefäßes enden.

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit zehn Messungen mit Wasser und Quarzmehl auf die beschriebene Art und Weise durchgeführt. Dies gewährleistet eine zuverlässige Mittelwertbildung der Drehmoment-Zeit-Kurven und somit auch eine genaue Beschreibung der Entwicklung der inneren und äußeren Reibung in den Proben.

5.6.2 Hauptversuche mit Bitumenemulsion und Quarzmehl

Die Versuchsdurchführung erfolgt analog zu den Versuchen mit Wasser und Quarzmehl, mit dem wesentlichen Unterschied, dass die Bitumenemulsion, das Quarzmehl, das Messgefäß und das Messpaddel vor Versuchsbeginn in einem Klimaschrank ca. 2,5 h auf 25 °C temperiert wurden. Das Wasserbad wird etwa 1 h vor Versuchsbeginn ebenfalls vortemperiert, so dass die gewünschte Temperatur von 25 °C von allen Proben und Prüfeinrichtungen während der gesamten Versuchsdurchführung konstant eingehalten wird.

In die Untersuchungen werden insgesamt acht der zehn Bitumenemulsionen einbezogen. Als anionische Emulsion scheidet die Emulsion Nr. 9 wegen des nicht darauf anwendbaren, »sauen« Quarzmehls von vornherein aus. Emulsion Nr. 8 entfällt ebenfalls, da der Hersteller dieses Produktes nicht mehr existiert. Mit jeder der acht Bitumenemulsionen finden jeweils mindestens drei Messungen statt. Der im Vergleich zu den

²Dieser Wert entspricht der Obergrenze des Messbereiches der Messdose im Prüfgerät.

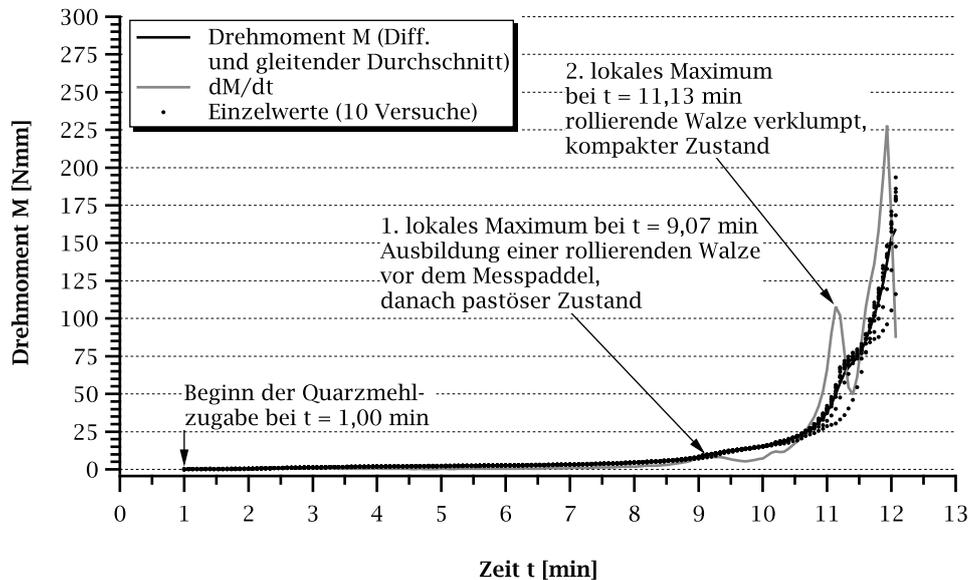


Abbildung 5.3: Verlauf des Drehmomentes bei der Zugabe des Quarzmehls zu Wasser

vorangegangenen Messungen mit Wasser reduzierte Stichprobenumfang ergibt sich aus der Größe einiger Emulsionschargen. Die Untersuchungen zum Brechverhalten müssen unbedingt an einer einzigen Charge der jeweiligen Bitumenemulsion stattfinden, um verfälschende Einflüsse aus dem Herstellungsprozess sicher auszuschließen. Die Probenumfänge einiger gelieferter Chargen betragen aber nur etwa 1,5 l, von denen der größte Teil noch für weitere Versuche innerhalb dieser Arbeit benötigt wird (z. B. *QMA*, t_A , *EP RuK* und *BP Fraaß*). Daher muss der Stichprobenumfang auf mindestens 3 Stück festgelegt werden.

5.7 Versuchsauswertung und -ergebnisse

5.7.1 Vorversuche mit Wasser und Quarzmehl

Abbildung 5.3 stellt die zeitlichen Verläufe der gemessenen Drehmomente aus den zehn Versuchen mit Quarzmehl und Wasser dar. Aus den Einzelwerten (graue Punktvolke) wird ein mittlerer Kurvenverlauf berechnet, der anschließend mit Hilfe des gleitenden Durchschnittes über jeweils 3 Punkte leicht geglättet wird (schwarze Kurve). Diese Kurve wird anschließend numerisch nach der Zeit differenziert, da Änderungen im Anstieg des zeitlichen Drehmomentenverlaufes markante Stellen im Versuchsablauf repräsentieren.

Zunächst verläuft die Drehmomentenkurve sehr flach; das Gemisch aus Quarzmehl und Wasser umströmt das Messpaddel laminar. Man kann es sich als Suspension vor-

stellen, deren feste Phase sich ständig vergrößert. Zum Zeitpunkt $t = 9,07$ min tritt die erste markante Veränderung im Verlauf der ersten Ableitung auf. Man kann davon ausgehen, dass an diesem Punkt eine Phasenumkehr im Gemisch eintritt. Bis zu diesem Zeitpunkt schwimmen die Quarzmehlkörnchen in einer kontinuierlichen Wasserphase, danach ist ihre Menge so groß geworden, dass das Wasser keine kontinuierliche Phase mehr darstellt, sondern sich nur noch um die Quarzmehlkörner herum legen kann oder durch sie aufgesaugt wurde. Das Gemisch erreicht einen pastösen Zustand und strömt nicht mehr laminar um das Paddel. Im Versuchsablauf zeigt sich dies durch die Ausbildung einer Aufwölbung vor dem Messpaddel, die sich bis zur Entstehung einer vor dem Paddel rollierenden Walze ständig vergrößert. Dazu müssen sich die Strömungsrichtungen der Quarzmehlkörner vor dem Messpaddel verändern und erzeugen so die deutlich sichtbare Unregelmäßigkeit in der ersten Ableitung der Drehmomentenkurve. Während der Periode etwa zwischen 9 min und 11 min vergrößert sich die rollierende Walze und das Drehmoment steigt immer schneller an, bis die Mischung so trocken geworden ist, dass das Wasser keine Gleitfilme zwischen den Quarzmehlkörnern mehr ausbildet und ein kompakter Klumpen aus feuchtem Quarzmehl entstanden ist. Die Wirkung dieser Verklumpung ist in der ersten Ableitung bei $t = 11,13$ min sehr gut als zweites lokales Maximum zu erkennen. Der feuchte, kompakte Quarzmehlklumpen beginnt vor dem Messpaddel her zu rutschen, so dass dieses nur noch den Gleitwiderstand zwischen dem Quarzmehlklumpen und den Gefäßwandungen erfasst. Dadurch geht der Anstieg des Drehmomentes zunächst etwas zurück. Im weiteren Verlauf wird das zudosierte Quarzmehl nicht mehr eingemischt. Es fällt nur noch von oben auf den Klumpen und von da nach unten in den Probenbecher, bis der Quarzmehlklumpen insgesamt so schwer und trocken geworden ist, dass sich der Gleitwiderstand wieder stärker erhöht. Beim Erreichen eines Drehmomentes von 200 Nmm endet der Versuch, da die Messgrenze der Messdose erreicht ist (siehe Kapitel 5.6.1).

Die Vorversuche ergeben, dass die innere und äußere Reibung eines nicht kohäsiven Quarzmehl-Wasser-Gemisches bereits erhebliche Drehmomente erzeugt. Der Einfluss innerer und äußerer Reibungsanteile in der Probe ist durch den bestimmten mittleren Drehmomentenverlauf aber quantifiziert und muss bei der Auswertung der Hauptversuche unbedingt berücksichtigt werden, um den Einfluss des Brechvorganges selbst sauber beschreiben zu können.

Aus den Ergebnissen der Vorversuche mit Quarzmehl und Wasser lassen sich außerdem folgende Schlüsse für die weitere Versuchsauswertung ziehen. Bis zum Erreichen des ersten lokalen Maximums in der ersten Ableitung des Drehmomentenverlaufes liegen laminare Fließverhältnisse in der Probe vor. Daher kann man in dem davor liegenden Zeitraum von einer Flüssigkeit ausgehen, der man auch eine Viskosität zuordnen kann. Nach diesem Zeitpunkt handelt es sich um eine pastöse Probe, bei der völlig andere Verhältnisse der inneren Struktur vorliegen. Von einer Flüssigkeit mit einer sie kennzeichnenden Viskosität kann dann keine Rede mehr sein. Folglich sind die Hauptversuche so auszuwerten, dass nur der Zeitabschnitt Berücksichtigung findet, in dem

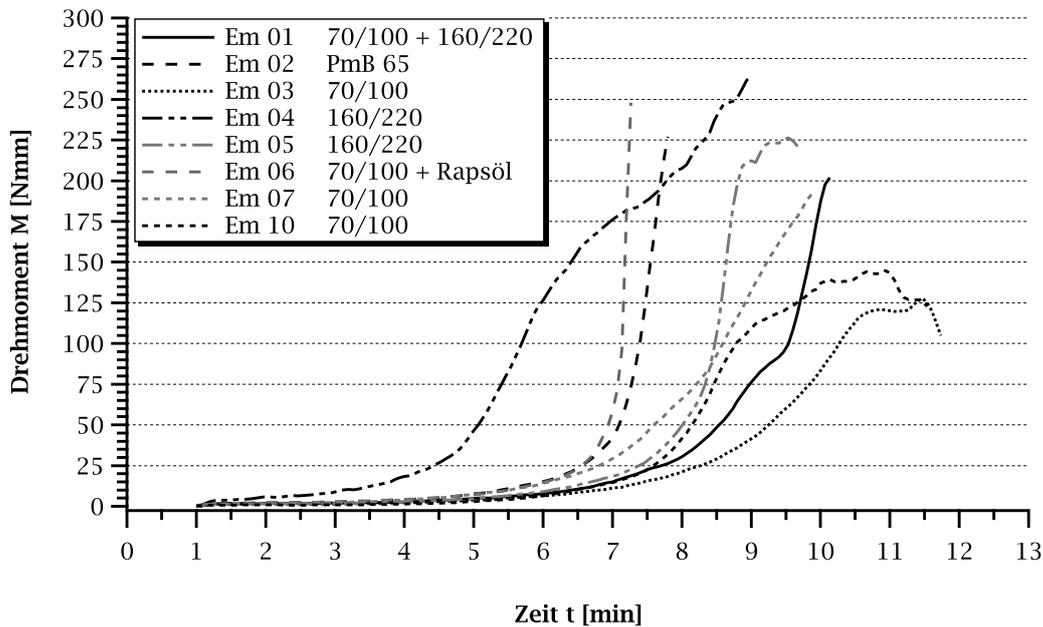


Abbildung 5.4: Brechverhalten der acht kationischen Bitumenemulsionen; Differenzkurven, bereinigt um Reibungseinflüsse, linear skaliert

annähernd laminare Fließverhältnisse vorliegen und somit von einer Flüssigkeit ausgegangen werden kann. Der Übergang vom flüssigen in den pastösen Zustand ist ja auch genau der gesuchte Zeitpunkt, zu dem alles Bindemittel einer Emulsionsprobe am zugegebenen Quarzmehl klebt, die Emulsion also gebrochen ist.

5.7.2 Hauptversuche mit Bitumenemulsion und Quarzmehl

Abbildung 5.4 stellt das Brechverhalten der acht untersuchten kationischen Bitumenemulsionen anhand der zeitlichen Verläufe der gemessenen Drehmomente dar, die bereits um den Einfluss der inneren und äußeren Reibung bereinigt sind. Diese Kurven wurden wie folgt erzeugt:

Aus den Einzelwerten von mindestens drei Messreihen wurde für jede Bitumenemulsion eine Mittelwertkurve bestimmt, die durch die Berechnung des gleitenden Durchschnittes über jeweils drei Punkte zusätzlich leicht geglättet wurde. Dies entspricht der Datenauswertung der Vorversuche. Von dieser Mittelwertkurve wurde anschließend die Mittelwertkurve aus den Vorversuchen (siehe Abbildung 5.3 auf Seite 53) subtrahiert, um die Reibungseinflüsse des Quarzmehls auf das Drehmoment zu eliminieren. Die so erhaltenen Differenzkurven sind in Abbildung 5.4 mit linearer Skalierung der Ordinate dargestellt.

Abbildung 5.4 zeigt sowohl deutliche zeitliche Unterschiede zwischen den Differenzkurven der einzelnen Bitumenemulsionen als auch wesentliche Unterschiede in deren Krümmung. Insofern ist zunächst festzustellen, dass mit dem angewendeten Prüfverfahren und der beschriebenen Auswertung der Daten deutliche Unterschiede im Brechverhalten von Bitumenemulsionen sichtbar zu machen sind.

Die Differenzkurven ähneln bezüglich ihrer Formen der Mittelwertkurve der Vorversuche (vgl. Abbildung 5.3 auf Seite 53). Die Drehmomente steigen anfangs langsam aber kontinuierlich an und nehmen ab einem bestimmten Zeitpunkt überproportional zu. Diese überproportionalen Anstiege gehen wie auch in den Vorversuchen auf die Ausbildung einer rollierenden Walze vor dem Messpaddel zurück, welche anschließend vollständig verklumpt und den rapiden Anstieg des Drehmomentes bewirkt. Dieser Vorgang setzt jedoch im Vergleich zu den Vorversuchen früher ein (vgl. Abbildung 5.3 auf Seite 53), was auf die zunehmende Kohäsion in den Proben durch das Brechen der Emulsionen und das Wirksamwerden der Klebwirkung des Bitumens zurückzuführen ist. Das Wirksamwerden kohäsiver Anteile in den Proben kennzeichnet im *Fünf-Stufen-Modell* von GLET [61] (siehe Seite 29) den Übergang von Stufe drei nach Stufe vier. Zur Erinnerung: In Stufe drei beginnen die Bitumentropfen miteinander zu verschmelzen und es bilden sich geschlossene Bitumenfilme an den Gesteinsoberflächen. Die Kohäsion zwischen den Bitumentropfen ist jedoch noch nicht ausgeprägt und das Emulsionswasser wirkt zusätzlich als Trennschicht. Daher können die einzelnen Gesteinskörner noch leicht gegeneinander verschoben werden. Während Stufe vier vergrößern sich die Kontaktflächen zwischen den umhüllten Gesteinskörnern und das Emulsionswasser tritt aus. Die Körner beginnen miteinander zu verkleben. Dies ist beim Einbau von Emulsionsmischgut im Wesentlichen eine Folge der Verdichtung, in den durchgeführten Versuchen allerdings auf die ständig zunehmende Quarzmehlmenge zurückzuführen, wodurch die Probe immer weiter austrocknet, bis alles Emulsionswasser aufgesaugt ist.

Aus dieser Erkenntnis ist abzuleiten, dass die Kurvenverläufe der Hauptversuche zeitlich vor diesem Vorgang auszuwerten sind. Einerseits weil es sich danach bei den Proben nicht mehr um viskose, laminar fließende Flüssigkeiten handelt, andererseits weil die Stufe drei des *Fünf-Stufen-Modells* diejenige Phase im Brechvorgang darstellt, in der ein Emulsionsmischgut möglichst lange verweilen muss, um Transport- und Einbausicherheit zu erreichen. Das Verhalten der untersuchten Proben während der ersten drei Stufen ist also für die Beurteilung ihres Brechverhaltens besonders interessant.

Genau diese Abschnitte der Differenzkurven sind jedoch in Abbildung 5.4 durch die linear skalierte Ordinate nicht zu beurteilen. Daher sind die Differenzkurven in Abbildung 5.5 mit dekadisch logarithmisch skalierte Ordinate dargestellt. Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass die Drehmomente zu Versuchsbeginn sofort bis auf ein gewisses Anfangsniveau ansteigen und während der Versuchsdauer weiter zunehmen. Die sprunghaften Anstiege am Anfang der Differenzkurven ergeben sich aus der Differenzbildung zwischen den Mittelwertkurven. Diese Bereiche während der ersten Sekunden sind gestört und sind aus der Versuchsauswertung ebenfalls auszuschließen.

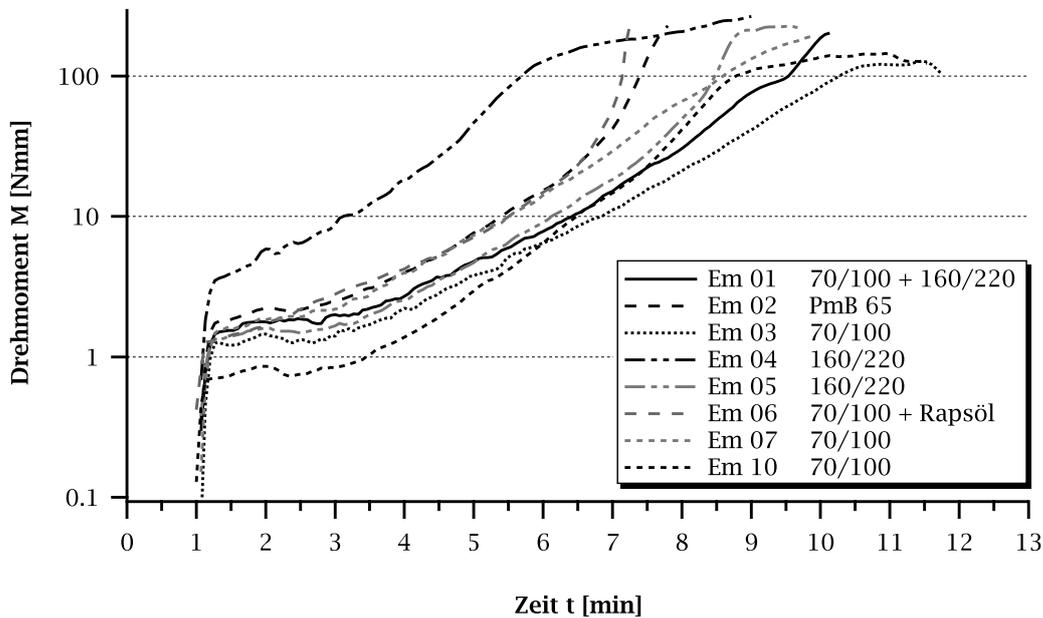


Abbildung 5.5: Brechverhalten der acht kationischen Bitumenemulsionen, Differenzkurven, bereinigt um Reibungseinflüsse, logarithmisch skaliert

Die Versuchsauswertung der einzelnen Differenzkurven muss zwischen dem Erreichen des jeweiligen Anfangsniveaus und dem Wirksamwerden der Kohäsion in der Probe erfolgen. Diese Bereiche werden in der Folge als *Auswertungsbereiche* deklariert. Das jeweilige Anfangsniveau eines Auswertungsbereiches ist in einer mathematischen Beschreibung des Kurvenverlaufes durch ein Absolutglied zu berücksichtigen.

Weiterhin ist in Abbildung 5.5 erkennbar, dass die Differenzkurven bei dekadisch logarithmischer Skalierung der Ordinate in den Auswertungsbereichen *annähernd* gerade verlaufen. Dies führt zu dem Schluss, dass der ablaufende Brechvorgang eine exponentielle Steigerung des gemessenen Drehmomentes in Abhängigkeit der Zeit bewirkt. Da die Kurven auch bei dekadisch logarithmischer Skalierung der Ordinate aber nach wie vor leichte Krümmungen aufweisen, muss die Basis des Exponenten eine andere als 10 sein³. Außerdem ist die Krümmung der einzelnen Differenzkurven in Abbildung 5.5 unterschiedlich, so dass davon auszugehen ist, dass es sich um unterschiedliche Ba-

³Der natürliche Logarithmus zur Basis e kann ausgeschlossen werden, da es sich bei der Basis e um eine mathematische Konstante handelt, die per se für ein Stoffgesetz nicht angenommen werden kann.

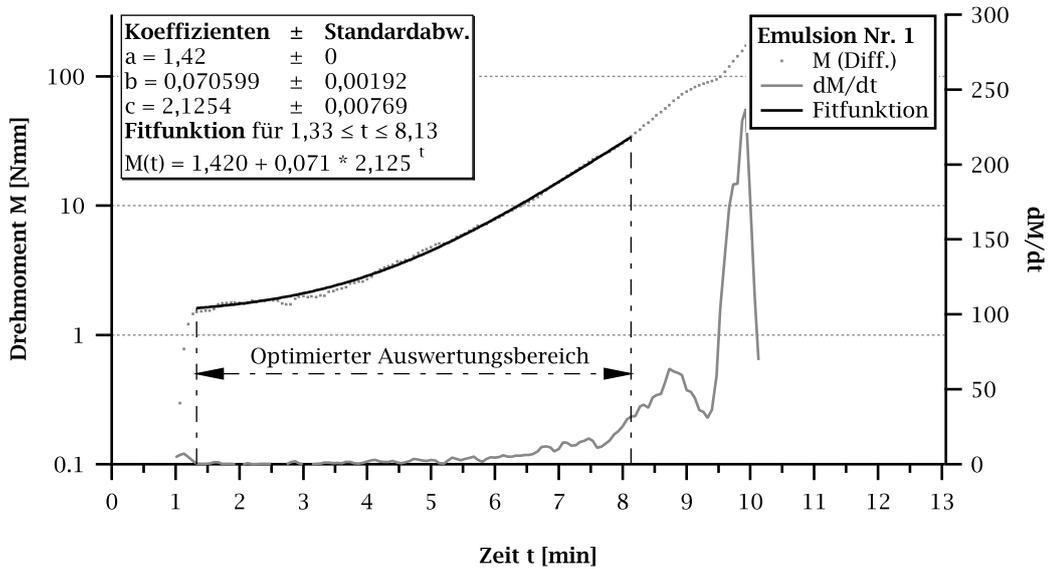


Abbildung 5.6: Brechverhalten der Emulsion Nr. 1

sen handelt. Der für die Auswertung der Differenzkurven heranzuziehende allgemeine mathematische Zusammenhang lautet demzufolge:

$$M = a + b \cdot c^t \quad (5.1)$$

Die Anwendbarkeit dieses Zusammenhanges zur Beschreibung des Brechverhaltens einer Bitumenemulsion wird am Beispiel der Emulsion Nr. 1 im Folgenden überprüft. Abbildung 5.6 stellt die Differenzkurve M (dekadisch logarithmisch skaliert), deren erste Ableitung dM/dt (linear skaliert) sowie die berechnete Fitfunktion (dekadisch logarithmisch skaliert) im Auswertungsbereich der Emulsion Nr. 1 dar. Bei der Auswertung ist zu berücksichtigen, dass durch die dekadisch logarithmische Skalierung der linken Ordinate Abweichungen im unteren Wertebereich der Differenzkurve sehr groß erscheinen. Diese sind im Vergleich zum weiteren Verlauf der Kurve jedoch sehr gering.

Die Auswertung der Differenzkurven erfolgt in mehreren Schritten. In jedem Schritt wird zur mathematischen Beschreibung des Brechverhaltens eine neue Regressionskurve entsprechend Gleichung 5.1 berechnet, allerdings unter jeweils präzisierten Randbedingungen. Iterativ nähert man sich so der in Abbildung 5.6 beispielhaft dargestellten, endgültigen Lösung. Zunächst ist es erforderlich, den Auswertungsbereich für den vorliegenden Versuch zu definieren. Dazu ist am Beginn der ersten Ableitung dM/dt manuell der Punkt zu suchen, ab dem sie kontinuierlich zu steigen beginnt. Dieser Punkt entspricht genau dem Zeitpunkt, ab welchem auf der Differenzkurve M das Anfangsniveau erreicht ist. Dieser Zeitpunkt ist in Abbildung 5.6 durch die linke vertikale

Linie markiert. Das Ende des Auswertungsbereiches definiert das erste lokale Maximum in der ersten Ableitung der Differenzkurve dM/dt , weil dabei der Übergang von Stufe drei nach Stufe vier des Brechvorganges stattfindet (Aufwölbung mit anschließender Ausbildung der rollierenden Walze). Dieses erste lokale Maximum liegt bei der Emulsion Nr. 1 etwa bei 7,5 min.

Unter diesen Randbedingungen wird mit einer geeigneten Datenanalysesoftware eine erste exponentielle Regressionskurve (Fitfunktion) entsprechend Gleichung 5.1 berechnet⁴. Für die Koeffizienten werden keine Startwerte vorgegeben. Die Regressionsrechnung ergibt neben den gesuchten Koeffizienten a , b und c der Regressionsgleichung auch deren Standardabweichungen als Parameter für die Genauigkeit der Regression. Nach der ersten Regression wird der Koeffizient a manuell so angepasst, dass der Beginn der Regressionskurve genau durch die Differenzkurve verläuft. Der so erhaltene Wert für den Koeffizienten a wird bei der nächsten Regression als fest definiert, daher beträgt die Standardabweichung für a ab der zweiten Regression Null. Außerdem wird das Ende des Auswertungsbereiches an seinem Ende schrittweise manuell so angepasst, dass er einen möglichst großen Bereich der Differenzkurve umfasst und die Standardabweichungen der Koeffizienten gering bleiben. Der letzte Schritt ist erforderlich, weil das erste lokale Maximum in der ersten Ableitung der Differenzkurve nicht immer exakt identifizierbar ist (siehe Abbildung 5.7). Zudem ist die Berücksichtigung möglichst vieler Daten in der Auswertung immer wünschenswert. Der so erhaltene Auswertungsbereich wird im Folgenden als *optimierter Auswertungsbereich* bezeichnet.

Mit dem festgelegten Koeffizienten a sowie dem optimierten Auswertungsbereich erfolgt die abschließende Berechnung der Regressionskurve (Fitfunktion), welche für die Emulsion Nr. 1 in Abbildung 5.6 grafisch dargestellt ist. Daneben enthält Abbildung 5.6 auch die ermittelten Koeffizienten, deren Standardabweichungen sowie die endgültige Exponentialgleichung mit ihrem Wertebereich (optimierter Auswertungsbereich), bei der die rechnerischen Werte der Koeffizienten auf drei Dezimalstellen gerundet sind. Die beispielhafte Auswertung der Differenzkurve für Emulsion Nr. 1 zeigt, dass die in Gleichung 5.1 formulierte Beziehung grundsätzlich geeignet ist, das Brechverhalten einer Bitumenemulsion mathematisch genügend genau zu beschreiben.

Um das gesteckte Ziel dieser Untersuchungen zu erreichen, die Formulierung eines Stoffgesetzes für das Brechverhalten von Bitumenemulsionen, ist es darüber hinaus erforderlich, die mathematischen Parameter a , b und c der allgemeinen Regressionsgleichung 5.1 bezüglich des Brechverhaltens physikalisch zu interpretieren.

Parameter a definiert als Absolutglied das oben beschriebene Anfangsniveau der Regressionskurve. Dieses ist gleichzusetzen mit dem Drehmoment, welches die Bitumenemulsion ohne Quarzmehl nur auf Grund ihrer eigenen Viskosität am Messpaddel hervorruft. Diese Variable ist somit ein Maß für die Viskosität der frischen Bitumenemulsionsprobe und spielt für die Bewertung des Brechverhaltens von Bitumenemulsionen keine Rolle. Sie ist bei der Auswertung lediglich mathematisch zu berücksichtigen.

⁴Der Autor hat für diese Arbeit die Software IGOR PRO von WAVEMETRICS genutzt.

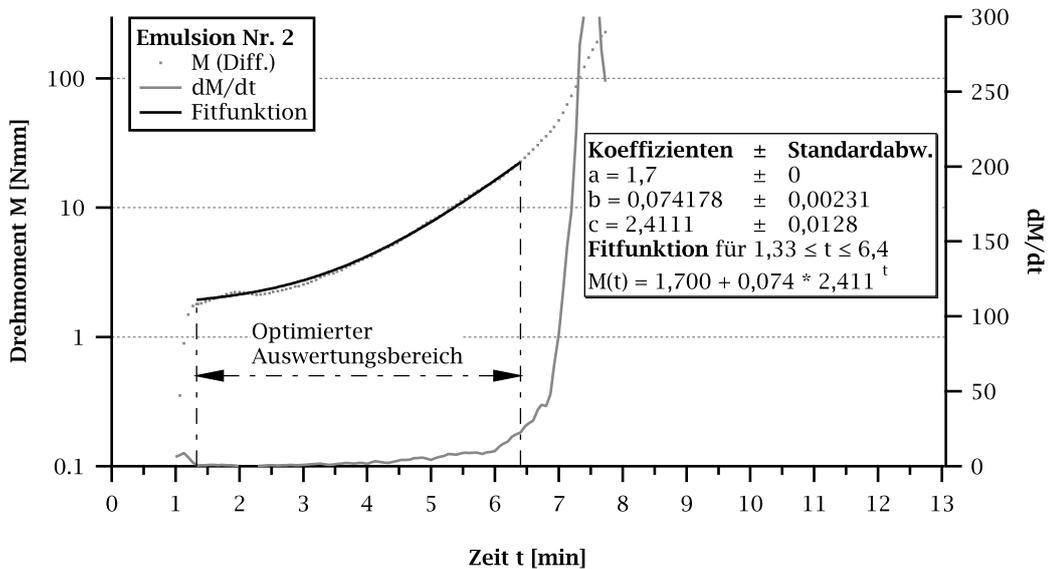


Abbildung 5.7: Brechverhalten der Emulsion Nr. 2

Parameter b stellt im mathematischen Sinne die Verschiebung der exponentiellen Kurve auf der Abszisse dar. Kleine b verschieben die Kurve nach rechts, große b nach links. Bezogen auf die Regressionskurven bzw. das Brechverhalten der Bitumenemulsionen bewirkt dieser Parameter eine zeitliche Verschiebung des Brechvorganges nach vorne oder hinten. Der Faktor b liefert also eine Aussage über einen zeitig oder spät einsetzenden Brechvorgang. Kleine Werte für b bedeuten einen späten Beginn des Brechvorganges, größere Werte für b dagegen dessen zeitiges Einsetzen.

Parameter c definiert als Basis der Exponentialfunktion im mathematischen Sinne die Krümmung der Kurve. Große Werte für c führen zu einer starken Krümmung, kleine Werte für c dagegen zu einer schwachen Krümmung. Bezüglich des Brechvorganges einer Bitumenemulsion beschreibt die Basis c also, wie schnell dieser abläuft und das Gemisch kohäsiv wird. Bei größeren Werten für c bildet sich die Kohäsion im Gemisch schneller aus, im umgekehrten Falle langsamer.

Mit der physikalischen Interpretation der drei Regressionsparameter a , b und c des in Gleichung 5.1 dargestellten mathematischen Zusammenhanges ist es gelungen, ein Stoffgesetz herzuleiten, welches das Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen beschreibt. Dieses Stoffgesetz wird für die Auswertung aller durchgeführten Versuche zum Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen herangezogen. Die damit erzielten Ergebnisse sind im Anhang B ausführlich grafisch dargestellt. Tabelle 5.1 fasst die Ergebnisse der Auswertungen der Differenzkurven aller Versuche zusammen. Sie sind aufsteigend nach Parameter b sortiert. Darüber hinaus enthält Tabelle 5.1 die Quarzmehlmengen, die in den Untersuchungen des Brechverhaltens der Proben nach

Tabelle 5.1: Brechverhalten der acht untersuchten kationischen Bitumenemulsionen

Em	Charge	a	b	σ	Fehler	c	σ	Fehler	QMA
10	3	0,600	0,025	0,00118	4,72%	2,474	0,01730	0,70%	249 g
5	1	1,200	0,064	0,00172	2,69%	2,227	0,00875	0,39%	260 g
1	1	1,420	0,071	0,00192	2,70%	2,125	0,00769	0,36%	289 g
2	2	1,700	0,074	0,00231	3,12%	2,411	0,01280	0,53%	225 g
3	2	1,000	0,075	0,00111	1,48%	2,015	0,00311	0,15%	315 g
7	1	1,300	0,099	0,00295	2,98%	2,265	0,00978	0,43%	270 g
6	5	1,000	0,179	0,00759	4,24%	2,045	0,01630	0,80%	207 g
4	1	3,000	0,296	0,00127	0,43%	2,665	0,02550	0,96%	118 g
Mittel		1,403	0,110	0,00251	2,80%	2,278	0,01265	0,54%	242 g

DIN 52047 während der Eingangskontrollen ermittelt wurden. Aus den berechneten Standardabweichungen σ der berechneten Parameter wurden außerdem prozentuale Fehler berechnet. Für den Parameter b liegt der relative Fehler immer deutlich unter 5 % (im Mittel 2,80 %) beim Parameter c sogar unter 1 % (im Mittel 0,54 %). Dies bestätigt die hohe Genauigkeit der angewendeten Untersuchungs- und Auswertungsmethodik.

Die Ergebnisse in Tabelle 5.1 zeigen, dass die untersuchten Bitumenemulsionen sehr unterschiedlich auf die Quarzmehlzugabe reagieren. Beim Parameter b differieren die Ergebnisse um eine Zehnerpotenz, sind also relativ weit gespreizt. Es ist daher sicher festzustellen, dass die untersuchten Proben der Bitumenemulsionen zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten beginnen zu brechen. Am schnellsten beginnt der Brechvorgang bei Emulsion Nr. 10 ($b = 0,025$), am spätesten bei Emulsion Nr. 4 ($b = 0,296$). Die Ergebnisse bei Parameter c liegen etwas dichter beieinander, dennoch sind deutliche Unterschiede zwischen den acht Bitumenemulsionen auszumachen und die Spreizung der Ergebnisse ist ausreichend groß. Nach Beginn des Brechvorganges bildet das Gemisch mit Emulsion Nr. 4 am schnellsten kohäsive Eigenschaften aus ($c = 2,665$), das Gemisch mit Emulsion Nr. 3 am langsamsten. Ebenfalls sehr schnell kohäsiv wird das Gemisch mit Emulsion Nr. 10 ($c = 2,474$).

Wie aber sind diese Ergebnisse und Aussagen im Hinblick auf die bislang üblichen Prüfverfahren zu beurteilen? Zur Beantwortung dieser Frage wird versucht, Zusammenhänge zwischen den bestimmten Parametern b und c sowie dem Quarzmehlanspruch QMA (siehe Tabelle 5.1) zu finden. Eine entsprechende Korrelation lässt sich nur zwischen c und QMA ermitteln. Abbildung 5.8 stellt den bestimmten linearen Zusammenhang sowie dessen 95 %-Konfidenzbereich dar. Die mit Emulsion Nr. 6 erhaltenen Werte sind dabei als echte Ausreißer von der Regressionsrechnung ausgenommen. Die Regressionsgerade in Abbildung 5.8 besagt, dass Emulsionen mit sich schnell ausbildender Kohäsion einen geringeren Quarzmehlanspruch haben als Emulsionen mit sich langsam

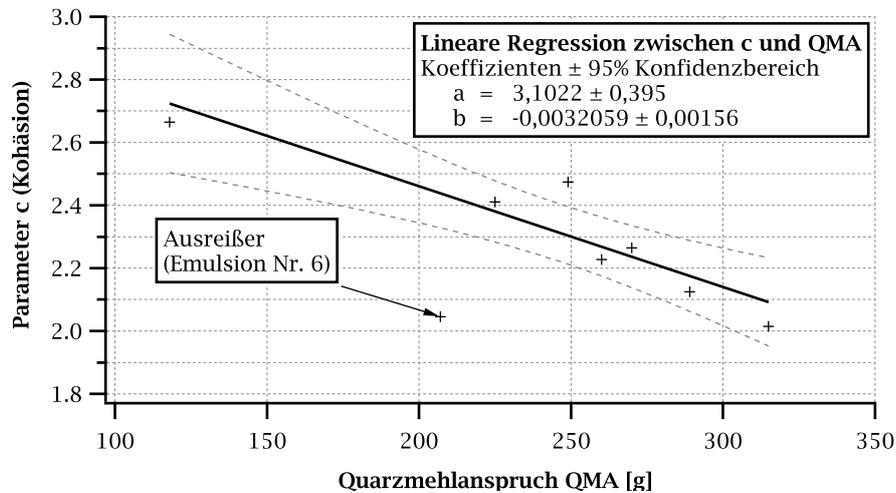


Abbildung 5.8: Zusammenhang zwischen Parameter c und dem Quarzmehlanspruch QMA

ausbildender Kohäsion. Dieser Zusammenhang zwischen c und QMA ist plausibel. Im manuellen und sehr »groben« DIN-Verfahren (siehe Kapitel 3.5.4 auf Seite 24) nimmt der Prüfer den zunehmenden Kraftbedarf wahr, den er benötigt, um neues Quarzmehl unter das Prüfgut zu mischen. Dies geht auf die wirksam werdende Kohäsion zurück. Bei deren schneller Ausbildung fällt es dem Prüfer immer schwerer neues Quarzmehl unterzumischen und der Versuch ist beendet. Die beiden Prüfverfahren führen also bezüglich der Kohäsionsentwicklung zu qualitativ ähnlichen Aussagen. Allerdings ist bei dem dargestellten Zusammenhang zu berücksichtigen, dass der Stichprobenumfang zu klein ist, um diesbezüglich abgesicherte Aussagen zu treffen. Dies ist auch nicht Ziel dieser Arbeit. Abbildung 5.8 verdeutlicht lediglich, dass sich die Aussagen beider Prüfverfahren qualitativ nicht widersprechen.

Das in dieser Arbeit neu entwickelte Prüf- und Auswertungsverfahren ermöglicht es aber, gegenüber dem DIN-Verfahren weitergehende Schlüsse zu ziehen und genauere Aussagen zu treffen. Aus der Gesamtbetrachtung der Parameter b, c und ihrer Mittelwerte ergibt sich anhand Tabelle 5.1, dass man die untersuchten Emulsionsproben in folgende vier Typen unterteilen kann:

- Typ 1: schnell brechend, schnell kohäsiv (Emulsion Nr. 4)
- Typ 2: schnell brechend, langsam kohäsiv (Emulsionen Nr. 6 und 7)
- Typ 3: langsam brechend, schnell kohäsiv (Emulsionen Nr. 2 und 10)
- Typ 4: langsam brechend, langsam kohäsiv (Emulsionen Nr. 1, 3 und 5)

Die Aufteilung der Emulsionen in die o. g. Typen erfolgt in dieser Arbeit pragmatisch, weil für diese Zuordnung noch kein Bewertungshintergrund existiert. Liegt der Wert für b unter dem Mittelwert, wird die Emulsion als langsam brechend deklariert, im umgekehrten Falle als schnell brechend. Ein über dem Mittelwert liegender Wert für Parameter c klassifiziert die Emulsion als schnell kohäsiv, ein darunter liegender Wert als langsam kohäsiv. Für die Erarbeitung eines abgesicherten Bewertungshintergrundes wären umfangreiche Untersuchungen mit wesentlich mehr Bitumenemulsionen erforderlich, vor allem auch mit Bitumenemulsionen für andere Anwendungszwecke. Diese Aufgabe hat einen Versuchs- und Auswertungsumfang einer eigenständigen Arbeit und ist im Rahmen dieser Arbeit nicht zu bewältigen. Zudem hat die vorliegende Arbeit nicht die Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für ein neuartiges Prüfverfahren zum Ziel, sondern das Aufzeigen neuer Wege zur Beurteilung des Brechverhaltens von Bitumenemulsionen. Dieses Ziel ist mit der vorgestellten Prüf- und Auswertungsmethode erreicht.

5.8 Praktische Bedeutung und Umsetzung der Ergebnisse

Die im vorangegangenen Kapitel 5.7.2 dargestellte Aufteilung der Bitumenemulsionen in vier verschiedene Typen bezüglich ihres Brechverhaltens ermöglicht die genaue Auswahl einer geeigneten Bitumenemulsion für einen bestimmten Anwendungszweck oder die exakte Einstellung einer Emulsion im Produktionsprozess für eben diesen. Da es in dieser Arbeit um die Wiederverwertung pechhaltiger Straßenausbaustoffe mit Bitumenemulsionen geht, liegt der Fokus der Ergebnisbewertung auf dieser Problematik.

Für die baupraktische Bewertung sind zunächst die zwei grundsätzlichen Herstellungsverfahren für Emulsionsmischgut zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.6.2 auf Seite 28 und Kapitel 3.6.4 auf Seite 37). Beide Verfahren stellen unterschiedliche Ansprüche an das Brechverhalten einer Bitumenemulsion.

- »Mixed-in-plant« entsprechend M VB-K [10]
- »Mixed-in-place« entsprechend M KRC [65]

Für die Herstellung von Emulsionsmischgut im Mischwerk entsprechend M VB-K [10] sind Emulsionen des Typs 4 besonders gut geeignet. Das verzögerte Einsetzen des Brechvorganges ermöglicht es, die Emulsion lange und somit besonders gleichmäßig unter die Straßenausbaustoffe zu mischen. Dadurch ist die homogene Verteilung des Bindemittels und die gute Umhüllung der Körner zu gewährleisten. Dieses ist besonders bei der Wiederverwertung pechhaltiger Straßenausbaustoffe von wesentlicher Bedeutung, weil ansonsten die wirksame Schadstoffimmobilisierung auf dem Spiel steht. Da Emulsionen des Typs 4 lange in Stufe 3 des Brechvorganges⁵ verweilen und das Mischgut langsam kohäsiv wird, lassen sich entsprechende Gemische nach dem Transport

⁵ siehe »Fünf-Stufen-Modell« von GLET auf Seite 29 [61]

besser einbauen als solche, bei denen das Gemisch schon kohäsiv ist. Für im Mischwerk herzustellendes Emulsionsmischgut auf der Basis pechhaltiger Straßenausbaustoffe sind also Bitumenemulsionen des Typs 4 in jedem Falle zu bevorzugen, konkret z. B. die Emulsionen Nr. 1, 3 und 5.

Für Baustellenmischverfahren entsprechend M KRC [65] gelten andere Randbedingungen. Der Mischprozess durch die Fräswalze ist hier sehr kurz aber intensiv. Die Emulsion muss schnell brechen, damit das Bitumen sofort am Fräsgut haftet; kritisch ist dies insbesondere bei feuchtem Klima. Bricht die Emulsion zu langsam, kann die Emulsion nach unten ablaufen und es verbleibt zu wenig Bitumen in den oberen Schichten. Damit wäre im Falle pechhaltiger Straßenausbaustoffe die wirksame Umhüllung der Schadstoffe fraglich. Die Emulsion muss zwar schnell brechen, das Gemisch darf aber nicht sofort kohäsiv werden, damit es nach dem Auffräsen und Mischen noch gut verdichtbar ist. Die ordnungsgemäße Verdichtung von Schichten aus Emulsionsmischgut spielt eine wesentliche Rolle für ihre Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit. Für diese Kaltrecyclingvariante sind also Bitumenemulsionen des Typs 2 besonders gut geeignet, z. B. die Emulsionen Nr. 6 und 7.

Bitumenemulsionen der Typen 1 und 3 sind für Recyclinganwendungen, insbesondere bei pechhaltigen Straßenausbaustoffen, weniger gut geeignet, da mit schlechten Ergebnissen bei Umhüllung der Ausbaustoffe bzw. bei der Verdichtung des Mischgutes gerechnet werden muss. Dies betrifft in der vorliegenden Arbeit die Emulsionen Nr. 4, 2 und 10.

5.9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der erweiterten Untersuchungen zum Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen wurde ein verbessertes, an die europäische Normung angelehntes Prüfverfahren entwickelt. Es ist weitestgehend von subjektiven Einflüssen befreit und erlaubt die angestrebte Ableitung charakteristischer Größen für das Brechverhalten von Bitumenemulsionen.

Die Versuche an insgesamt acht kationischen Bitumenemulsionen haben ergeben, dass sich das Brechverhalten entsprechend eines exponentiellen Kurvenverlaufes mit den drei Parametern a , b und c entwickelt (siehe Gleichung 5.1 auf Seite 58). Die drei Parameter sind physikalisch interpretiert, so dass Gleichung 5.1 als Stoffgesetz angesehen werden kann. Parameter a ist ein Maß für die Anfangsviskosität der geprüften Bitumenemulsion vor Beginn des Brechvorganges. Parameter b liefert eine Aussage über den Zeitpunkt des Beginns des Brechvorganges und Parameter c beschreibt, wie schnell die Emulsion nach Einsetzen des Brechvorganges bricht, das heißt wie schnell das Gemisch aus Quarzmehl und Bitumenemulsion kohäsiv wird. Die Parameter b und c lassen sich in Zusammenhang mit dem *Fünf-Stufen-Modell* von GLET bringen (siehe Seite 29), welches das Brechverhalten von Emulsionsmischgut aus baupraktischer Sicht beschreibt.

Das neue Stoffgesetz dient zur Auswertung aller durchgeführten Versuche. Die damit gefundenen Aussagen stehen nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen der klassischen Prüf- und Auswertungsmethoden sondern präzisieren und ergänzen diese maßgeblich. Auf Grundlage der Parameter b und c können Bitumenemulsionen entsprechend ihres Brechverhaltens in die vier folgenden Typen eingeteilt werden:

- Typ 1: schnell brechend, schnell kohäsiv
- Typ 2: schnell brechend, langsam kohäsiv
- Typ 3: langsam brechend, schnell kohäsiv
- Typ 4: langsam brechend, langsam kohäsiv

Aus dem Probenfeld der acht kationischen Bitumenemulsionen können jedem Typ eine oder mehrere Emulsionen zugeordnet werden. Allerdings fehlt für diese Zuordnung ein gültiger und statistisch abgesicherter Bewertungshintergrund. Dessen Erarbeitung ist im zeitlichen Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich und verbleibt als Aufgabe für künftige Forschungsarbeiten.

Die Kategorisierung in vier Typen hat zudem auch große praktische Relevanz für die Eignung von Bitumenemulsionen für bestimmte Einsatzzwecke. Generell sind Bitumenemulsionen der Typen 1 und 3 für Recyclingzwecke eher ungeeignet. Die verbleibenden Typen 2 und 4 eignen sich darüber hinaus unterschiedlich gut für »Mixed-in-place« bzw. »Mixed-in-plant«-Verfahren.

Zur Absicherung dieser Erkenntnisse und zur Erarbeitung des o.g. Bewertungshintergrundes sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um die neue und erweiterte Klassifizierung von Bitumenemulsionen entsprechend ihres Brechverhaltens ggf. später auch in die Normung einfließen zu lassen. Dabei kann das hier entwickelte Prüf- und Auswertungsverfahren Verwendung finden.

Allgemein gilt für künftige Arbeiten zu diesem Themenkreis, dass folgende wesentlichen Punkte berücksichtigt werden sollten:

- Die Untersuchungen sollten an labortechnisch selbst hergestellten Emulsionsproben stattfinden.
- Das Probenfeld sollte auch stabile und halbstarile Emulsionen mit einbeziehen.

Der erste Aspekt sichert einerseits die »Frische« der Proben sowie andererseits die exakte Kenntnis ihrer Zusammensetzung und der verwendeten Inhaltsstoffe. Außerdem wird dadurch sowohl der Einfluss aus Probenlagerung und -transport minimiert als auch die Gleichmäßigkeit zwischen Proben verschiedenen Chargen sichergestellt.

Durch den zweiten Aspekt können die Ergebnisse weiter als in den vorliegenden Untersuchungen gespreizt werden, um nach Möglichkeit repräsentative Aussagen für alle existierenden Emulsionstypen und somit einen allgemeingültigen Bewertungshintergrund zu erhalten.

6 Modellversuche zur PAK-Immobilisierung durch Bitumenemulsionen

6.1 Voraussetzungen

Vorliegende Untersuchungsergebnisse zur PAK-Immobilisierung durch Bitumenemulsionen beziehen sich immer auf reale pechhaltige Straßenausbaustoffe. Bei diesen sind die Voraussetzungen für einen Nachweis der Einkapselung wegen ihrer extremen Heterogenität nicht gegeben (siehe Kapitel 3.4). Zudem unterscheiden entsprechende Berichte nicht zwischen verdichtetem und unverdichtetem Mischgut, so dass die eigentliche Wirkung der Bitumenemulsionen selbst nicht zu quantifizieren ist, da die Oberflächenreduzierung durch Verdichtung den gesuchten Effekt überlagert (siehe Kapitel 3.6.2). Für die Untersuchung der PAK-Immobilisierung durch Bitumenemulsionen kommen also nur Modellversuche an definiertem, unverdichtetem, pechhaltigem Labormischgut in Frage, bei dem alle störenden Einflüsse aus der Oberflächenbeschaffenheit und der Zusammensetzung weitgehend ausgeschlossen sind. Für Herstellung und Zusammensetzung des pechhaltigen Labormischgutes gelten daher die folgenden Prämissen:

- Die Herstellung des Mischgutes darf nicht gesundheitsgefährdend oder umweltschädlich sein.
- Eine Sublimation der PAK muss unterbleiben. Ansonsten wäre erstens die obige Bedingung nicht eingehalten und zweitens würde der PAK-Gehalt im Mischgut unvorhersehbar verändert. Dies kann nur durch die Herstellung und Verarbeitung bei Temperaturen unterhalb von 60–70 °C erreicht werden.
- Menge und Art des pechhaltigen Bindemittels müssen in jeder Charge des Mischgutes gleich sein.
- Die Summe der Kornoberflächen, deren Beschaffenheit und die Kornform müssen in jeder Charge vergleichbar sein.
- Das pechhaltige Bindemittel muss in jeder Charge die gesamte Oberfläche jedes Einzelkorns bedecken, damit die durch die Bitumenemulsionen einzuhüllende Oberfläche immer gleich groß ist.
- Wegen der beiden letztgenannten Punkte sind Koagulationen einzelner Körner auszuschließen.

Als Kriterien zur Bewertung der PAK-Immobilisierung durch die Bitumenemulsionen dienen

- die PAK-Konzentration PAK_{T24} im Trogeluat des unbehandelten pechhaltigen Labormischgutes sowie
- die PAK-Konzentration PAK_{T24} im Trogeluat des mit Bitumenemulsion umhüllten Labormischgutes.

6.2 Zusammensetzung und Herstellung pechhaltigen Labormischgutes

Aus den oben formulierten Bedingungen ist folgende Zusammensetzung des pechhaltigen Mischgutes abzuleiten: Es muss eine grobe Gesteinskörnung (Einkorngemisch) mit möglichst kubischer Kornform und glatten, gleichförmigen Oberflächen verwendet werden. Dadurch sind bei gleichen Einwaagen Kornanzahl und Gesamtoberfläche einzelner Chargen vergleichbar. Ursprünglich wurden auch künstliche Materialien mit idealer Kugelform in Betracht gezogen, wegen ihrer vollkommen von der Praxis abweichenden Oberflächeneigenschaften jedoch wieder verworfen. Als Gestein wird ein gewaschener Moräne-Kies der Firma BERNHARD GLÜCK GMBH & CO. KG mit der Körnung 8/11 ausgewählt, dessen ausschließlich kubische Kornform durch manuelle Schlitzsiebung mit einem 5,6 mm-Sieb sichergestellt wird. Die ungünstigste in der Gesteinskörnung vertretene Korndimension ist somit 5,6 mm zu 11,2 mm, was einem Seitenverhältnis von 1:2 entspricht. Diese Vorgehensweise ist ein Kompromiss zwischen gewünschter Kornform (Kugelform) und Ausbeute der Lieferkörnung bzw. der Siebung.

Um die Herstellung des pechhaltigen Labormischgutes im Kaltverfahren realisieren zu können, wird als Bindemittel die pechhaltige Emulsion PROMAK A der FIRMA GOLDSCHMIDT GMBH ausgewählt. Diese nichtionische Emulsion haftet nach Trocknung an allen Gesteinsoberflächen, da zum Brechen der Emulsion kein Ionenaustausch erforderlich ist. Dies beugt Haftungsproblemen aufgrund der petrographischen Heterogenität des Moräne-Kieses vor. Die Idee der Dotierung des Gesteins mit definierten Mengen an PAK wird fallengelassen, weil dann die PAK nicht in eine Bindemittelmatrix eingebunden wären. Die Testbedingungen wären dann zu weit von der Realität entfernt gewesen. Die verwendete Emulsion hat einen Wassergehalt von 47,6 M.-%. Der Anteil an pechhaltigem Bindemittel und Zusatzstoffen beträgt folglich 52,4 M.-%.

Bei der auf die Absiebung des Gesteins folgenden Umhüllung mit pechhaltiger Emulsion ist kein bestimmter Bindemittelgehalt das Ziel, sondern die vollständige und gleichmäßige Umhüllung der Gesteinsoberflächen. Der Gehalt an pechhaltigem Bindemittel soll aber in jeder Charge gleich sein. Grund dafür ist die These, dass die PAK während der 24-stündigen Trogelution aus tieferen Schichten pechhaltiger Bindemittelfilme nicht eluiert werden können, da die Elutionsdauer zu gering ist.¹ Somit ist die tatsächlich

¹Nähere Erläuterungen zur Abhängigkeit zwischen Art und Verteilung der pechhaltigen Phase und dem Eluierverhalten der PAK finden sich im Kapitel 3.2.3 oder sehr ausführlich in [26].



Abbildung 6.1: Zweifach mit pechhaltiger Emulsion umhüllte Prüfkörnung

von Pech benetzte Oberfläche maßgeblich für das in 24 h eluierbare Gesamtpotenzial an PAK, nicht das im Mischgut enthaltene Bindemittelvolumen.

In einem ersten Schritt werden 1000 g der Prüfkörnung mit 50 g pechhaltiger Emulsion vermischt und danach auf Silikonpapier zur Trocknung ausgebreitet. Nach der oberflächlichen Abtrocknung wird das Mischgut gewendet und manuell verteilt, um Koagulationen zu verhindern. Dieser erste Mischvorgang ergibt noch keine vollständige und zufriedenstellende Umhüllung. Aus diesem Grund ist die nochmalige Umhüllung des pechhaltigen Labormischgutes mit weiteren 36 g pechhaltiger Emulsion notwendig. Abbildung 6.1 zeigt das getrocknete pechhaltige Labormischgut nach dieser zweiten Umhüllung, bei dem alle Flächen gleichmäßig und fast ohne Fehlstellen von pechhaltigem Bindemittel benetzt sind. Ein versuchsweise durchgeführter dritter Mischvorgang ergibt nur noch eine marginale Verbesserung, die den zusätzlichen Aufwand nicht rechtfertigt. Insgesamt werden der Prüfkörnung (1000 g) also 86 g pechhaltige Emulsion zugegeben, was einen rechnerischen Bindemittelgehalt von 4,1 M.-% ergibt.

Die beschriebene Herstellungsmethode hat sich als einfach und praktikabel erwiesen. Das so erzeugte Mischgut entspricht sehr gut den eingangs formulierten Anforderungen. Daher werden alle weiteren Chargen des pechhaltigen Labormischgutes nach dieser Methode angefertigt, jedoch nicht mehr manuell, sondern mit Hilfe eines üblichen REGO Mixers. Dadurch ist auch die Herstellung größerer Mengen leicht möglich. Das trockene, pechhaltige Mischgut lagert bis zu seiner Verwendung in luftdicht verschlossenen Kunststofftüten, flach liegend. Dabei entstehende Zusammenballungen und Verklebungen sind wegen der geringen Auflast manuell leicht wieder aufzulösen. Um keine allzu unterschiedlichen Lagerungszeiten des pechhaltigen Labormischgutes zu erzeugen, wird das Mischgut nach Bedarf in insgesamt 16 Chargen hergestellt.

6.3 Zusammensetzung und Herstellung des Emulsionsmischgutes

Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist es wegen der unterschiedlichen Wassergehalte der Bitumenemulsionen von wesentlicher Bedeutung, diese nach der darin enthaltenen Bitumenmenge und nicht nach der Emulsionsmenge insgesamt zu dosieren. Dies stellt sicher, dass bei jeder Mischgutprobe die gleiche Menge an Bitumen zur Umhüllung des Peches zur Verfügung steht, unabhängig von der verwendeten Emulsion. Daher ist im Folgenden von *Bitumenzugabe* oder *Bitumenzugabemenge* die Rede, obwohl eigentlich Bitumenemulsionen zugegeben werden.

6.3.1 Festlegung der Bitumenzugabemengen

Bei der Umhüllung pechhaltiger Materialien mit Bitumenemulsion wird idealisierend davon ausgegangen, dass sich das emulgierte Bitumen als Schutzfilm über die pechhaltigen Substanzen legt und diese so gegen eine Elution abschirmt. Die Schichtdicke der Bitumenfilme hat dabei entscheidenden Einfluss auf die Schadstoffimmobilisierung und ist von der Menge des zugegebenen Bitumens abhängig.

Um eventuell unterschiedliche Immobilisierungseffekte durch die verschiedenen Bitumenemulsionen sichtbar zu machen, ist es erforderlich, die Bitumenzugabemengen in den durchzuführenden Versuchen so zu wählen, dass die Schichtdicken nicht zu groß werden und potenzielle Unterschiede durch vollständige Einkapselung der PAK verschwinden. Die Bitumenzugabemengen sind daher auf Grundlage der zu erzeugenden Schichtdicken festzulegen. Es ist jedoch ungeklärt, welche Dimensionen diese Schutzfilme unter praktischen Bedingungen eigentlich besitzen. Mikroskopische Betrachtungen umhüllter Ausbaustoffe liefern dazu keine verwertbaren Ergebnisse, da das schwarze Pech nicht vom ebenfalls schwarzen Bitumenfilm zu unterscheiden ist, so dass auf praktisch relevante Werte hierfür nicht zurückgegriffen werden kann.

Für die Festlegung der Bitumenzugabemengen und der dadurch erzeugten Schichtdicken wird in der vorliegenden Arbeit daher ein rechnerischer Ansatz gewählt, dem folgende Idee zu Grunde liegt: Durch den Auftrag der Bitumenschicht ändert sich das Volumen V_K eines Kornes genau um den Betrag des Bindemittelvolumens V_B zum Gesamtvolumen V_u des umhüllten Kornes. Wenn die mittleren Dimensionen des Kornes vor seiner Umhüllung bekannt sind, kann aus dem Volumen V_u die aufgetragene Schichtdicke berechnet werden. Da es sich hierbei um einen näherungsweise bestimmten Mittelwert für eine Probe aus mehreren Einzelkörnern handelt, wird diese Größe im Folgenden als *ideelle Schichtdicke* x_i bezeichnet. Nachfolgend wird zunächst die Gleichung zur Berechnung von x_i hergeleitet, die Bestimmung ihrer Eingangsgrößen erfolgt im Anschluss daran.

Die einzelnen Körner eines Gesteinsgemisches werden üblicherweise als Kugeln idealisiert, was zwar eine starke aber allgemein anerkannte und praktikable Vereinfachung

darstellt.² Das Volumen V_K eines kugelförmigen Einzelkornes mit dem Halbmesser r errechnet sich nach Gleichung 6.1.

$$V_K = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (6.1)$$

Bei gleichmäßigem Auftrag einer Schicht der ideellen Dicke x_i nimmt der Halbmesser um den Betrag x_i zu, so dass die Gleichung zur Berechnung des Kornvolumens V_u nach Umhüllung lautet:

$$V_u = \frac{4}{3} \pi (r + x_i)^3 \quad (6.2)$$

Löst man die Gleichung 6.2 nach x_i auf, ergibt sich die Gleichung 6.3 zur Berechnung der auf ein kugelförmiges Korn aufgetragenen ideellen Schichtdicke x_i :

$$x_i = \frac{1}{2} \left(-2 \cdot r + \left(\frac{6}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot V_u^{\frac{1}{3}} \right) \quad (6.3)$$

Zur Bestimmung des umhüllten Kornvolumens V_u sind das mittlere Kornvolumen V_K des pechhaltigen Labormischgutes sowie das Volumen V_B des zudosierten Bitumens erforderlich. Das mittlere Kornvolumen V_K wird mit Hilfe von sechs repräsentativen Proben des pechhaltigen Labormischgutes ermittelt. Dazu werden sechs Teilproben P1-P6 aus je 500 Einzelkörnern hergestellt, an denen die Trockenmassen m und Rohdichten ρ_R zur Berechnung der mittleren Einzelkornvolumina V_K nach Gleichung 6.4 bestimmt werden.

$$V_K = \frac{m}{500 \rho_R} \quad (6.4)$$

Tabelle 6.1 stellt die ermittelten Ergebnisse, ihre Standardabweichung s und den Mittelwert der sechs Teilproben dar. Das mittlere Einzelkornvolumen V_K des pechhaltigen Labormischgutes beträgt also $0,5843 \text{ cm}^3$.

Stellt man Gleichung 6.1 nach r um, erhält man Gleichung 6.5 zur Berechnung des mittleren Kornhalbmessers r .

$$r = \frac{\left(\frac{3}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot V_K^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{2}{3}}} \quad (6.5)$$

Aus Gleichung 6.5 und dem mittleren Kornvolumen $V_K = 0,5843 \text{ cm}^3$ ergibt sich ein mittlerer Kornhalbmesser im pechhaltigen Labormischgut von $r = 0,5186 \text{ cm} = 5,186 \text{ mm}$.

Nachdem also der mittlere Einzelkornhalbmesser r und das mittlere Einzelkornvolumen V_K des pechhaltigen Labormischgutes feststehen, kann nun die durch eine beliebige Bitumenzugabemenge erzeugte ideale Schichtdicke x_i nach Gleichung 6.3 berechnet werden, um dadurch für die Versuche geeignete Bitumenzugabemengen auszuwählen.

²Der im Folgenden beschriebene Ansatz erfolgte in [44] unter Annahme eines Rotationsellipsoiden als Korngeometrie. Die Ergebnisse unterscheiden sich von denen der Kugel-These aber nur marginal und rechtfertigen den dafür erforderlichen rechnerischen Aufwand folglich nicht.

Tabelle 6.1: Berechnung des mittleren Einzelkornvolumens V_K aus Trockenmasse m und Rohdichte ρ_R von sechs Proben des pechhaltigen Labormischgutes à 500 Körnern

	m [g]	ρ_R [g/cm ³]	V_K [cm ³]
P1	769,306	2,734	0,5628
P2	813,482	2,722	0,5977
P3	793,059	2,730	0,5810
P4	781,735	2,721	0,5746
P5	799,242	2,729	0,5857
P6	822,208	2,722	0,6041
Mittel	796,505	2,726	0,5843
s	17,917	0,005	0,0138

Die Bitumenzugabemenge in M.-% wird dazu mit Hilfe der Bindemittelrohddichte ρ_B in Vol.-% umgerechnet und dem Volumen des mittleren Einzelkorns V_K hinzugerechnet. Auf diese Weise erhält man das rechnerische Volumen V_u des umhüllten Einzelkornes.

Tabelle 6.2: Ideelle Schichtdicken x_i in Abhängigkeit der Bitumenzugabemenge B_Z

B_Z	[M.-%]	0,50	0,75	1,00	1,25
ρ_B	[g/cm ³]			1,025	
ρ_R	[g/cm ³]			2,726	
r	[cm]			0,5186	
V_K	[cm ³]			0,5843	
B_Z	[Vol.-%]	1,3299	1,9949	2,6598	3,3248
V_u	[cm ³]	0,5921	0,5960	0,5998	0,6037
x_i	[mm]	0,023	0,034	0,046	0,057
Δx_i	[mm]	—	0,011	0,012	0,011

Tabelle 6.2 stellt die Ergebnisse der Schichtdickenberechnung für vier ausgewählte Bitumenzugabemengen zwischen 0,50 M.-% und 1,25 M.-% dar. Die Berechnungen zeigen, dass die durch die Umhüllung erzeugten ideellen Schichtdicken nur sehr gering sind und im Bereich von Hundertstelmillimetern liegen. Unter Berücksichtigung der Vereinfachungen und Messfehler vergrößert jede Erhöhung der Bindemittelzugabe um 0,25 M.-% die ideelle Schichtdicke am Emulsionsmischgut um rund ein Hundertstel Millimeter (Δx_i).

Im Vergleich zu realen pechhaltigen Straßenausbaustoffen sind die Bitumenzugabemengen deutlich niedriger. Die niedrigste Bitumenzugabemenge, die bei der Wiederverwertung pechhaltiger Straßenausbaustoffe denkbar ist, beträgt ca. 1,5 M.-%. Somit

beträgt die niedrigste Bitumenzugabemenge in den Versuchen etwa ein Drittel des praktisch relevanten Minimums. Dies ist plausibel, da der Bindemittelsanspruch des Labormischgutes wegen des fehlenden Feinkornanteils und der deswegen vergleichsweise geringen spezifischen Oberfläche deutlich niedriger ist, als der realer pechhaltiger Ausbaustoffe. Folglich können die in Tabelle 6.2 ausgewählten Bitumenzugabemengen als anwendbare Werte für die Modellversuche angesehen werden. Die Ergebnisse in Tabelle 6.2 zeigen außerdem, in welcher Größenordnung die Schichtdicken der Bitumenfilme bei der Einhüllung pechhaltiger Materialien ungefähr liegen, zahlenwertmäßig gelten sie aber nur unter den beschriebenen vereinfachenden Annahmen.

6.3.2 Herstellung des Emulsionsmischgutes

Die Untersuchungen beziehen mit Ausnahme der Emulsion Nr. 8 die in Tabelle 4.1 auf Seite 45 aufgeführten Bitumenemulsionen ein. Emulsion Nr. 8 wurde zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung nicht mehr hergestellt.

Für die zur Eluatgewinnung geplanten Trogelutionen werden einzelne Mischgutproben zu jeweils 1000 g benötigt. Es ist außerdem vorgesehen, sowohl vom unbehandelten pechhaltigen Mischgut als auch von den umhüllten Mischgutvarianten die Eluate von jeweils zwei zusammengehörigen Proben zu analysieren (Doppelbestimmung). Dazu ist die Herstellung von insgesamt 18 nicht mit Bitumenemulsion behandelte Proben und von 72 mit Bitumenemulsion umhüllte Proben erforderlich. Jede umhüllte Probe wird einzeln und manuell hergestellt. Nach Einwaage von 1000 g des pechhaltigen Labormischgutes wird diesem die jeweils benötigte Emulsionsmenge zudosiert und das Emulsionsmischgut von Hand so lange gemischt, bis keinerlei »freie« Flüssigkeit mehr im Mischgefäß vorhanden ist. Anschließend wird die Probe auf Silikonpapier ausgebracht, einen Tag bei Raumtemperatur getrocknet und danach in einer luftdicht verschlossenen Kunststofftüte bis zur Trogelution zwischengelagert. Jede Probe bekommt eine Bezeichnung, durch die später die eindeutige Zuordnung der PAK-Konzentrationen im Eluat des Emulsionsmischgutes zur PAK-Konzentration im Eluat der zugehörigen Charge des pechhaltigen Labormischgutes (Ausgangsmaterial) möglich ist. Die Rezepturen aller mit Bitumenemulsionen umhüllter Proben des pechhaltigen Labormischgutes sind im Anhang C in Tabelle C.1 dokumentiert.

Bei der Mischgutherstellung zeigt sich, dass sich das aufgetragene Bitumen je nach Bindemittelart und -sorte, nach dem Auftrag auf die Kornoberflächen mehr oder weniger stark zusammenzieht und winzige Tröpfchen an der Oberfläche ausbildet. Die Schichtdicke ist in praxi demzufolge nicht gleichmäßig sondern variiert je nach Kohäsion und Elastizität des Bindemittels. Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten z. B. bei der Emulsion Nr. 2, die ein PmB enthält, bei Emulsionen mit weichen Normbitumen 160/200 tritt dieser Effekt nicht oder weit weniger stark ein. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint die Verwendung harter bzw. sehr elastischer Bindemittel in Recyclingemulsionen nicht förderlich für eine möglichst vollständige Umhüllung des

wiederzuverwertenden Materials. Ihr Einfluss auf die bautechnischen Eigenschaften wird in einem späteren Kapitel untersucht.

6.4 Untersuchte Größen und Analyseverfahren

Zur Bewertung der PAK-immobilisierenden Wirkung der Bitumenemulsionen wurden die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} in den Trogeluaten des pechhaltigen Labormischgutes (Ausgangsmaterial) und der Emulsionsmischgutvarianten bestimmt. Die Herstellung der Trogeluate erfolgte nach [6], die PAK-Konzentrationen wurden mittels GC/MS nach [4] ermittelt.

Sämtliche Analysen fanden extern am LEHRSTUHL FÜR TECHNOLOGIE BIOGENER ROHSTOFFE DER TU MÜNCHEN statt und sind daher in dieser Arbeit nicht näher beschrieben. Die angewendeten Verfahren zur Probenvorbereitung, -gewinnung und -analyse sind in [44] dokumentiert.

Von jeder Charge des Ausgangsmaterials und der Emulsionsmischgutvarianten wurden jeweils zwei Proben eluiert und analysiert. Aus den Werten der Einzelproben wurden anschließend Mittelwerte gebildet. Die vollständigen Analysenergebnisse sind im Anhang E dokumentiert. Die ebenfalls ermittelten Phenolindizes, stellten sich erwartungsgemäß als sehr niedrig heraus, da es sich bei dem emulgierten Teerpech um ein steinkohlestämmiges Produkt handelt. Die Werte sind so gering, dass sich daraus keine sinnvollen Aussagen ableiten lassen. Daher wird auf ihre Darstellung verzichtet.

6.5 Versuchsergebnisse und -auswertung

In diesen Modellversuchen geht es um die vergleichende Betrachtung der PAK-immobilisierenden Wirkung verschiedener Bitumenemulsionen, nicht um die mögliche Einhaltung oder Unterschreitung festgelegter Grenzwerte. Deswegen werden im Folgenden die relativen PAK-Frachten, bezogen auf das jeweilige Ausgangsmaterial, betrachtet. Dazu werden die PAK-Konzentrationen der umhüllten Proben auf die der zugehörigen Chargen des pechhaltigen Labormischgutes (Ausgangsmaterial »AM«) bezogen und mit 100% multipliziert. Die so errechneten relativen PAK-Frachten sind in Abbildung 6.2 grafisch dargestellt. In der Legende sind die Emulsionen nach den emulgierten Bitumenarten bzw. -sorten gruppiert. Zur Einordnung der Werte sei erwähnt, dass die absoluten PAK-Konzentrationen in den Eluaten des unbehandelten Ausgangsmaterials etwa 1000 µg/l betragen. Im Vergleich zu realen pechhaltigen Ausbaustoffen sind sie also extrem hoch. Die vollständigen Analysenergebnisse sind im Anhang E in den Tabellen E.14 bis E.22 dokumentiert.

Abbildung 6.2 zeigt in der Gesamtschau der Versuchsdaten zunächst, dass die Umhüllung mit Bitumenemulsion eine deutliche Reduzierung der PAK-Konzentrationen in den Eluaten bewirkt. Bereits bei der geringsten Bitumenzugabe von 0,50 M.-%, entsprechend einer ideellen Schichtdicke von nur 2,3 Hundertstelmmillimetern, wird in jedem

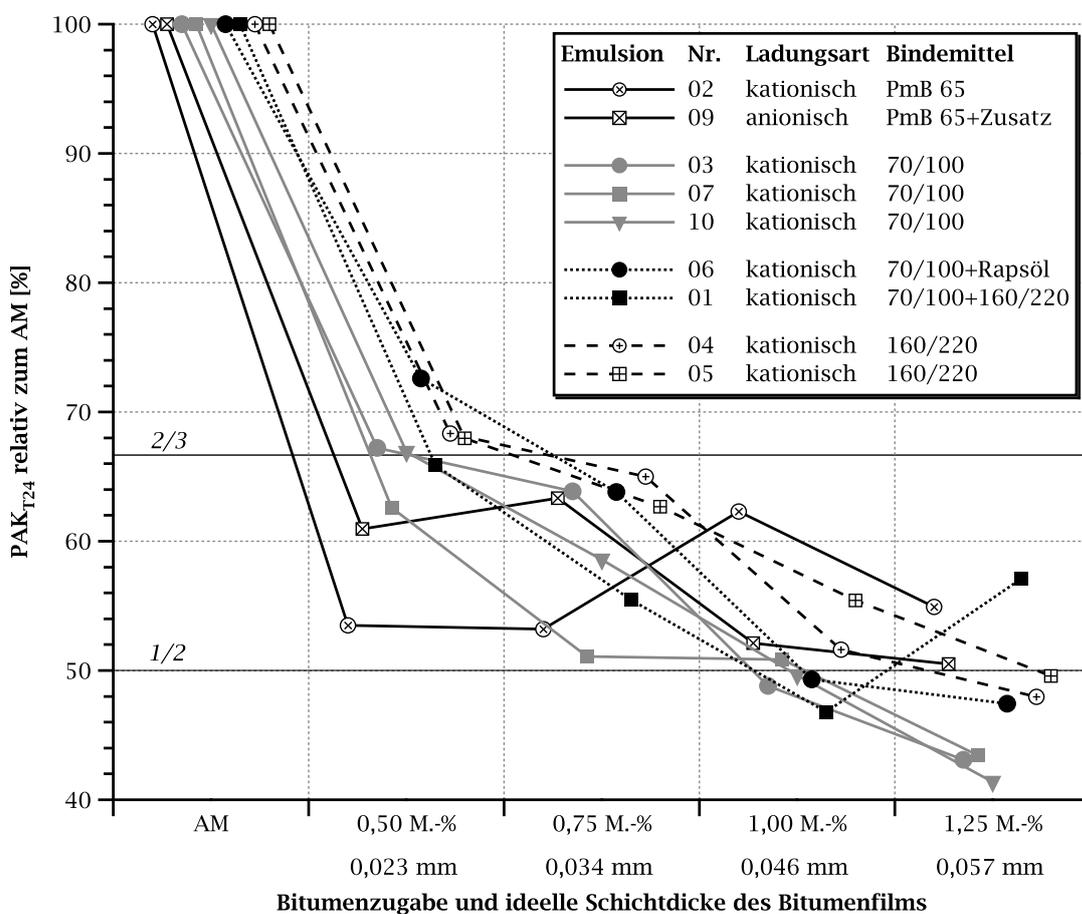


Abbildung 6.2: Relative PAK-Konzentrationen (bezogen auf das Ausgangsmaterial »AM«) in den Eluaten des umhüllten pechhaltigen Labormischgutes in Abhängigkeit der Bitumenzugaben bzw. der ideellen Schichtdicken der Bitumenfilme

Falle eine Reduktion der PAK-Konzentrationen auf unter 75% des Ausgangsmaterials erreicht. Die Zugabemenge von 0,75 M.-% Bitumen senkt die PAK-Frachten auf unter zwei Drittel des Ausgangsmaterials ab. Sechs der neun Bitumenemulsionen reduzieren bei der Bitumenzugabe von 1,25 M.-%, entsprechend einer ideellen Schichtdicke von 5,7 Hundertstelmmillimetern, die PAK-Frachten der Trogeluate auf weniger als die Hälfte des Ausgangsmaterials. Da Koagulationen feinkörniger Bestandteile ebenso wie die Oberflächenreduzierung durch Verdichtung bei diesen Untersuchungen ausgeschlossen sind, weist Abbildung 6.2 eindeutig nach, dass Bitumenemulsionen PAK selbstständig (das heißt ohne die o. g. Effekte) und wirksam immobilisieren können. Die Immobilisierung ist allein auf die erzeugten Bitumenschichten zurückzuführen, die sich als Schutzfilme um das pechhaltige Material legen und dieses dadurch selbstständig vor Wasserzutritt

und Auslaugung schützen. Die Wirksamkeit dieses bisher nur theoretisch proklamierten Mechanismus ist damit sicher nachgewiesen.

Nach dieser allgemeinen Ergebnisinterpretation bedürfen einige auffällige Einzelergebnisse einer Erläuterung. Zum Beispiel ist der starke Anstieg der PAK-Konzentration bei Emulsion Nr. 1 und der Bindemittelzugabe von 1,25 M.-% mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht zu erklären. Die beiden PmB-Emulsionen Nr. 2 und 9 sind bei der niedrigsten Bindemittelzugabe am besten platziert. Mit steigender Bitumenzugabe nehmen die PAK-Gehalte teilweise wieder zu und die beiden Emulsionen sind bei der Bitumenzugabemenge von 1,25 M.-% die zweit- und drittschlechtesten. Eine Analyse der Untersuchungsergebnisse zur Ermittlung statistischer Streumaße ist mit den vorliegenden Stichprobenumfängen von je zwei Proben pro Mischung nicht möglich. Ein höherer Stichprobenumfang ist im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht realisierbar. Ursachen für die teilweise unplausiblen Entwicklungen der Immobilisierungsraten können folgende Aspekte sein.

- Ausgangsmaterialien
- Probenherstellung und -lagerung
- Probenaufbereitung (Elution und Extraktion)
- Analyseverfahren

Die ersten beiden Punkte sind nur durch eine geänderte Vorgehensweise bei der Probenherstellung und -lagerung in den Griff zu bekommen, quantifizierbar sind sie nicht. Das Elutionsverfahren ist als solches vorgeschrieben und nicht zu ändern. Daraus resultierende Schwankungen müssen hingenommen werden und sind ebenfalls nicht zu quantifizieren. Damit verbleibt nur der Analysefehler als bezifferbare Größe.

Tabelle 6.3 listet die relativen Fehler der GC/MS auf, die im Zuge der Analysen durch entsprechend dotierte Proben mit bestimmt wurden. Es zeigt sich, dass der Analysefehler mit im Mittel maximal 8,055 % für PAK-Analysen äußerst gering ist und mit sinkenden PAK-Frachten bis auf im Mittel 3,359 % abnimmt. Aus den Ergebnissen der Tabelle 6.3 kann geschlussfolgert werden, dass die Schwankungen einiger Einzelwerte in Abbildung 6.2 nicht auf die Analysefehler zurückzuführen sind oder wenigstens nicht in erster Linie auf diese zurückgehen. Die Werteschwankungen müssen daher ihre Ursachen in den anderen drei o. g. Aspekten haben. Da diese auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht zu quantifizieren sind, haben die nachfolgend erläuterten Ergebnisse eine eingeschränkte Aussagekraft und müssen im Rahmen künftiger Arbeiten statistisch untermauert werden.

Aus Abbildung 6.2 ist abzuleiten, dass sich mit steigender Bitumenzugabemenge zunehmend Gruppen von Emulsionen ähnlicher Wirksamkeit ausbilden, die wahrscheinlich auf die darin emulgierten Bitumen zurückgeführt werden können, so wie sie in der Legende gruppiert sind. Bei der Zugabe von 1,25 M.-% Bitumen erbringen die Emulsionen mit unverschnittenem Bitumen 70/100 die besten Resultate. Die Emulsionen

Tabelle 6.3: Relativer Analysefehler der GC/MS bei der Untersuchung der Trogeluate aus den Modellversuchen in Prozent

Emulsion	Bitumenzugabe in M.-%				
	0,00	0,50	0,75	1,00	1,25
1	8,017	5,294	4,484	3,755	4,615
2	8,043	4,314	4,308	5,022	4,418
3	8,016	5,416	5,141	3,934	3,473
4	8,060	5,520	5,243	4,159	3,879
5	8,046	5,465	5,022	4,436	3,983
6	8,057	5,813	5,098	3,945	3,804
7	8,057	5,096	4,159	4,145	3,522
9	8,034	4,883	5,047	4,157	4,042
10	8,055	5,403	4,730	4,014	3,359
i.M.	8,043	5,245	4,804	4,174	3,899

mit dem weicheren Bitumen 160/220 oder mit Rapsöl angefluxtem Bitumen 70/100 fallen dagegen in der Wirksamkeit zurück. Nur die beiden PmB-Emulsionen schneiden noch schlechter ab, von der unerwarteten Ausnahme bei Emulsion Nr. 1 einmal abgesehen. Die Unterschiede zwischen den Emulsionen mit Bitumen 70/100 und den übrigen Gruppen liegen zumindest außerhalb des Analysefehlers, der bei dieser Bitumenzugabe im Mittel nur noch 3,359 % beträgt (siehe Tabelle 6.3).

Grund für dieses Ergebnis ist die dem Teer und Pech ähnliche Zusammensetzung des Bitumens. Bitumen enthält als Kolloidsystem eine kontinuierliche Phase aus öligen Substanzen, den Maltenen, in denen Asphaltene und Harze als disperse Phasen verteilt sind.³ Die eher lipophilen als wasserlöslichen PAK können sich in der Maltenphase des Bitumens lösen. Das Konzentrationsgefälle zwischen pechhaltigem Material und wässrigem Medium bewirkt ihre Diffusion an die Außenseite des Bitumenfilms, wo sie aus der Bitumenschicht eluiert werden können. Diese Erkenntnis beruht auf den in [26] publizierten Ergebnissen, wo der PAK-Austrag aus einer Teerphase in eine wässrige Phase durch Diffusionsvorgänge erklärt und modelliert ist (siehe Kapitel 3.2.3). Je weicher ein Destillationsbitumen ist, desto größer ist auch seine Maltenphase. Folglich können sich PAK in weichen Bitumen mit ausgeprägten Maltenphasen leichter lösen und diffundieren zusätzlich leichter durch diese hindurch. Somit wären unter dem Gesichtspunkt einer sicheren und dauerhaften PAK-Immobilisierung Emulsionen mit hartem Bitumen günstiger für die Wiederverwertung pechhaltigen Materials als solche mit weichem.

Als weitere Erklärung für die teilweise unplausiblen Einzelergebnisse kommt das im Kapitel 6.3.2 beschriebene Phänomen der Tröpfchenbildung nach Umhüllung in

³Eine detaillierte Beschreibung des Kolloidsystems von Bitumen findet sich z. B. in [80].

Frage, welches insbesondere bei den PmB-Emulsionen zu beobachten ist und sich mit steigender Bitumenzugabemenge verstärkt. Das Zusammenziehen des PmB sorgt an den Stellen, an denen es sich zurückgezogen hat, für extrem dünne und damit auch leicht zu durchdringende Bindemittelfilme, was einen negativen Einfluss auf die PAK-Immobilisierung hat. Dieses Verhalten klassifiziert die beiden PmB-Emulsionen als eher ungeeignet für die PAK-Einbindung.

Erstaunlich ist das Abschneiden der anionischen Emulsion Nr. 9, da sie entgegen der landläufigen Meinung in Bezug auf die PAK-Immobilisierung durchaus mit einigen der kationischen Emulsionen konkurrieren kann. Offenbar war der im Kapitel 3.3.3 beschriebene Mechanismus der Phenolatbildung im basischen Milieu mit der damit verbundenen Solubilisierung der PAK wegen der niedrigen Phenolgehalte des verwendeten Peches nicht in dem Umfang wirksam, als dass ein signifikanter Einfluss auf die Ergebnisse auszumachen wäre.

Unklar bleibt der Einfluss der in den Emulsionen verwendeten Tenside auf die PAK-Immobilisierung, da die Hersteller diese Informationen nicht zugänglich machen. Wie im Kapitel 3.2.3 beschrieben wurde, solubilisieren bestimmte Tenside die PAK. Es ist daher durchaus denkbar, dass die im Pech enthaltenen PAK durch das in der zudosierten Emulsion enthaltene Tensid (Emulgator) solubilisiert werden und dadurch während des Mischprozesses in das Emulsionswasser gelangen. Mit diesem werden sie anschließend im Mischgut verteilt und sind bei Wasserzutritt sofort zu eluieren. Die hieraus entstehende Fragestellung kann nur dann bearbeitet werden, wenn die Emulsionen von der entsprechenden Forschungsstelle selbst im Labor angefertigt werden.

6.6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Modellversuche zur PAK-Immobilisierung durch Bitumenemulsionen haben insgesamt folgende Resultate ergeben.

Es konnte ein einfaches und sicheres Verfahren zur Herstellung eines definierten, pechhaltigen Labormischgutes entwickelt werden, welches zur vergleichenden Untersuchung der PAK-immobilisierenden Wirkung von Bitumenemulsionen geeignet ist. Die durch Umhüllung des pechhaltigen Labormischgutes mit Bitumenemulsion erzeugten Schichtdicken können mit Hilfe eines selbst entwickelten, rechnerisch-experimentellen Lösungsansatzes bestimmt werden. Die berechneten Dicken werden als ideale Schichtdicken bezeichnet, da sie unter vereinfachenden Annahmen geltende Näherungswerte darstellen. Unter den ausgewählten Untersuchungsbedingungen betragen die ideellen Schichtdicken je nach Bindemittelzugabe etwa zwischen zwei und sechs Hundertstelmmillimeter. Bitumenfilme dieser Dicke sind nachweislich in der Lage PAK wirksam einzuschließen, ohne hierzu auf Oberflächenreduzierungseffekte durch Verdichtung oder auf die Bindung pechhaltiger Feinanteile angewiesen zu sein. Dies verschafft dem Kaltrecycling mit Bitumenemulsionen einen Sicherheitsvorsprung gegenüber anderen Verfahren.

Die unterschiedlichen Immobilisierungsraten sind vermutlich auf die emulgierten Bitumen zurückzuführen. Härtere Bitumen sind aufgrund ihrer weniger stark ausgeprägten Maltenphase für die Einbindung von PAK wahrscheinlich besser geeignet als weiche Bitumen. Diese noch zu überprüfende und statistisch zu untermauernde Vermutung läuft der Forderung nach möglichst weichen Bitumen zuwider, die wegen ihrer geringeren Neigung zum Zusammenziehen der Bitumenfilme an den Kornoberflächen günstiger für die optimale Umhüllung der Körner sind. Die Hersteller müssen hier also einen geeigneten Kompromiss suchen. Außerdem unterstreicht diese Erkenntnis die Notwendigkeit der Auswahl einer Bitumenemulsion auf Grundlage einer gründlichen und repräsentativen Eignungsprüfung.

Die sich durch diese Untersuchungen abzeichnenden Ergebnisse sollten im Rahmen weiterer Forschungen durch größere Stichprobenumfänge überprüft und statistisch abgesichert werden, da bei einigen Proben unplausible Schwankungen auftreten, die trotz größter Sorgfalt wahrscheinlich im Wesentlichen auf die Schwankungen im Ausgangsmaterial sowie auf die Probeherstellung und -lagerung zurückgehen. Um die Schwankungen auf ein Minimum zu begrenzen, sollten künftige Modellversuche zur PAK-Immobilisierung mit dotiertem Mischgut stattfinden. Nur diese Vorgehensweise sichert die Gleichmäßigkeit des Gesamtgehaltes an PAK in allen verwendeten Proben ab. Da dies Umgang mit gesundheitsschädlichen (karzinogenen) Substanzen erfordert, muss das Verfahren zu Probenherstellung möglichst sicher sein.

Für Untersuchungen an PAK-haltigem Mischgut wäre es denkbar, eine vorher im Labor hergestellte Bitumenemulsion mit PAK-Mustern nach EPA-Standard zu dotieren. Die Emulsion kann kalt verarbeitet und dotiert werden, so dass die Sublimation der PAK bei den üblichen Labortemperaturen weitestgehend unterbunden ist. Mit dieser Emulsion wäre im Anschluss Mischgut z. B. nach dem hier beschriebenen Verfahren herzustellen. Durch diese Vorgehensweise ist der Gesamtgehalt an PAK an die Praxis anpassbar und in jeder Mischgutprobe nahezu gleich. Das Mischgut sollte gekühlt gelagert werden. Auf die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und Proben zurückgehende Schwankungen wären somit im Grunde ausgeschlossen. Bei allen Mischvorgängen usw. muss auf die gründliche Reinigung sämtlicher Geräte und Behälter geachtet werden, um den angestrebten, gleichmäßigen Gesamtgehalt an PAK in den Proben nicht durch äußere, unbeabsichtigte und nicht nachvollziehbare Einflüsse zunichte zu machen. Die weitere Vorgehensweise wäre analog zur vorliegenden Arbeit denkbar.

Interessant für weitere Arbeiten ist vor allem auch die Frage nach dem zeitlichen Verlauf der PAK-Immobilisierung. Die hier durchgeführten Versuche beschäftigen sich mit der generellen Wirksamkeit von Bitumenemulsionen und betrachten diese nur innerhalb kurzer Zeiträume nach der Probenherstellung. Wie aber verhält es sich mit der Qualität der Einkapselung über längere Zeiträume? Zur Beantwortung dieser Frage wären Versuche mit sehr genau definierten Proben nötig. Die hier verwendeten Mischgutproben erscheinen dafür ungeeignet. Es wäre z. B. möglich, eine Probe doppelt entionisiertes Wassers mit PAK nach EPA-Standard zu dotieren und diese durch eine Bitumenschicht

auf einem durchlässigen Trägermaterial von einer weiteren, anschließenden Probe doppelt entionisierten Wassers zu trennen. Es wäre zu überprüfen, ob und ab wann ggf. das Konzentrationsgefälle zur Diffusion der PAK durch die Bitumenmembran führt. Mit dieser Versuchsmethodik wäre der Zeitpunkt der Durchdringung leicht bestimmbar. Schwierig erscheint bei dieser Vorgehensweise insbesondere die gleichmäßige Herstellung einer Bitumenmembran mit einer Schichtdicke im Hundertstelmillimeterbereich.

Die bereits im Kapitel 5.9 vorgeschlagene Verwendung selbst hergestellter Bitumenemulsionen, ist auch für Modellversuche zur PAK-Immobilisierung sinnvoll und vorteilhaft. Die Unkenntnis über die genaue Zusammensetzung von Handelsmustern führt ansonsten zu Schwierigkeiten bei der Ergebnisinterpretation. Zudem wird durch die Verwendung von Laboremulsionen auch die »Frische« der Proben sichergestellt, denn Bitumenemulsionen haben erstens eine begrenzte Lagerfähigkeit und sind zweitens sehr anfällig gegenüber äußeren Einflüssen (insbesondere Frost) während des Transportes.

7 Untersuchungen an den nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen

7.1 Vorbereitung der Ausbaustoffe

Aufgrund der Beschaffenheit der ausgewählten pechhaltigen Ausbaustoffe S, B, C und T (siehe Tabelle 4.2 auf Seite 46) sind vor den eigentlichen Untersuchungen einige Vorbereitungen erforderlich. Das Granulat B enthält zum Teil Steine mit Korngrößen bis über 63 mm. Zusätzlich sind bei allen drei Granulaten Stücke mit Korngrößen über 31,5 mm vorhanden. Diese groben Bestandteile müssen vor der weiteren Verwendung der Ausbaustoffe manuell ausgesondert werden, weil deren Dimensionen für die vorgesehenen Untersuchungen wesentlich zu groß sind. Außerdem ist es erforderlich, die Ausbaustoffe vorab bei Raumtemperatur an der Luft zu trocknen. Dies erfolgt durch Ausbringen auf eine große, trockene Fläche und regelmäßiges Wenden der Ausbaustoffe. Während des Wendens werden die pechhaltigen Ausbaustoffe gleichzeitig manuell homogenisiert, um Proben mit möglichst homogener Zusammensetzung zu erhalten. Der so erzeugte Zustand der Ausbaustoffe wird im Weiteren als *Ausgangszustand* bezeichnet.

7.2 Eigenschaften der pechhaltigen Ausbaustoffe im Ausgangszustand

7.2.1 Visuelle und organoleptische Beurteilung

Die Abbildungen 7.1 bis 7.4 stellen die pechhaltigen Ausbaustoffe im Ausgangszustand dar. Das Granulat S mit steinkohlestämmigem Pech ist augenscheinlich ein Gemisch aus Rund- und Brechkorn, in dem Stücke aus kleineren Körnern in nicht nennenswertem Umfang vorkommen. Von diesem Ausbaustoff geht ein deutlicher aber nicht übermäßig starker Pechgeruch aus. Beim wesentlich dunkleren Granulat B mit braunkohlestämmigem Pech ist der Pechgeruch dagegen äußerst intensiv. In der Kornzusammensetzung dominieren die groben Körnungen, Feinkorn ist nur sehr wenig vorhanden. Das Granulat C enthält im Gegensatz zu den ersten beiden Materialien sehr plattige Stücke, was eindeutig auf den Fräsvorgang hinweist, mit dem es ausgebaut wurde. Viele der größeren Stücke dieses Ausbaustoffes bestehen aus kleineren Einzelkörnern. Ein Pechgeruch ist nicht wahrnehmbar. Der Teersand T ist bereits im Ausgangszustand sehr homogen zusammengesetzt. Er hat eine vergleichsweise helle bräunliche Färbung und nur einen minimalen Pechgeruch. Koagulationen kleinerer Körner sind nur in geringem Umfang enthalten.



Abbildung 7.1: Teilprobe des Granulates S im Ausgangszustand ($\varnothing_{\text{Blech}}$ ca. 30 cm)



Abbildung 7.2: Teilprobe des Granulates B im Ausgangszustand ($\varnothing_{\text{Blech}}$ ca. 30 cm)



Abbildung 7.3: Teilprobe des Granulates C im Ausgangszustand ($\varnothing_{\text{Blech}}$ ca. 30 cm)

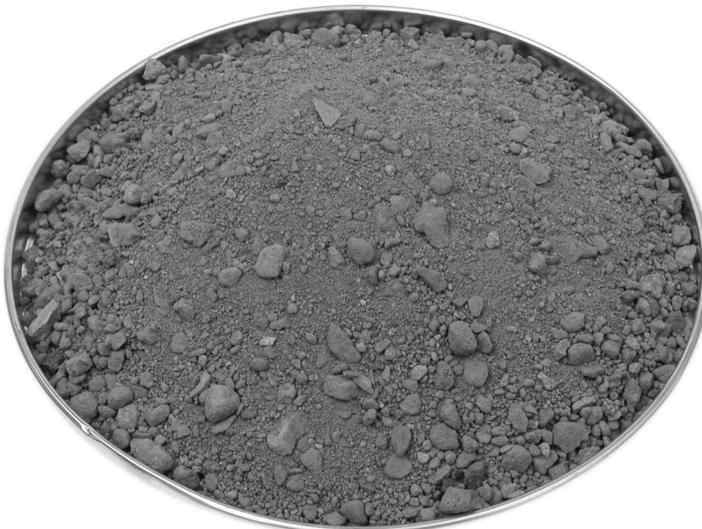


Abbildung 7.4: Teilprobe des Teersandes im Ausgangszustand ($\varnothing_{\text{Blech}}$ ca. 30 cm)

7.2.2 Stück- und Korngrößenverteilungen

An jeweils drei unabhängigen Teilproben der Ausbaustoffe werden die Stückgrößenverteilungen (SGV) durch Trockensiebungen bestimmt und anschließend gemittelt. Je eine weitere Probe dient zur Ermittlung der Korngrößenverteilung (KGV) und des Bindemittelgehaltes durch Heißextraktion mit anschließender Siebung.

Die Abbildungen 7.5 bis 7.7 ordnen die Stück- und Korngrößenverteilungen der drei Granulate S, B und C in den empfohlenen Sieblinienbereich für Asphalttragschichten der Mischgutarten C und CS nach den ZTV T-StB 95/02 ein. Abbildung 7.8 zeigt die Stück- und Korngrößenverteilungen des Teersandes T, eingeordnet in den empfohlenen Sieblinienbereich für Asphalttragschichten der Mischgutarten A und AO nach den ZTV T-StB 95/02. Danach weisen alle vier Ausbaustoffe den für Stückgrößenverteilungen pechhaltiger Recyclingmaterialien typischen Mangel an Füller und Feinsand auf. Auf diese charakteristische Eigenschaft wurde bereits im Kapitel 3.4.1 hingewiesen. Die Stückgrößenverteilungen der drei Granulate S, B und C enthalten außerdem insgesamt zu wenig Sand. Beim Granulat B ist zudem der Feinsplittgehalt in der Stückgrößenverteilung relativ gering. Der extreme Unterschied zwischen der Korn- und Stückgrößenverteilung des Granulates C stimmt mit der visuellen Einschätzung des Materials überein. Ausgehend von der Korngrößenverteilung muss es sich ursprünglich um ein Gemisch gehandelt haben, welches etwa einem Asphaltbeton 0/11 entsprach. Die Unterschiede zwischen Korn- und Stückgrößenverteilung bei den Granulaten S und B liegen innerhalb der üblichen Größenordnung und resultieren vorwiegend aus in größeren Stücken gebundenen Füller- und Sandkörnern. Im Splittbereich verlaufen Stück- und Korngrößenverteilung parallel, bzw. nähern sich wieder aneinander an.

Die Sieblinien der Ausbaustoffe im Ausgangszustand sind insgesamt als bautechnisch ungünstig einzuordnen. Es ist zu erwarten, dass die entsprechenden Probekörper große Hohlraumgehalte aufweisen werden. Dies kann sich nicht nur nachteilig auf deren Stabilität auswirken sondern zudem auch ein weniger dichtes Korngefüge ergeben. Die dadurch bedingte höhere Zugänglichkeit innenliegender Oberflächen kann die Immobilisierung der Schadstoffe negativ beeinflussen.

7.2.3 Bindemittelgehalte, optimale Wassergehalte sowie PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Trogeluaten

Neben den Stück- und Korngrößenverteilungen der vier Ausbaustoffe werden an ihnen auch die folgenden Eigenschaften bestimmt:

- Bindemittelgehalt B_p
- Trockenraumdichte ρ_{pr} und optimaler Wassergehalt w_{pr}
- PAK-Konzentration PAK_{T24} und Phenolindex PI_{T24} im Trogeluat

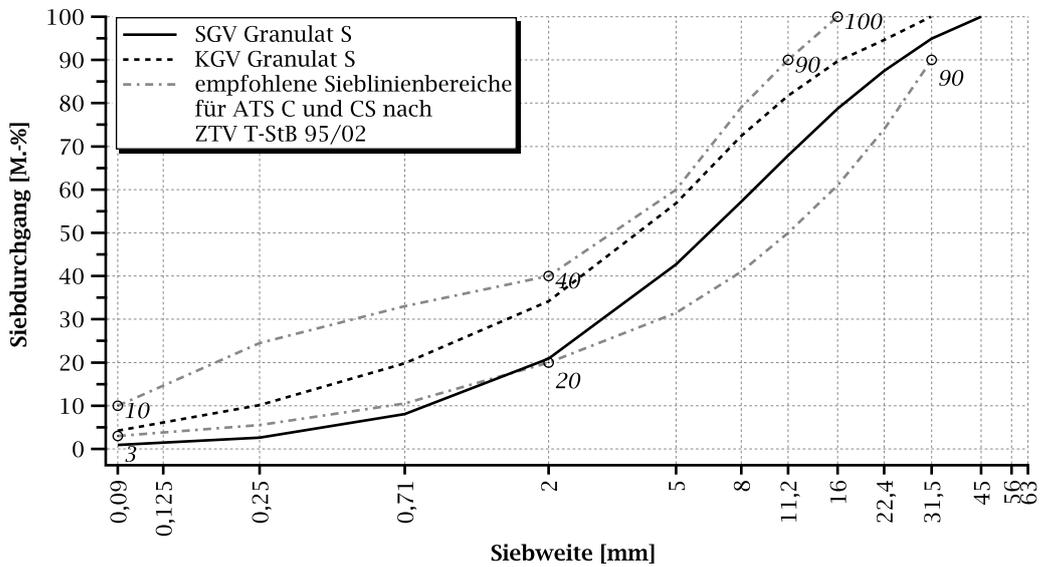


Abbildung 7.5: Stück- und Korngrößenverteilung des Granulates S im Ausgangszustand

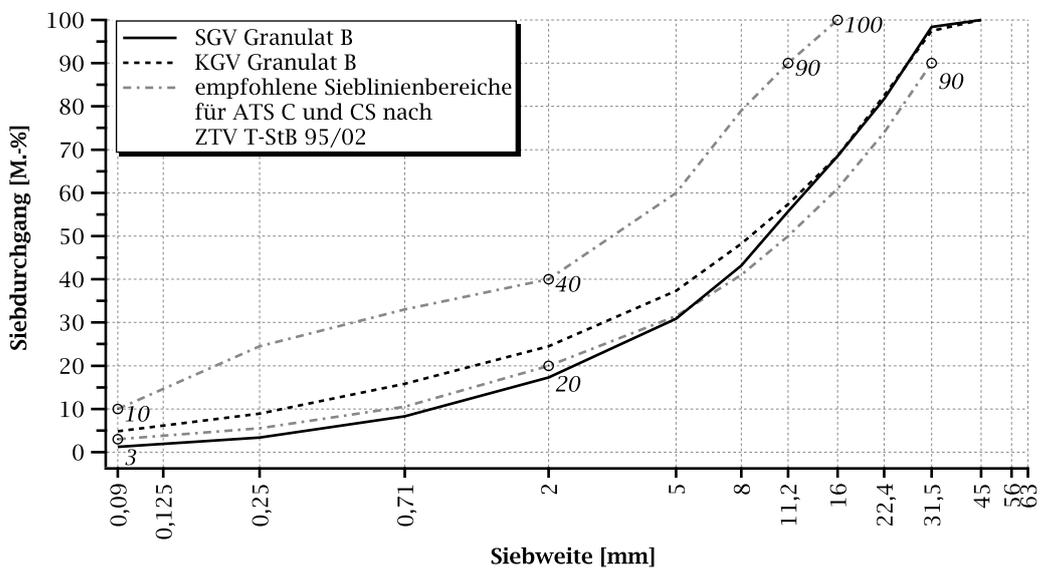


Abbildung 7.6: Stück- und Korngrößenverteilung des Granulates B im Ausgangszustand

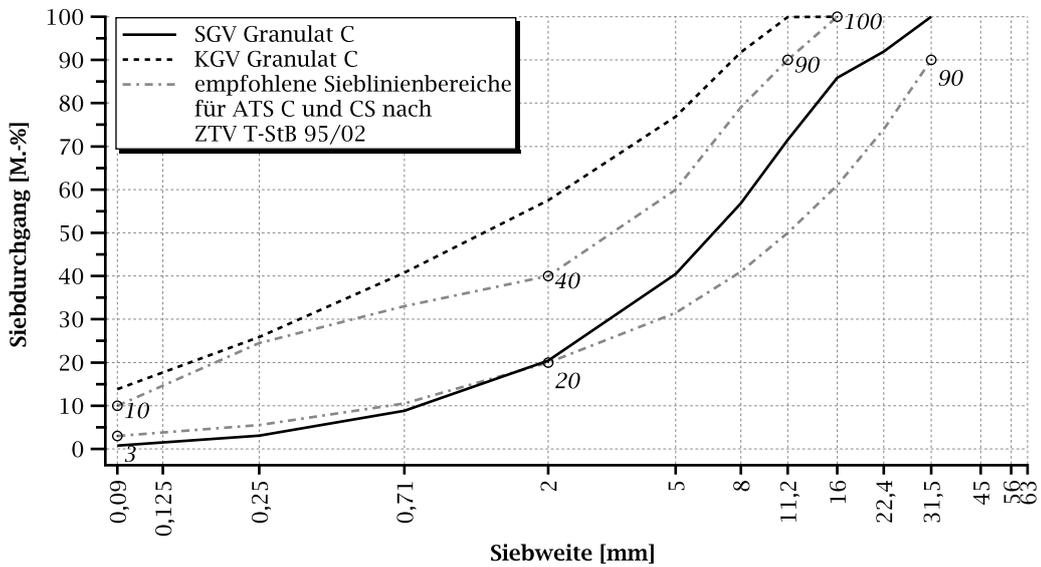


Abbildung 7.7: Stück- und Korngrößenverteilung des Granulates C im Ausgangszustand

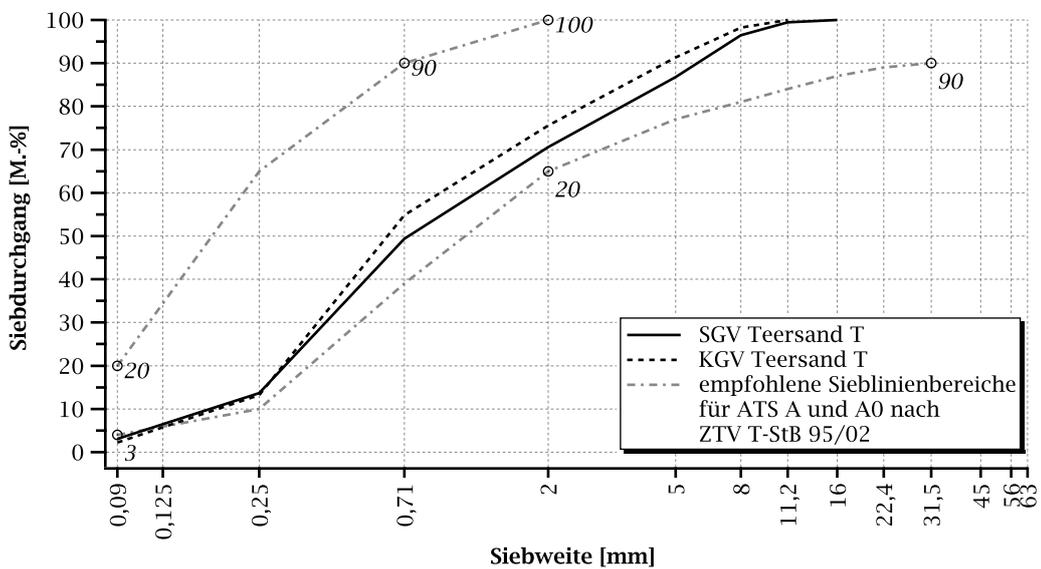


Abbildung 7.8: Stück- und Korngrößenverteilung des Teersandes T im Ausgangszustand

Tabelle 7.1: Bindemittelgehalte, optimale Wassergehalte, Trockenraumdichten sowie PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Trogeluaten der nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe

Prüfgröße	Einheit	Ausbaustoff			
		S	B	C	T
B_p	[M.-%]	2,7	2,4	5,6	0,4
w_{Pr}	[M.-%]	6,5	5,0	5,0	12,0
ρ_{Pr}	[g/cm ³]	1,987	1,996	1,702	1,810
PAK_{T24} P1	[µg/l]	47,8	210,7	13,2	126,3
PAK_{T24} P2	[µg/l]	45,5	176,6	16,0	137,4
PAK_{T24} P3	[µg/l]	63,2	146,5	27,3	207,5
PAK_{T24} P4	[µg/l]	46,7	114,0	23,9	208,2
PAK_{T24} Mittel	[µg/l]	50,8	161,9	20,1	169,9
R	[µg/l]	17,7	96,8	14,1	81,9
PI_{T24} P1	[mg/l]	< 0,02 ^a	10,60	< 0,02 ^a	< 0,02 ^a
PI_{T24} P2	[mg/l]	< 0,02 ^a	36,80	< 0,02 ^a	< 0,02 ^a
PI_{T24} P3	[mg/l]	< 0,02 ^a	2,23	< 0,02 ^a	0,03
PI_{T24} P4	[mg/l]	< 0,02 ^a	2,15	0,05	< 0,02 ^a
PI_{T24} Mittel	[mg/l]	< 0,02^a	12,95	0,03	< 0,02^a
R	[mg/l]	—	34,65	—	—

^aNachweisgrenze

Der optimale Wassergehalt w_{Pr} dient zur Berechnung der Emulsions- und Wasserzugabemengen nach Gleichung 3.3 auf Seite 30. PAK-Konzentration PAK_{T24} und Phenolindex PI_{T24} im Ausgangszustand der Ausbaustoffe werden bestimmt, um die Wirksamkeit der Bitumenemulsionen nach Umhüllung beurteilen zu können. Der nach den RuVA-StB zu ermittelnde Gesamtgehalt an PAK im Feststoff stellt für diese Untersuchungen keine geeignete Vergleichsgröße dar. Er lässt keinen Rückschluss auf die Eluierbarkeit von PAK zu und kann somit nicht den später folgenden Ergebnissen der Trogelutionen der Mischgutvarianten und Probekörper gegenübergestellt werden. Dieser Kennwert¹ dient nur der Charakterisierung und Klassifizierung eines Ausbaustoffes, gemäß Tabelle 3.5 auf Seite 27 und der Auswahl eines geeigneten Wiederverwertungsverfahrens. In Tabelle 7.1 sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Ausbaustoffen im Ausgangszustand zusammengefasst.

Wie sich zeigt, sind die Bindemittelgehalte der Ausbaumaterialien sehr unterschiedlich. Der Teersand weist gegenüber den drei Granulaten mit 0,4 M.-% einen unverhältnismäßig kleinen Bindemittelgehalt auf. Dies erklärt seinen schwachen Pechgeruch und

¹Der Feststoffgehalt eines pechhaltigen Ausbaustoffes wird in praxi nie wirksam. Die Schadstoffe können unter normalen Umgebungsbedingungen stets nur durch Wasserzutritt ausgelaugt werden, so dass im Grunde immer eine Elution vorliegt.

die hohe Übereinstimmung von Korn- und Stückgrößenverteilung. Der sehr hohe Bindemittelgehalt des Granulates C von 5,6 M.-% bewirkt bei diesem Ausbaustoff das genaue Gegenteil. In diesem anscheinend ehemaligen Deckenbaustoff sind so viele Feinkörner miteinander verklebt, dass sich eine enorme Diskrepanz zwischen seiner Korn- und Stückgrößenverteilung ergibt. Bei den Granulaten S und B kann, gemessen an der Inhomogenität der Ausbaustoffe, von einem Bindemittelgehalt um die 2,5 M.-% ausgegangen werden. Dieser Bindemittelgehalt lässt auf die frühere Verwendung als untere Tragschichtlage schließen.

Die Trockenraumdichten und optimalen Wassergehalte bedürfen keiner weiteren Erläuterungen. Die festgestellten Werte sind aufgrund der Kornzusammensetzungen und Bindemittelgehalte der Ausbaustoffe plausibel.

Die mittleren PAK-Konzentrationen der Trogeluate des Granulates B (161,9 µg/l) und des Teersandes T (169,9 µg/l) sind im Vergleich zu denen der anderen pechhaltigen Ausbaustoffe sehr hoch. Das Ergebnis des Teersandes, welcher kaum extrahierbares Bindemittel enthält und in dessen Trogeluat trotzdem eine so hohe PAK-Konzentration vorzufinden ist, ist durch nicht zu extrahierende Bindemittelbestandteile bzw. durch seine vergleichsweise sehr hohe spezifische Oberfläche erklärbar. Bei der 24-stündigen Trogelution werden in erster Linie oberflächennahe PAK ausgelaugt, so dass eine hohe spezifische Oberfläche diesbezüglich begünstigend wirkt. Das Trogeluat des Granulates S enthält demgegenüber sehr viel weniger PAK, im Mittel 50,8 µg/l. Die mittlere PAK-Konzentration im Eluat des Granulates C beträgt nur 20,1 µg/l. Bei diesem Ausbaustoff sind auch sämtliche Einzelwerte geringer als der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 (30 µg/l) für Eluate aus *verdichteten Probekörpern*. Das Granulat C enthält zwar viel Bindemittel, aus dem Pechanteil des Carbobitumens lassen sich PAK jedoch nur in sehr geringem Umfang eluieren. Die zusätzlich zu den Mittelwerten angegebenen Spannweiten *R* der PAK-Konzentrationen bestätigen die im Kapitel 3.4.1 erwähnten extremen Schwankungen, die bei der PAK-Analytik pechhaltiger Ausbaustoffe möglich sind.

Die in den Trogeluaten der Ausbaustoffe S und T festgestellten Phenolindizes liegen unterhalb der Nachweisgrenze der Analyseverfahren von 0,02 mg/l. Beide Ausbaustoffe enthalten folglich steinkohlenstämmiges Teerpech, in welchem normalerweise nur sehr geringe Mengen Phenole vorkommen (siehe Kapitel 3.1 und 3.4.2). Der mit 0,03 mg/l nur minimal darüber liegende Phenolindex des Granulates C geht auf einen einzelnen Prüfwert und den vergleichsweise hohen Bindemittelgehalt des Ausbaustoffes zurück. Insgesamt spielt die Phenolbelastung der drei Ausbaustoffe S, C und T keine Rolle für die weiteren Untersuchungen. Die Bestimmung des Phenolindex findet daher im Folgenden an Proben dieser Ausbaustoffe nicht mehr statt, weil nicht zu erwarten ist, dass nach der Umhüllung dieser Ausbaustoffe mit Bitumenemulsion noch Phenole in nachweisbarem Umfang eluiert werden. Dies gilt erst recht nach Verdichtung des Emulsionsmischgutes zu Probekörpern.

Demgegenüber ist der mittlere Phenolindex in den Eluaten des Granulates B deutlich höher (12,94 mg/l). Die Spannweite beträgt hierbei 34,57 mg/l. Selbst der geringste an

diesem Ausbaustoff bestimmte Phenolindex liegt mit 2,15 mg/l ca. um das Zwanzigfache über dem Schwellenwert der RuVA-StB 01/05 von 0,1 mg/l, der höchste Phenolindex des Granulates B beträgt mit 36,8 mg/l sogar etwa das 350-fache dieses Schwellenwertes. Der sehr hohe Phenolindex des Ausbaustoffes B belegt den braunkohlentypischen Charakter des darin enthaltenen pechhaltigen Bindemittels.

7.3 Eignungsprüfungen anhand von Emulsion Nr. 1

Aufbauend auf den Untersuchungen der Ausgangsmaterialien findet mit jedem der vier Ausbaustoffe eine Eignungsprüfung unter Verwendung der Emulsion Nr.1 und jeweils drei verschiedenen Bindemittelzugaben statt (12 Mischgutvarianten). Ziel ist es, für jeden Ausbaustoff eine Bitumenzugabemenge auszuwählen, mit der anschließend die übrigen neun Bitumenemulsionen auf ihre Wirksamkeit bei jedem Ausbaustoff untersucht werden sollen. Als Auswahlkriterien für die Bitumenzugabemengen aus den Eignungsprüfungen dienen:

- die Marshall-Stabilitäten MS_{14L} und MS_{7L7W} ,
- der Hohlraumgehalt H_{bit} sowie
- die PAK-Konzentration PAK_{T24} und der Phenolindex PI_{T24} im Trogeluat

des unverdichteten Mischgutes sowie der Probekörper. Da die Wassergehalte der untersuchten Emulsionen untereinander variieren, würden gleiche Emulsionszugabemengen zu unterschiedlichen Bitumenzugaben führen. Durch die Verwendung gleicher Bitumenzugabemengen sollen für alle zehn Emulsionen gleiche Voraussetzungen bei der Umhüllung der Ausbaustoffe geschaffen werden.

7.3.1 Mischgut- und Probekörperherstellung, Probenlagerung

Tabelle 7.2 enthält die in den Eignungsprüfungen verwendeten Mischgutzusammensetzungen. Bei der Wahl der Bitumenzugabemengen ist zu berücksichtigen, dass zu hohe Gesamtbindemittelgehalte im Emulsionsmischgut zu niedrigen Marshall-Stabilitäten führen können, andererseits beeinträchtigen zu niedrige Zugabemengen ggf. die Schadstoffimmobilisierung. Für die Ausbaustoffe S, C und B werden daher auf der Grundlage bestehender Erfahrungen jeweils Bitumenzugabemengen von 1,5 M.-%, 2,0 M.-% und 2,5 M.-% vorgesehen. Da der Ausbaustoff T nur einen sehr geringen Bindemittelgehalt aufweist, wegen seiner feinen Körnung jedoch gleichzeitig eine große spezifische Oberfläche hat, werden hier Bitumenzugaben von 2,5 M.-%, 3,0 M.-% und 3,5 M.-% vorgesehen.

Die Berechnung der Zugabemengen von Emulsion (E_Z) und Wasser (W_Z) erfolgt nach Gleichung 3.3 auf Seite 30. Der Abzug w_a vom Proctor-Wassergehalt w_{Pr} wird nach am Lehrstuhl vorliegenden Erfahrungen konstant auf 1,5 M.-% festgelegt. Diese Festlegung

Tabelle 7.2: Zusammensetzungen der 12 Mischgutvarianten der Eignungsprüfungen

phABS	w_{Pr} [M.-%]	w_a [M.-%]	B_Z [M.-%]	w_E [M.-%]	B_E [M.-%]	E_Z [M.-%]	W_Z [M.-%]	B_{MG} [M.-%]
S	6,5	1,5	1,5	39,5	60,5	2,5	3,3	4,1
			2,0			3,3	4,6	
			2,5			4,1	5,1	
B	5,0	1,5	1,5	39,5	60,5	2,5	1,8	3,8
			2,0			3,3	4,3	
			2,5			4,1	4,8	
C	5,0	1,5	1,5	39,5	60,5	2,5	1,8	7,0
			2,0			3,3	7,5	
			2,5			4,1	7,9	
T	12,0	1,5	2,5	39,5	60,5	4,1	7,6	2,8
			3,0			5,0	3,3	
			3,5			5,8	3,8	

berücksichtigt die Ausbaustoffe B und C, bei denen wegen ihrer niedrigen Proctor-Wassergehalte nur wenig Recyclingbindemittel zugegeben werden kann. Der Wassergehalt der in der Eignungsprüfung verwendeten Charge der Emulsion Nr. 1 beträgt 39,5 M.-%, so dass der angestrebte Gesamtwassergehalt des Emulsionsmischgutes allein durch das Emulsionswasser und die zur Hälfte anzusetzende Bitumenmenge beinahe erreicht ist. Daher sind nur noch 0,6 M.-% Wasser extra zuzugeben. Noch geringere Mengen hätten sich bei der Mischgutherstellung nicht mehr homogen in den Ausbaustoffen verteilen lassen. Andererseits soll nicht gänzlich auf eine Wasserzugabe verzichtet werden, weil sich das Anfeuchten der Ausbaustoffe vor der Emulsionszugabe positiv auf den Brechprozess der Emulsion auswirkt.

Aus den gewählten Bitumenzugabemengen ergeben sich die in der letzten Spalte der Tabelle 7.2 dargestellten, rechnerischen Gesamtbindemittelgehalte B_{MG} . Durch die gewählten Bitumenzugaben erreichen alle Mischgutvarianten der Ausbaustoffe S, C und B Gesamtbindemittelgehalte, welche den Mindestanforderungen für Asphalttragschichten des Typs C nach ZTV T-StB 95/02 entsprechen. Gemeinsam mit den Stückgrößenverteilungen dieser Ausbaustoffe führt dies zu Mischgutzusammensetzungen, die sich insgesamt an Asphalttragschichten des Typs C anlehnen. Beim Ausbaustoff T wird die Mindestanforderung der ZTV T-StB 95/02 an den Bindemittelgehalt von Asphalttragschichten des Typs A0 nur bei den Bitumenzugaben von 3,0 M.-% und 3,5 M.-% erfüllt. Der Mindestbindemittelgehalt für Asphalttragschichten des Typs A ist mit wirtschaftlich vertretbaren Bitumenzugaben nicht zu erreichen. Unter Einbeziehung der Stückgrößenverteilung des Ausbaustoffes T entsprechen die Mischgutvarianten mit den

beiden höheren Bindemittelgehalten daher etwa einem Asphalttragschichtmischgut des Typs A0.

Zur chargenweisen Herstellung des Emulsionsmischgutes dient ein Zwangsmischer der Firma REGO. Zunächst ist der pechhaltige Ausbaustoff anzufeuchten, indem das Zugabewasser darin möglichst homogen untergemischt wird. Die Mischzeit nach der darauf folgenden Emulsionszugabe richtet sich nach dem Brechverhalten der jeweiligen Emulsion. Das Mischgut darf nicht mehr am Mischeimer haften, muss aber rieselfähig sein und eine gleichmäßig schwarzbraune bis schwarze Färbung angenommen haben. Diese äußeren Merkmale kennzeichnen das Erreichen der Phase 3 des Fünf-Stufen-Modells von GLET (siehe Kapitel 3.6.2) und lassen auf ein gut verarbeitbares Emulsionsmischgut schließen. Das später lose zu untersuchende Mischgut wird nach der Herstellung auf Folien zur Trocknung ausgebracht und manuell fein verteilt, damit sich möglichst wenige zusätzliche Stücke bilden.

Für die Probekörperherstellung kommt das im Kapitel 3.6.2 auf Seite 33 beschriebene Verfahren des Lehrstuhls für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München zur Anwendung. Das in eine zylindrische Form eingefüllte Mischgut wird über zwei Druckplatten an den Stirnseiten, nach dem Doppelkolbenprinzip von oben und unten mit einer zehnminütigen statischen Auflast von 100 kN verdichtet. Nach einem Tag Trocknungszeit werden die fertigen Probekörper mit Hilfe einer kleineren Presse ausgeformt. Sieben Probekörper lagern zur Reifung 14 Tage lang stehend im Konstantklima bei 23 °C und 50% Luftfeuchte. Weitere drei Probekörper lagern ebenfalls stehend sieben Tage im Konstantklima und anschließend sieben Tage liegend im Wasserbad bei konstant 23 °C. Eine zur Rohdichtebestimmung vorgesehene Probe des losen Mischgutes trocknet 14 Tage lang bei Raumklima. Die beschriebene Methodik wird auch bei allen weiteren Untersuchungen angewendet.

7.3.2 Probenbezeichnung

Die Probenbezeichnung für die Mischgutvarianten und für die Probekörper setzt sich aus der Abkürzung für den verwendeten Ausbaustoff, der Nummer der verwendeten Bitumenemulsion und der zugegebenen Bitumenmenge zusammen, also z. B. S-01-1,5 (Ausbaustoff S - Emulsion Nr. 1 - 1,5 M.-% Bitumenzugabe). Diese Nomenklatur wird in der gesamten weiteren Arbeit verwendet.

7.3.3 Geprüfte Eigenschaften, Ergebnisse, Auswahl der Bitumenzugabemengen

Zur Bewertung der Verformungsbeständigkeit einer Mischgutvariante werden an jeweils 3 Probekörpern die Marshall-Stabilitäten MS_{14L} und MS_{7L7W} ermittelt und daraus die nach der Wasserlagerung verbliebene, relative Marshall-Stabilität $MS_{7L7Wrel}$ berechnet. Diese Größe ermöglicht es, die Wasserempfindlichkeit der Gemische einzuschätzen. Stabilitätsverluste von mehr als 50% sind kennzeichnend für wasserempfindliche Ge-

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Eignungsprüfungen mit Emulsion Nr. 1

Mischung	H_{bit} [Vol.-%]	MS_{14L} [kN]	MS_{7L7W} [kN]	$MS_{7L7Wrel}$ [%]	PAK_{T24}		PI_{T24}	
					MG [µg/l]	PK [µg/l]	MG [mg/l]	PK [mg/l]
S-1-1,5	11,0	4,2	2,8	66,7%	17,2	8,0	— ^a	— ^a
S-1-2,0	8,5	3,6	2,8	77,8%	17,0	8,0	— ^a	— ^a
S-1-2,5	9,1	3,1	2,2	71,0%	15,3	7,7	— ^a	— ^a
B-1-1,5	9,1	4,2	2,8	66,7%	75,8	10,7	14,6	1,8
B-1-2,0	8,6	3,6	2,4	66,7%	40,4	20,2	2,6	5,7
B-1-2,5	9,3	3,5	3,1	88,6%	44,5	11,7	5,3	5,4
C-1-1,5	8,5	4,0	3,5	87,5%	14,0	8,5	— ^a	— ^a
C-1-2,0	7,6	5,3	3,9	73,6%	11,8	5,7	— ^a	— ^a
C-1-2,5	7,9	3,1	2,7	87,1%	7,1	5,9	— ^a	— ^a
T-1-2,5	16,4	4,3	2,9	67,4%	50,0	14,1	— ^a	— ^a
T-1-3,0	13,7	4,2	2,8	66,7%	33,6	22,7	— ^a	— ^a
T-1-3,5	14,1	4,1	2,7	65,9%	29,6	9,8	— ^a	— ^a

^aNicht bestimmt, da bereits vor Umhüllung an der Nachweisgrenze.

mische.² Die ebenfalls berechneten Marshall-Fließwerte FW_{7L7W} und $FW_{7L7Wrel}$ liefern wegen ihrer mit hohen Unsicherheiten behafteten Bestimmung keine zusätzlichen, substantziellen Aussagen und sind daher nur im Anhang D in den Tabellen D.15 bis D.18 dokumentiert. An zwei weiteren Probekörpern werden die Raumdichten $\rho_{A,T}$ mittels Tauchwägungsverfahren und an je einer Mischgutprobe die Rohdichte $\rho_{R,bit}$ zur Berechnung des Hohlraumgehaltes H_{bit} nach DIN 1996-7 ermittelt [1]. Die Trogeluate von jeweils zwei Mischgutproben (MG) und Probekörpern (PK) dienen der Bestimmung der PAK-Konzentration PAK_{T24} und des Phenolindex PI_{T24} . Für die Beurteilung der PAK- und Phenolimmobilisierung durch die verschiedenen Bitumenzugabemengen spielen die Prüfwerte der unverdichteten Mischgutproben die wesentliche Rolle, da nur sie die Beurteilung der Umhüllung ohne reduzierende Effekte aus der Verdichtung zum Probekörper zulassen. Die Ergebnisse der Eignungsprüfungen sind in diesem Arbeitsschritt nur soweit zu interpretieren, wie es für die beabsichtigte Auswahl der Rezepturen erforderlich ist. Eine ausführliche Interpretation erfolgt erst gemeinsam mit den Ergebnissen der anderen neun Bitumenemulsionen. Tabelle 7.3 stellt die Ergebnisse der Eignungsprüfungen zusammenfassend dar.

Die Hohlraumgehalte H_{bit} der Probekörper durchlaufen bei den mittleren Bindemittelzugaben jeweils ein Minimum. Dies kann als Indiz für die aus bautechnischer Sicht

²Die Bestimmung der Marshall-Stabilitäten widerspricht zwar einigen Regelwerken für Kaltrecyclingmischgut, ermöglicht jedoch Vergleiche mit den Anforderungen der ZTV T-StB 95/02 (siehe Zielstellung der Arbeit im Kapitel 2 und Untersuchungsprogramm im Kapitel 4.1).

richtig gewählten Bitumenzugabemengen gelten. Die Hohlraumgehalte der Probekörper der Ausbaustoffe S, B und C sind, bis auf eine Ausnahme beim Ausbaustoff S, geringer als der Maximalwert für Asphalttragschichten des Typs C (10 Vol.-%). Erwartungsgemäß sind an den Probekörpern des sehr bindemittelreichen Ausbaustoffes C die niedrigsten Hohlraumgehalte und beim fast einkörnigen Teersand T die weitaus größten Hohlraumgehalte festzustellen. Letzterer hält bei der Bindemittelzugabe von 3,0 M.-% gerade noch den Höchstwert für Asphalttragschichten des Typs A von 14 Vol.-% ein.

Die Marshall-Stabilitäten MS_{14L} liegen, bis auf den Prüfwert der Mischgutvariante C-01-2,0, bei allen Ausbaustoffen im Bereich der Mindestanforderungen für Asphalttragschichten der Typen A (3 kN) und B (4 kN). Die kompositionelle Anlehnung an den Typ C findet sich hier nicht wieder, was unter anderem auf das Wirksamwerden der Korngrößenverteilungen bei der Marshall-Prüfung zurückgeht. Beim Teersand T erfüllen alle Marshall-Stabilitäten die Mindestanforderungen für Asphalttragschichten des Typs B. Dieser Ausbaustoff ist sehr homogen zusammengesetzt und seine Stück- und Korngrößenverteilungen sind fast identisch, was sich hier offensichtlich positiv auswirkt. Bei allen vier Ausbaustoffen ist die Marshall-Stabilität MS_{14L} bei der höchsten Bitumenzugabe jeweils am geringsten und liegt bei den drei Ausbaustoffen S, B und C im Bereich der Mindestanforderung für Asphalttragschichten des Typs A. Diese Abnahme ist beim Teersand T zwar nur sehr gering aber ebenfalls erkennbar.

Durch die Luft-Wasser-Lagerung sinken die Marshall-Stabilitäten generell im Mittel um etwa 1 kN ab (MS_{7L7W}). Der Stabilitätsabfall ist in allen Fällen deutlich geringer als 50%. Daher ist keines der Gemische als wasserempfindlich einzustufen. Die meisten Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} erfüllen die Mindestanforderungen für Asphalttragschichten des Typs A jedoch nicht mehr. Eine weitere Erhöhung der Bitumenzugabemengen ist daher aus bautechnischer Sicht nicht zielführend.

Wie aus Tabelle 7.1 auf Seite 87 hervorgeht, enthält das Eluat des Ausbaustoffes S PAK in einer Konzentration von etwa 50 µg/l. Die Umhüllung mit 1,5 M.-% Bitumen senkt diesen Wert auf 17,2 µg/l ab, was etwa 30% des Ausgangswertes entspricht. Die Erhöhung der Bitumenzugabe auf 2,0 M.-% und 2,5 M.-% hat demgegenüber nur noch eine geringe Wirkung. Durch die Verdichtung des Mischgutes zum Probekörper kann die PAK-Konzentration in den Eluaten nochmals geringfügig verringert werden, auf etwa 8 µg/l. Alle PAK-Konzentrationen der Mischgutproben und Probekörper des Ausbaustoffes S liegen damit unterhalb des Grenzwertes der RuVA-StB 01/05 von 30 µg/l, der für die Eluate von *Probekörpern* gilt. Gleiches trifft auch für die Proben des Ausbaustoffes C zu, bei welchem aber bereits die PAK-Konzentration im Eluat des unbehandelten Ausbaustoffes nur 20,1 µg/l beträgt. Auch bei den Ausbaustoffen B und T sind deutliche Reduzierungen der PAK-Konzentrationen durch die Umhüllung mit der Emulsion Nr. 1 feststellbar. Da in diesen Fällen die PAK-Konzentrationen in den Eluaten der unbehandelten Ausbaustoffe wesentlich höher sind als bei den Ausbaustoffen S und C (siehe Tabelle 7.1 auf Seite 87), genügt die reine Umhüllung in diesen Fällen noch nicht, um den Grenzwert der RuVA-StB 01/05 einzuhalten. Die entsprechenden Probekörper, für

die der Grenzwert von 30 µg/l auch nur zutrifft, erfüllen diese Anforderung allerdings problemlos. Die Ergebnisse der Mischgutproben bzw. Probekörper der Ausbaustoffe B und T sind vergleichsweise großen Schwankungen unterworfen, welche auf die hohen Spannweiten der PAK-Konzentrationen dieser Materialien im Ausgangszustand zurückzuführen sind.

Die Phenolindizes der unbehandelten Ausbaustoffe S, C und T liegen an oder unterhalb der Nachweisgrenze von 0,02 mg/l (siehe Tabelle 7.1 auf Seite 87). Aus diesem Grunde werden an den Eluaten der entsprechenden Mischgutvarianten und Probekörper keine Phenolindizes bestimmt.³ Die Phenolindizes des unbehandelten Ausbaustoffes B unterliegen extremen Schwankungen, die Prüfwerte variieren etwa um das Zwanzigfache. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass einige Phenolindizes des losen Mischgutes bzw. der Probekörper höher sind als einige Einzelwerte des Ausgangsmaterials. Dennoch lassen sich aus den Ergebnissen folgende Schlüsse ziehen. Durch die Umhüllung mit emulgiertem Bitumen kann der Phenolindex im Eluat des losen Mischgutes tendenziell gesenkt werden. Die Verdichtung des losen Mischgutes zum Probekörper erbringt darüber hinaus keine weitere Absenkung, die eindeutig als Effekt der Oberflächenreduzierung erkennbar ist. Mit den verwendeten Bitumenzugaben von 1,5 M.-% bis 2,5 M.-% kann der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 von 0,1 mg/l nicht eingehalten werden. Ein Zusammenhang der Phenolindizes mit den zugegebenen Bindemittelmengen lässt sich aber weder aus den Prüfwerten des losen Mischgutes noch aus denen der Probekörper ableiten. Für die Auswahl der verwendeten Mischgutrezepturen sind die Phenolindizes folglich nicht heranzuziehen.

Zusammenfassend ergeben sich aus den Eignungsprüfungen folgende Ergebnisse: Die Hohlraumgehalte und Marshall-Stabilitäten haben gezeigt, dass die Bindemittelzugabemengen richtig gewählt sind. Die geringsten Hohlraumgehalte werden jeweils bei den mittleren Bitumenzugabemengen erreicht. Mit steigenden Zugaben an Bitumen verschlechtern sich die bautechnischen Eigenschaften. Die PAK-Konzentrationen in den Eluaten verringern sich durch die Emulsionszugaben deutlich. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Modellversuche zur PAK-Immobilisierung in Kapitel 6 überein. Die Reduktion durch die Umhüllung mit Bitumenemulsion ist bei den Ausbaustoffen S, B und T höher als die anschließende weitere Absenkung durch die Oberflächenreduzierung am Probekörper. Die Phenolindizes in den Eluaten des mit braunkohletypischem Pech belasteten Ausbaumaterials B können trotz Umhüllung und Verdichtung nicht unter den Grenzwert der RuVA-StB 01/05 von 0,1 mg/l gesenkt werden. Eine Abhängigkeit von der Bitumenzugabe ist nicht erkennbar.

Für die folgenden Untersuchungen mit den weiteren neun Bitumenemulsionen werden anhand dieser Ergebnisse die in Tabelle 7.4 aufgeführten Bitumenzugabemengen als bestmögliche Kompromisse zwischen der erreichbaren Schadstoffimmobilisierung und den bautechnischen Eigenschaften ausgewählt. Die Wasserzugabemengen richten sich weiterhin nach den Proctor-Wassergehalten w_{Pr} und den Wassergehalten w_E der Bi-

³Stichprobenartige Kontrollen haben die Richtigkeit dieser Vorgehensweise bestätigt.

tumenemulsionen. Damit werden für alle Bitumenemulsionen vergleichbare Voraussetzungen für die Umhüllung (gleiche Zugabemenge an Bitumen) und für die Verdichtung (optimale Wassergehalte) geschaffen.

Tabelle 7.4: In den Eignungsprüfungen ausgewählte Bitumenzugabemengen

phABS	S	B	C	T
Bitumenzugabe	2,0 M.-%	2,0 M.-%	2,0 M.-%	3,5 M.-%

7.4 Vergleichende Untersuchungen mit allen Emulsionen

Im Anschluss an die Eignungsprüfungen werden die Untersuchungen mit den übrigen neun Bitumenemulsionen weitergeführt, wobei für die einzelnen Ausbaustoffe nur noch die in Tabelle 7.4 dokumentierten Bitumenzugaben Verwendung finden. Ziel dieser Untersuchungen ist die vergleichende Betrachtung der mit den zehn Bitumenemulsionen und den vier bautechnisch nicht aufbereiteten, pechhaltigen Ausbaustoffen erreichbaren bautechnischen Eigenschaften (Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte) bzw. Schadstoffimmobilisierungsraten (PAK und Phenole). Nach Abschluss der Versuche sollen auf der Grundlage der erzielten Resultate drei Bitumenemulsionen mit charakteristischen Eigenschaften für die Untersuchungen mit den bautechnisch aufbereiteten Ausbaustoffen ausgewählt werden.

Die Mischgut- und Probekörperherstellung erfolgt analog zur Vorgehensweise in den Eignungsprüfungen, gleiches gilt für die Lagerung, Bezeichnung und anschließende Prüfung der Proben (siehe Kapitel 7.3.1, 7.3.2 und 7.3.3). Da die Wassergehalte der Bitumenemulsionen in jeder verwendeten Charge leicht voneinander abweichen, werden die zuzugebenden Mengen an Bitumenemulsion und Wasser für jede Charge der Bitumenemulsionen neu berechnet, um die in den Eignungsprüfungen festgelegten Zugabemengen an frischem Bitumen exakt einzuhalten. Sämtliche Mischgutrezepturen sind im Anhang C in den Tabellen C.2 bis C.5 dokumentiert. Die Beurteilung der bautechnischen Eigenschaften erfolgt analog zu den Eignungsprüfungen nur an den Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalten; die entsprechenden Marshall-Fließwerte sind im Anhang D in den Tabellen D.15 bis D.18 aufgeführt.

7.4.1 Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte

Die Abbildungen 7.9 bis 7.12 stellen die an den Probekörpern der vier Ausbaustoffe S, B, C und T bestimmten Marshall-Stabilitäten MS_{14L} nach Luftlagerung und MS_{7L7W} nach Luft-Wasser-Lagerung sowie deren Hohlraumgehalte H_{bit} grafisch dar. Zusätzlich ist bei den Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} angegeben, wie viel Prozent sie bezogen

auf die Stabilitäten MS_{14L} , noch ausmachen ($MS_{7L7Wrel}$). Die auf den Abszissen ange-tragenen Mischgutzusammensetzungen sind nach Arten bzw. Sorten der emulgierten Bitumen sortiert, die jeweils oberhalb der Abszissen angegeben sind. Die hellgrauen Unterlegungen repräsentieren die Bereiche zwischen den nach DIN 1996-7 berechneten Vergleichsgrenzen für die Hohlraumgehalte [1]. Die Vergleichsgrenzen beziehen sich auf den jeweiligen Mittelwert von H_{bit} und den Rückstand auf dem 11,2 mm-Sieb der Stückgrößenverteilung.

Die Probekörper des Teersandes T erfüllen die Anforderungen der ZTV T-StB 95/02 an den maximalen Hohlraumgehalt für Asphalttragschichten des Typs A0 ohne Ein-schränkungen. Die Probekörper der anderen Ausbaustoffe halten die Anforderungen der ZTV T-StB 95/02 an den maximalen Hohlraumgehalt für Asphalttragschichten des Typs C im Wesentlichen ein. Nur beim Ausbaustoff B treten drei geringfügige Überschrei-tungen auf, was unter anderem auf die besonders ungünstige Granulometrie dieses Aus-baustoffes zurückgeht. Die Schwankungen der Hohlraumgehalte bei den Ausbaustoffen S, B und C liegen innerhalb der berechneten Vergleichsgrenzen. Beim Teersand T über-schreiten mehrere Prüfwerte die obere bzw. untere Vergleichsgrenze. Dieser Umstand ist auf die Ungenauigkeiten des Tauchwägevorgangs bei Hohlraumgehalten > 12 Vol.-% zurückzuführen. Das Tauchwägevorgang wird trotz der hohen Hohlraumgehalte zur Raumdichtebestimmung der Probekörper des Teersandes angewendet, um die Prüfwerte mit denen der anderen Probekörper vergleichen zu können. Die Hohlraumgehalte der Probekörper aus den Ausbaustoffen S und B und den Emulsionen Nr. 2-10 sind, gemessen an den Vergleichsgrenzen, mit den Werten der Emulsion Nr. 1 vergleichbar. Beim Teersand T sind die Hohlraumgehalte der Probekörper der Emulsionen Nr. 2-10 deutlich höher als bei der Emulsion Nr. 1, beim Ausbaustoff C hingegen geringer. Diese Abweichungen sind wahrscheinlich auf Mengeneffekte zurückzuführen, welche durch die Verarbeitung größerer Einwaagen bei der Mischgutherstellung entstanden sind. Ein Zusammenhang der erreichten Hohlraumgehalte mit den zu erwartenden Viskositäten der emulgierten Bitumen ist bei den Ausbaustoffen S, B und C nicht erkennbar. Lediglich beim sehr homogenen Teersand ergeben sich einige Anhaltspunkte, die einen Einfluss der Bindemittelviskosität auf den Hohlraumgehalt vermuten lassen. So erreicht z. B. die Mischung T-09-3,5 mit dem recht harten PmB 65 und einem nicht weiter bekannten Zusatz⁴ erwartungsgemäß den höchsten Hohlraumgehalt von 19,1 Vol.-%. Die Hohlraum-gehalte der vergleichsweise weichen Mischungen T-01-3,5, T-04-3,5 und T-05-3,5 sind demgegenüber geringer. Dennoch lassen sich hieraus keine klaren Aussagen ableiten, da der Trend z. B. durch die Ergebnisse der Mischungen T-02-3,5 und T-03-3,5 gestört wird. Was die anderen drei Ausbaustoffe angeht, so ist bei diesen klar zu erkennen, dass die Verdichtungseigenschaften der Mischgutvarianten und die Hohlraumgehalte der Probekörper im Wesentlichen durch die stark variierenden Granulometrien der Aus-

⁴Vermutlich handelt es sich um einen Haftvermittler, der bei anionischen Emulsionen oft verwendet wird (siehe Kapitel 3.5.1).

7.4 Vergleichende Untersuchungen mit allen Emulsionen

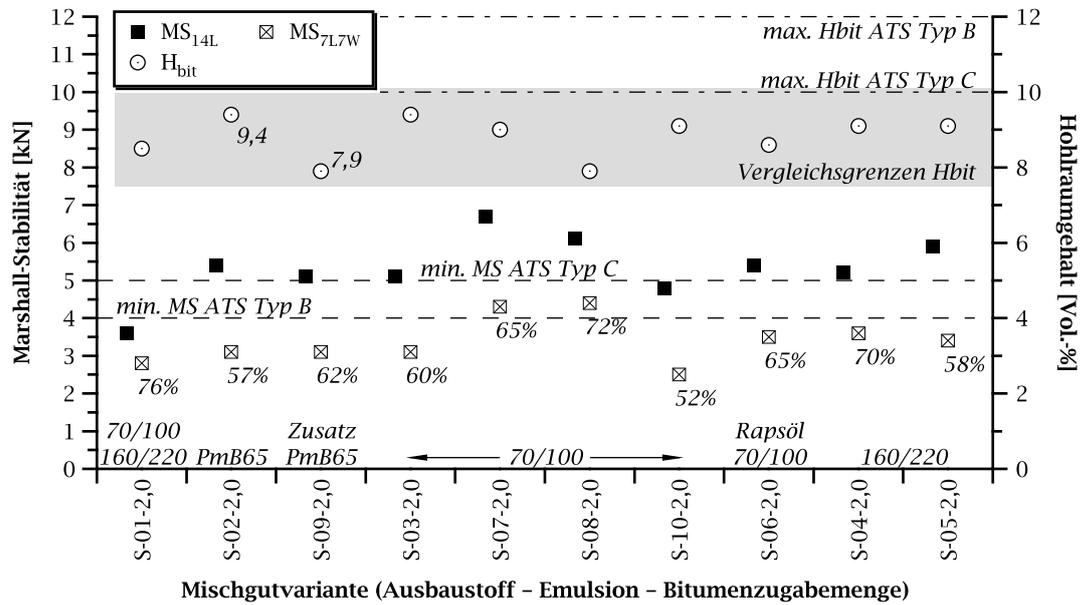


Abbildung 7.9: Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff S hergestellten Probekörper

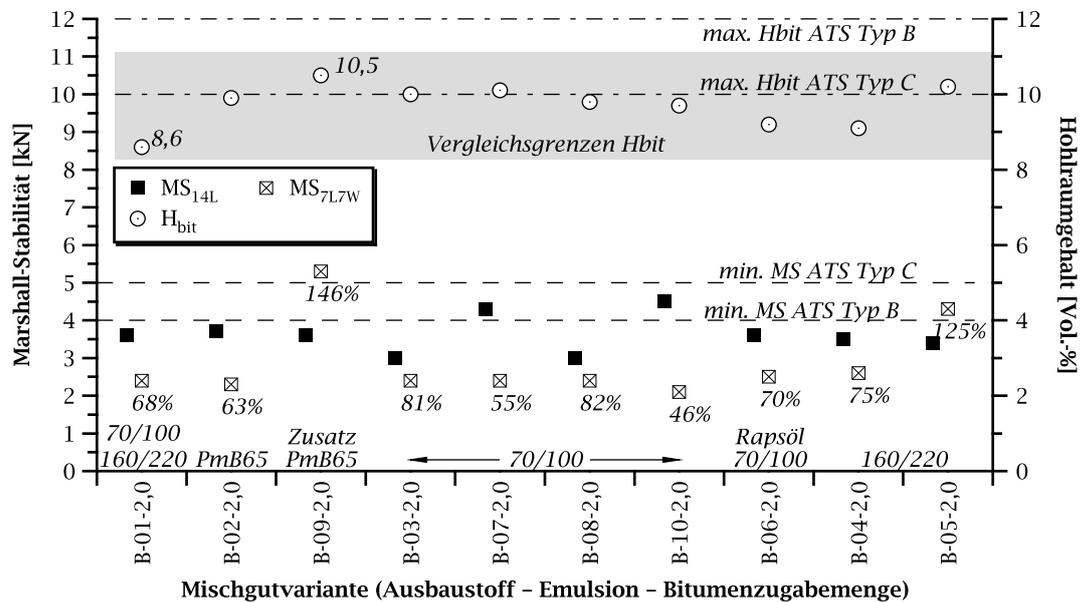


Abbildung 7.10: Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff B hergestellten Probekörper

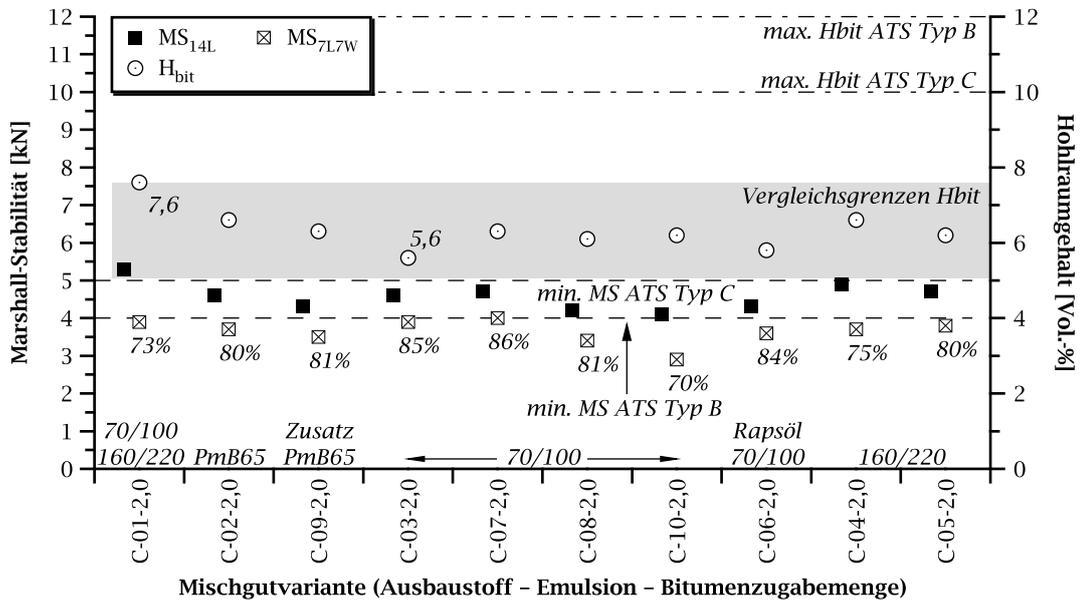


Abbildung 7.11: Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff C hergestellten Probekörper

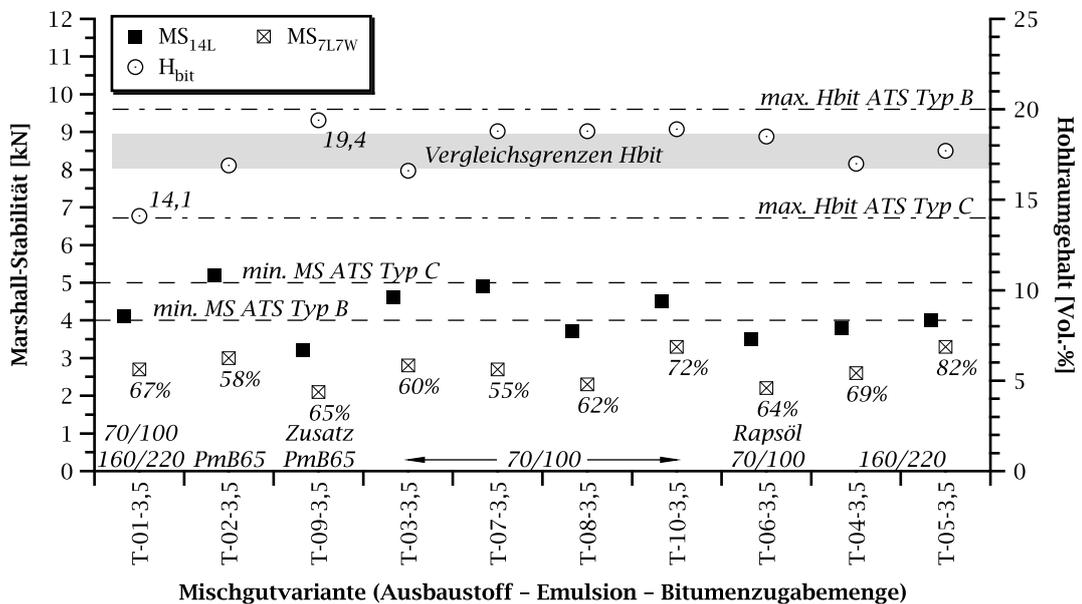


Abbildung 7.12: Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff T hergestellten Probekörper

baustoffe bestimmt werden. Die Bindemittelviskositäten spielen bei den Ausbaustoffen S, B und C diesbezüglich, wenn überhaupt, nur eine untergeordnete Rolle.

Mit Ausnahme der Mischung S-01-2,0 erfüllen alle Probekörper des Ausbaustoffes S nach vierzehntägiger Lagerung an der Luft die Anforderungen der ZTV T-StB 95/02 an die Marshall-Stabilität MS_{14L} für Asphalttragschichten des Typs B, gleiches gilt für alle Probekörper des Ausbaustoffes C. Die Prüfwerte der Ausbaustoffe B und T sind zum größten Teil etwas geringer, erreichen aber in jedem Falle die Mindeststabilität für Asphalttragschichten des Typs A von 3 kN. Beim Teersand T sind die vergleichsweise geringen Stabilitäten durch das völlige Fehlen grober Körnungen und den typischen Füllermangel sowie durch die daraus resultierenden hohen Hohlraumgehalte begründet. Im Falle des Ausbaustoffes B kommen hierfür seine schlechte Granulometrie sowie Haftungsprobleme zwischen den Bitumen und dem Ausbaustoff in Betracht. Bereits bei der Mischgutherstellung zeigt sich beim Ausbaustoff B eine gewisse Mischunwilligkeit, die Emulsionen brechen an diesem Ausbaustoff nur schwer und lassen sich schlecht untermischen. Die geringe Affinität zwischen Bindemittel und Ausbaustoff kann Umhüllungs- und Haftungsprobleme hervorrufen, welche die Marshall-Stabilitäten herabsetzen. Zwischen den Marshall-Stabilitäten MS_{14L} und den Steifigkeiten der emulgierten Bitumen sind keine Zusammenhänge erkennbar. Die insgesamt höchsten Stabilitäten erreichen die Probekörper aus den Mischungen S-07-2,0 und S-08-2,0; beide Emulsionen enthalten ein Bitumen 70/100. Mit vernachlässigbarem Abstand dazu folgt die Mischung S-05-2,0, bei der die Emulsion ein wesentlich weiches Bitumen 160/220 enthält. Die PmB-Emulsion Nr. 2, bei der die höchsten Stabilitäten zu erwarten wären, schneidet nur beim Teersand T am besten ab (T-02-3,5), beim Granulat C liegt sie dagegen im unteren Festigkeitsbereich (C-02-2,0). Ein ähnliches Verhalten ist auch bei allen anderen Bitumenemulsionen festzustellen. Diese Erkenntnis bestätigt die bezüglich der Hohlraumgehalte getroffenen Aussagen: Die Viskositäten der unterschiedlichen Bindemittel können sich gegenüber den granulometrischen Merkmalen der Ausbaustoffe nur dann durchsetzen, wenn der Ausbaustoff, wie der Teersand T, sehr homogen zusammengesetzt ist. Ansonsten werden sie durch die Einflüsse aus der Granulometrie überdeckt.

Die Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} nach Luft-Wasser-Lagerung betragen bis auf eine einzige Ausnahme (B-10-2,0) mehr als 50% der Marshall-Stabilitäten MS_{14L} nach Luftlagerung. Folglich weisen 39 der insgesamt 40 Gemische nur geringe Wasserempfindlichkeiten auf. Die Fälle, in denen nach der Wasserlagerung mehr als 100% von MS_{14L} erreicht werden, sind mit größter Wahrscheinlichkeit durch Schwankungen der Kornzusammensetzungen bedingt. Durch die verhältnismäßig kleinen Dimensionen des Marshall-Probekörpers im Vergleich zum Größtkorn der Ausbaustoffe S, B und C, können sich bereits geringfügige Unterschiede im Grobkornbereich der Probekörper deutlich auswirken. Diesem Umstand könnte nur durch wesentlich größere Probenabmessungen entgegengewirkt werden, was im M-VB K durch den vorgeschriebenen Probekörperdurchmesser von 150 mm bereits umgesetzt ist. In dieser Arbeit ist eine solche

Probekörperperform jedoch nicht einsetzbar, weil dann die Marshall-Prüfungen und die darauf basierenden Vergleiche mit den Anforderungen der ZTV T-StB nicht mehr möglich wären. Die Anwendung einer anderen Probekörperperform bzw. -prüfung würde somit das Ziel der Arbeit in Frage stellen.

7.4.2 PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten

In den Abbildungen 7.13 bis 7.16 sind die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} in den Troge-luaten der unbehandelten pechhaltigen Ausbaustoffe, der umhüllten aber noch unverdichteten Mischgutvarianten sowie der daraus hergestellten Probekörper dargestellt. Die Diagramme enthalten zusätzlich die Einzelwerte, die jeweils heller als die Mittelwerte der Proben aufgetragen sind. Zu den Prüfwerten sind außerdem die relativen PAK-Konzentrationen in Prozent angegeben, welche die Absenkungen gegenüber den nicht behandelten Ausbaustoffen (100 %) deutlich machen sollen. Die PAK-Konzentrationen der unbehandelten Ausbaustoffe sind jeweils ganz links in den Diagrammen abgegeben. Darauf folgen die Prüfwerte der Mischgutvarianten, sortiert nach der zu erwartenden Steifigkeit des emulgierten Bitumens. Die emulgierten Bitumenarten und -sorten sind in den Diagrammen oberhalb der Abszissen angegeben. Außerdem ist in allen Diagrammen der anionische Charakter der Emulsion Nr. 9 vermerkt; da alle anderen Emulsionen kationisch sind, wird bei diesen auf den entsprechenden Vermerk verzichtet.

Sämtliche Prüfwerte der Probekörper halten den Grenzwert der RuVA-StB 01/05 von 30 µg/l ein und liegen bei jedem der vier Ausbaustoffe jeweils auf einem vergleichbaren Niveau. Wie im Kapitel 3.6.2 beschrieben, ist dieser Effekt weitestgehend auf die Reduktion der eluierbaren Oberfläche durch die Verdichtung des Mischgutes zum Probekörper zurückzuführen. Zur vergleichenden Bewertung der Wirkung der verwendeten Bitumenemulsionen eignen sich diese Prüfwerte folglich nicht. Sie sollen nur verdeutlichen, dass die Anforderungen der RuVA-StB 01/05 an die PAK-Konzentrationen in den Eluaten von Probekörpern mit allen untersuchten Bitumenemulsionen sicher eingehalten werden können.

Bereits die PAK-Konzentrationen im Eluat des unbehandelten Ausbaustoffes C unterschreiten den Höchstwert der RuVA-StB 01/05 von 30 µg/l deutlich. Erwartungsgemäß halten auch sämtliche Prüfwerte der unverdichteten Mischgutvarianten dieses Ausbaustoffes diese Anforderung ein; erst recht die der verdichteten Probekörper. Die meisten Prüfwerte der Mischgutvarianten liegen im Bereich des nicht behandelten Ausbaustoffes. Nur bei einer Mischung (C-10-2,0) wird die PAK-Konzentration auf weniger als 50 % des Ausgangsmaterials reduziert. Gemessen an den Prüfwerten der anderen Emulsionen und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die PAK-Konzentrationen in den Eluaten der entsprechenden Probekörper wieder höher sind, erscheint dieser Prüfwert jedoch unplausibel. Für diese hohe Reduktionsrate kommt nur eine prüftechnische Ursache in Frage. Damit ist ausdrücklich nicht eine falsche Versuchsdurchführung bei der PAK-Analytik selbst gemeint, sondern beispielsweise ein Chromatogramm, in dem die Ban-

7.4 Vergleichende Untersuchungen mit allen Emulsionen

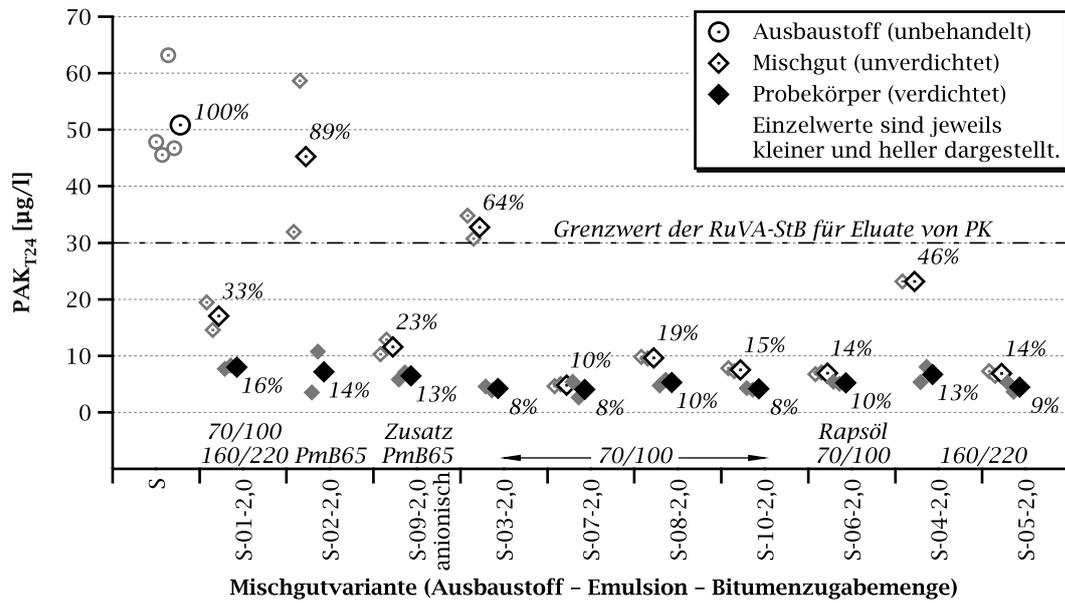


Abbildung 7.13: PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff S

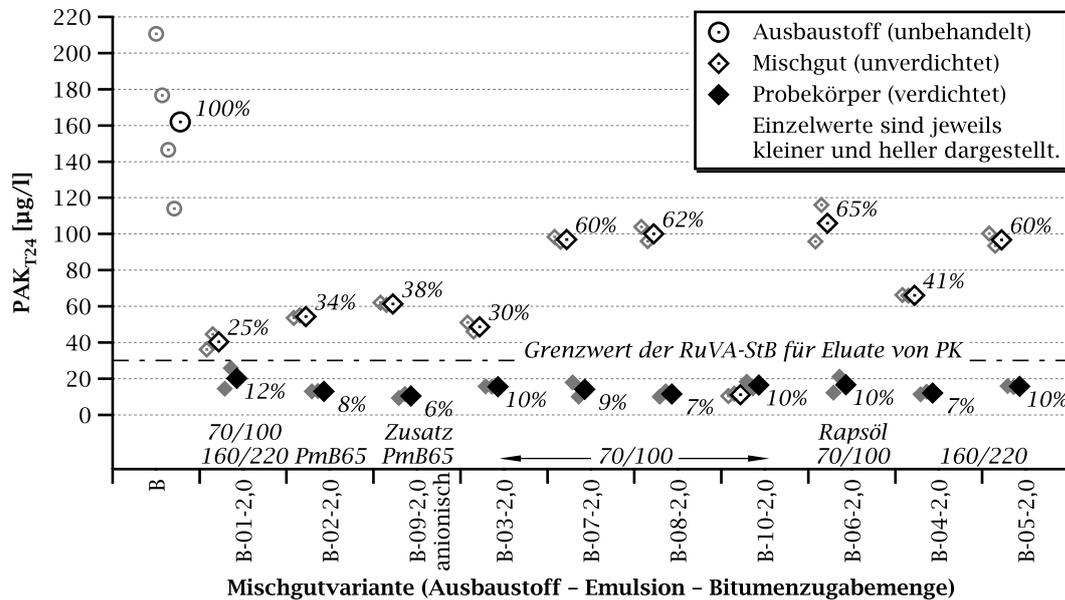


Abbildung 7.14: PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff B

7 Untersuchungen an den nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen

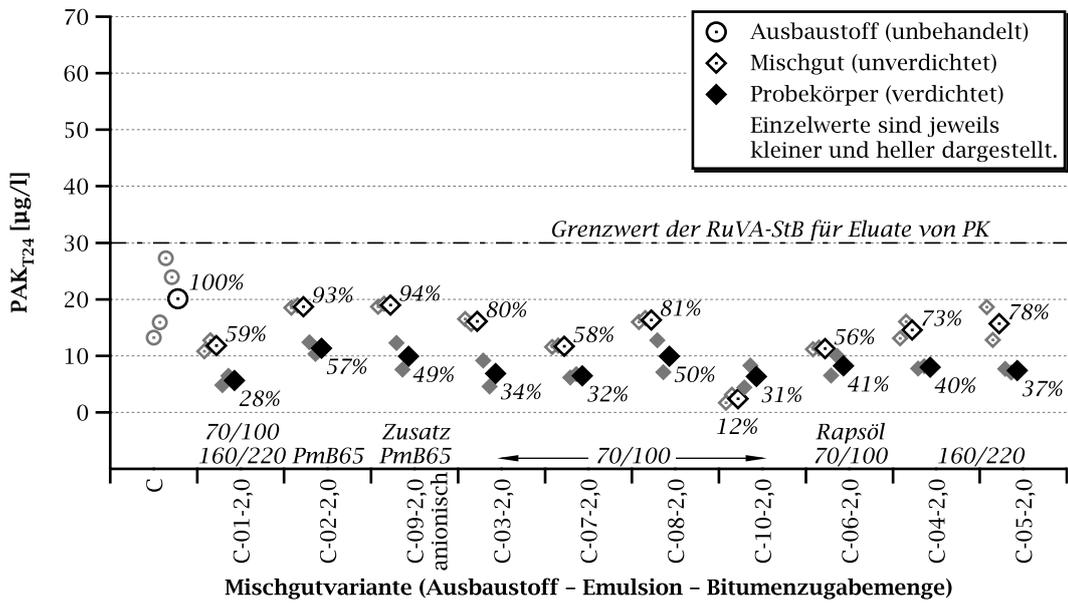


Abbildung 7.15: PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff C

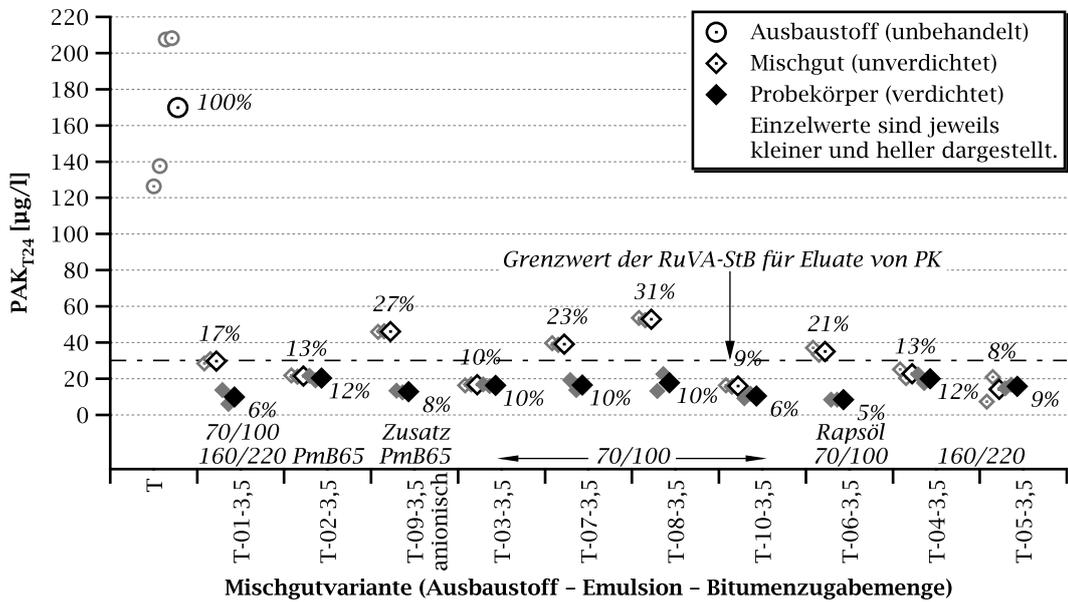


Abbildung 7.16: PAK-Konzentrationen in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff T

den der einzelnen PAK schlecht erkennbar sind und so zu abweichenden Ergebnissen bei der Integration führen.

Die Ergebnisse des Ausbaustoffes C lassen den Schluss zu, dass unter den angewendeten Versuchsbedingungen offenbar immer ein Mindestmaß an PAK eluiert werden kann, auch wenn nur geringe Konzentrationen im Eluat des unbehandelten Ausbaustoffes vorliegen. Die Reduktion auf Null ist mit wirtschaftlich und bautechnisch sinnvollen Bitumenzugabemengen folglich nicht möglich. Diese allgemeine Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen der Modellversuche zur Umhüllung und PAK-Immobilisierung im Kapitel 6.

Anhand der erreichten PAK-Immobilisierungsraten der losen Mischgutvarianten soll die Wirksamkeit der Bitumenemulsionen vergleichend beurteilt werden, um anschließend Emulsionen mit charakteristischen Resultaten auswählen zu können. Die Abbildungen 7.13 bis 7.16 zeigen jedoch, dass dies nicht umzusetzen ist. An einigen Beispielen soll dieses wenig befriedigende Ergebnis im Folgenden untermauert werden. Emulsion Nr. 1 erbringt beim Ausbaustoff C die zweitbeste Immobilisierung der PAK auf 59% des Ausbaustoffes (C-01-2,0), beim Teersand T liegt sie mit 17% im Mittelfeld (T-01-3,5) und beim Granulat S mit 33% an viertletzter Stelle (S-01-2,0). Dies lässt sich wiederum nicht mit dem vergleichsweise sehr guten Ergebnis von 25% beim Granulat B (B-01-2,0) in Deckung bringen. Emulsion Nr. 2 erbringt beim Teersand T mit 13% (T-02-3,5) einen guten Wert, so wie auch beim Granulat B (B-02-2,0) mit 34%. Demgegenüber ist ihre Wirkung beim Granulat C mit der Immobilisierung der PAK auf 93% (C-02-2,0) sehr schlecht, was ebenfalls auf die Prüfwerte beim Granulat S zutrifft (S-02-2,0). Mit Ausnahme der Emulsion Nr. 10 ergeben sich bei den anderen Emulsionen ähnlich uneinheitliche Aussagen, welche eine Reihung der Bitumenemulsionen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bei der PAK-Einbindung über alle pechhaltigen Ausbaustoffe hinweg verhindern. Die Prüfwerte unterliegen Schwankungen, für welche die folgenden Zusammenhänge ursächlich sind:

- Das zufällige Vorhandensein von Koagulationen pechhaltigen Materials in den verarbeiteten Chargen der Ausbaustoffe beeinflusst das in den Proben vorhandene, eluierbare Gesamtpotenzial an PAK.
- Die stochastisch variierenden Stückgrößenverteilungen erzeugen ebenfalls unterschiedliche Elutionspotenziale, weil sie die eluierbare Oberfläche zufällig verändern.
- Beim Ausbau entstandene, frische Bruchflächen geben mehr Schadstoffe ab als alte oder nicht bearbeitete. Auch dies hat entscheidenden Einfluss auf das eluierbare Gesamtpotenzial an PAK.
- Durch die variierende Granulometrie der Ausbaustoffe ändert sich auch die zur Umhüllung der Körner notwendige Bindemittelmenge. Gleiche Bindemittelzugaben haben daher nicht immer den gleichen einhüllenden Effekt.

Man könnte nun argumentieren, dass man den Streuungen durch größere Stichprobenumfänge begegnen könnte. Dadurch stiege zwar die statistische Sicherheit der Mittelwerte an, die Varianzen bzw. Standardabweichungen der Prüfwerte würden sich jedoch dadurch nicht verringern und weiterhin klare Aussagen verhindern. Moderne, varianzabhängige, statistische Verfahren zum Test auf sog. Ausreißer könnten dieses Problem, gerade wegen der großen Varianzen, ebenfalls nicht beseitigen. Zudem würde das strikte Aussortieren vermeintlicher Ausreißer dazu führen, dass die Versuche zwar auf realen Ausbaustoffen basieren, die Ergebnisse anschließend jedoch künstlich auf statistisch vergleichbare Proben eingengt würden.

Diese Erkenntnisse führen zwingend zu dem Schluss, dass vergleichende Betrachtungen zur Wirksamkeit von Bitumenemulsionen bezüglich der erreichbaren PAK-Immobilisierung, unter Verwendung realer, bautechnisch nicht weiter behandelter, pechhaltiger Ausbaustoffe so gut wie nicht durchführbar sind. Hierzu muss auf Versuche mit bautechnisch optimierten, oder besser noch mit definiert zusammengesetzten Materialien zurückgegriffen werden, wie sie im Kapitel 6 beschrieben sind.

Abbildung 7.17 stellt die Phenolindizes der unbehandelten Proben des Ausbaustoffes B sowie die der Mischgutvarianten und Probekörper dar. Die Ordinate ist wegen der großen Spannweite der Messwerte logarithmisch skaliert, ansonsten entspricht die Darstellung der von den PAK-Konzentrationen bekannten Art und Weise. Wie sich zeigt, ist die immobilisierende Wirkung der Mischgutvarianten der kationischen Bitumenemulsionen auf die Phenole ungefähr gleich. Die Phenolindizes der Eluate dieser Mischgutvarianten liegen etwa zwischen 1 und 3 mg/l.

Vollkommen unerwartet ist das Resultat der anionischen Bitumenemulsion Nr. 9. Der mittlere Phenolindex im Eluat des Mischgutes B-09-2,0 ist mit nur 0,71 mg/l der deutlich geringste am losen Mischgut bestimmte Prüfwert. Auch die Phenolindizes der entsprechenden Probekörper sind vergleichsweise niedrig und erfüllen sogar die Anforderung der RuVA-StB 01/05 von maximal 0,1 mg/l Phenol im Eluat. Nach den im Kapitel 3.3.3 erläuterten Zusammenhängen hätten in den Eluaten gerade dieser Mischgutvariante die höchsten Phenolindizes festgestellt werden müssen, von den oben erläuterten, möglichen Einflüssen der Ausbaustoffe einmal abgesehen. Wie lassen sich nun diese Ergebnisse erklären, die der Theorie der Phenoleinbindung so offensichtlich widersprechen?

Den Ausführungen in Kapitel 3.3.3 zufolge, liegen die Phenolate ab pH-Werten von 8,5 vollständig gelöst in Wasser vor. Das heißt, dass bei pH-Werten etwa in diesem Wertebereich mit einer besonders starken Elution der Phenole zu rechnen gewesen wäre. Die pH-Werte in den Eluaten der in Abbildung 7.17 dargestellten Proben sind wie folgt:

- Ausbaustoff B, unbehandelt, im Mittel: 8,55
- Mischgutvarianten der kationischen Emulsionen, im Mittel: 7,48
- Mischgutvariante mit Emulsion Nr. 9 (anionisch), im Mittel: 7,53

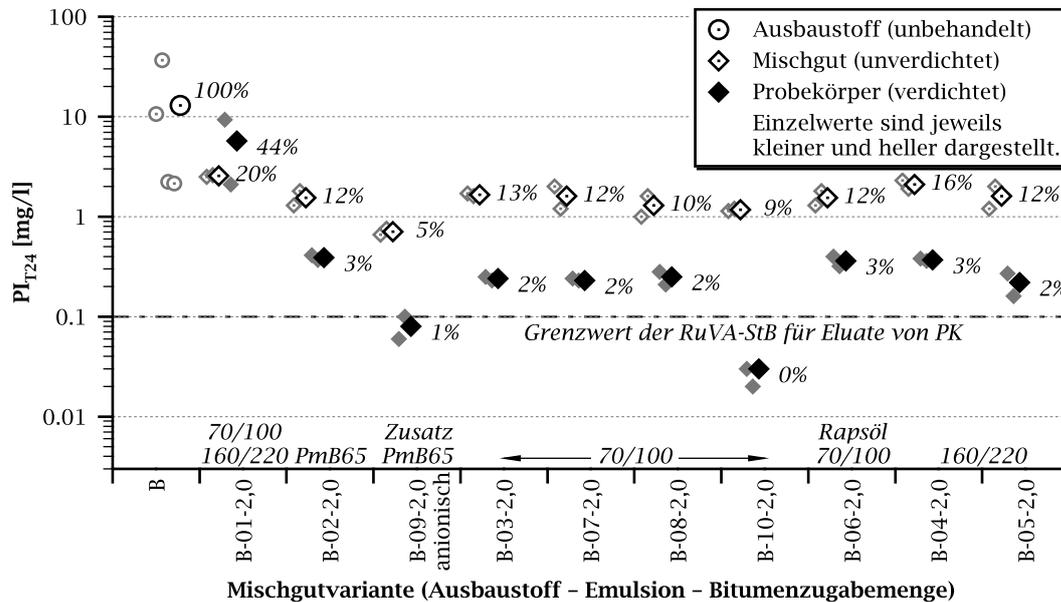


Abbildung 7.17: Phenolindizes in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper, hergestellt aus dem Ausbaustoff B

- Probekörper der kationischen Emulsionen, im Mittel: 7,20
- Probekörper mit Emulsion Nr. 9 (anionisch), im Mittel: 7,30

Es zeigt sich, dass der pH-Wert des Eluates nur beim unbehandelten Ausbaustoff B größer als 8,50 ist. Die pH-Werte der Eluate der Mischgutvarianten und Probekörper sind dagegen deutlich geringer und unterschieden sich kaum. Folglich müssen im Ausbaustoff B basische Gesteinskomponenten enthalten sein, welche den pH-Wert des Elutionswassers anheben und so für die hohen Phenolindizes in den Eluaten des unbehandelten Ausbaustoffes sorgen. Nach Umhüllung mit Bitumenemulsion können auch diese Bestandteile nicht mehr so gut in Lösung gehen, so dass der pH-Wert des Eluates nicht in dem Maße ansteigt, wie es beim unbehandelten Ausbaustoff der Fall ist. Ein Milieu mit pH-Werten im Bereich von 8,5 liegt daher bei den Elutionen des Mischgutes und der Probekörper nicht vor. Folglich wird die Löslichkeit der Phenole durch die anionische Emulsion Nr. 9, im Vergleich zu den kationischen Emulsionen, nicht negativ beeinflusst. Es kommt hinzu, dass die Trogelution durch die Umströmung der Probe mit Wasser grundsätzlich nicht nur die Eluierbarkeit von Schadstoffen prüft, sondern auch die Wasserempfindlichkeit eines Bindemittelfilms. Zieht sich dieser durch die Wassereinwirkung stark zurück oder löst sich gar ab, steht dem Elutionsmedium eine größere Oberfläche zur Verfügung und es werden mehr Schadstoffe ausgelaugt. Der durch die pH-Werte der Eluate nachgewiesene basische Charakter des Ausbaustoffes B begünstigt

tigt die Umhüllung mit der anionischen Emulsion Nr. 9 sogar und erklärt die bei der Mischgutherstellung festzustellende Mischunwilligkeit dieses Ausbaustoffes mit den kationischen Emulsionen. Es kommt hinzu, dass die Emulsion Nr. 9 einen nicht näher bekannten Zusatz enthält, bei dem es sich vermutlich um einen Haftvermittler handelt. Die Erfahrungen bei der Mischgutherstellung und Verarbeitung dieser Emulsion bestärken diese Vermutung. Ein Haftvermittler senkt natürlich auch die Wasserempfindlichkeit eines fertigen Bitumenfilms. Im Falle der Emulsion Nr. 9 drängt sich also die These auf, dass diese einen solchen Haftvermittler enthält, der, zusätzlich zum guten Brechverhalten der Emulsion Nr. 9 am Ausbaustoff B, für dessen gute und wasserunempfindliche Umhüllung sorgt. Das Zusammenwirken der erörterten Aspekte erklärt das überdurchschnittlich gute Abschneiden der anionischen Emulsion Nr. 9 bei der Einbindung der Phenole im Vergleich zu den untersuchten kationischen Emulsionen.

Insgesamt untermauert die Abbildung 7.17 die Ergebnisse der Eignungsprüfungen in Bezug auf die Einkapselung der Phenole. Mit acht von neun untersuchten kationischen Bitumenemulsionen wird die Anforderung der RuVA-StB 01/05 von maximal 0,1 mg/l im Eluat der Probekörper nicht eingehalten. Auch wenn es sich beim Granulat B um einen relativ stark mit Phenolen belasteten Ausbaustoff handelt, legt dieser Umstand doch Probleme bei der Immobilisierung von Phenolen offen und unterstreicht deutlich die Notwendigkeit differenzierter Eignungsprüfungen mit verschiedenen Emulsionen, die auf den konkreten Ausbaustoff abzustimmen sind. Die Untersuchungsergebnisse bezüglich der Phenolimmobilisierung ergeben durch das Beispiel der Emulsion Nr. 9 eindeutig, dass die richtige Abstimmung zwischen Emulsion und Ausbaustoff wesentlich größere Bedeutung hat, als die zwar theoretisch korrekten, in praxi jedoch eher marginalen Einflüsse aus dem Chemismus der verwendeten Emulsionen.

Mit Ausnahme der Prüfwerte der Emulsionen Nr. 9 und 10 ergeben sich bezüglich der Phenolimmobilisierung keine wesentlichen Unterschiede zwischen den geprüften Bitumenemulsionen. Der Prüfwert der aus der Mischung B-10-2,0 hergestellten Probekörper ist mit den vorliegenden Daten nicht erklärbar, besonders da sich der Phenolindex des losen Mischgutes nicht wesentlich von denen der anderen Mischungen unterscheidet. Demzufolge liefern auch die Phenolindizes keine weiteren verwertbaren und fundierten Anhaltspunkte zur Auswahl besonders charakteristischer Bitumenemulsionen.

7.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die weiteren Untersuchungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den vier nicht aufbereiteten, pechhaltigen Ausbaustoffen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Marshall-Stabilitäten der Probekörper nach Luftlagerung erfüllen trotz der ungünstigen Stückgrößenverteilungen der Ausbaustoffe in den meisten Fällen die Anforderungen der ZTVT-StB 95/02 an Asphalttragschichten des Typs B. Die Wasserempfindlichkeiten der Gemische sind insgesamt gering. Die Hohlraumgehalte der Probekörper

entsprechen weitestgehend den Anforderungen der ZTV T-StB 95/02 für Asphalttragschichten der Typen A (Ausbaustoff T) bzw. C (Ausbaustoffe S, B und C). Mit den Bindemittelviskositäten können die bautechnischen Eigenschaften bestenfalls beim Teersand, der naturgemäß sehr homogen zusammengesetzt ist, in Verbindung gebracht werden.

Die Anforderung der RuVA-StB 01/05 an die PAK-Konzentration in den Eluaten von Probekörpern wird unter den gewählten Bedingungen von allen Mischgutvarianten der 10 Bitumenemulsionen und vier Ausbaustoffe eingehalten. Aus baupraktischer Sicht ist daher die PAK-Einbindung mit Bitumenemulsionen problemlos und sicher möglich. Die PAK-Gehalte in den Eluaten der Mischgutvarianten zeigen, dass die PAK durch Umhüllung der pechhaltigen Ausbaustoffe mit Bitumenemulsionen wirksam immobilisiert werden, ohne auf Effekte aus der Oberflächenreduzierung angewiesen zu sein. Dies bestätigt die qualitative Gültigkeit der Ergebnisse der Modellversuche aus Kapitel 6 für die realen pechhaltigen Ausbaustoffe. Aufgrund naturgemäß vorhandener, starker Schwankungen der Zusammensetzungen und Granulometrien der Ausbaustoffe, lassen sich keine Zusammenhänge zwischen der PAK-Immobilisierung und den verwendeten Bitumenemulsionen finden.

Die Phenolindizes in den Eluaten sind nur bei den Proben relevant, welche den Ausbaustoff B enthalten. Acht der zehn vergleichbaren Mischungen halten die Anforderung der RuVA-StB 01/05 von maximal 0,1 mg/l an den Phenolindex im Eluat der Probekörper nicht ein. Nur die Emulsionen Nr. 9 (anionisch) und 10 (kationisch) konnten die Phenole ausreichend einkapseln.

Die unerwartet gute Wirksamkeit der anionischen Emulsion Nr. 9 geht wahrscheinlich auf die hohe Affinität der Emulsion zum vorwiegend basischen Ausbaustoff B sowie einen in der Emulsion vermutlich enthaltenen Haftvermittler zurück. Dieses Ergebnis widerlegt eindeutig die bislang in der Fachwelt vertretene Meinung, dass anionische Emulsionen für die Wiederverwertung pechhaltiger Ausbaustoffe wegen ihres basischen Charakters *grundsätzlich* ungeeignet seien. Vielmehr wird hieran deutlich, dass die möglichst gute Abstimmung zwischen Emulsion und Ausbaustoff wesentlich wichtiger ist als Einflüsse aus dem Chemismus einer im Emulsionsmischgut mengenmäßig nur marginal vertretenen Bitumenemulsion auf die Löslichkeit der Phenole. Deshalb konnte die wirksame Immobilisierung der Phenole, unter den in dieser Arbeit untersuchten Bedingungen, mit einer anionischen Emulsion gelingen.

Der Ausbaustoff C enthält so geringe Mengen an eluierbaren PAK und Phenolen, dass weitere Untersuchungen an diesem Material nicht sinnvoll sind. Daher wird festgelegt, dass nur die Ausbaustoffe S, B und T in die Untersuchungen an den bautechnisch aufbereiteten Ausbaustoffen einbezogen werden.

Weder die erzielten bautechnischen Eigenschaften, noch die erreichten Schadstoffimmobilisierungsraten lassen die ursprünglich geplante Auswahl von drei charakteristischen Bitumenemulsionen auf der Grundlage fundierter Erkenntnisse zu. Daher wird zur Auswahl der Emulsionen auf die Ergebnisse der Modellversuche im Kapitel 6 und auf kompositionelle Merkmale der Emulsionen zurückgegriffen, die eine hohe Sprei-

zung der bautechnischen Eigenschaften erwarten lassen. Unter diesen Voraussetzungen werden folgende Emulsionen für die Untersuchungen an den drei bautechnisch aufbereiteten Ausbaustoffen ausgewählt:

Emulsion Nr. 2

Bei dieser Emulsion kann anhand der Untersuchungen am pechhaltigen Labormischgut keine Abhängigkeit zwischen Bitumenzugabe und Immobilisierung der PAK festgestellt werden. Dies liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an der Polymermodifizierung des emulgierten Bitumens, welches sich nach der Umhüllung des Labormischgutes stark zusammenzieht (siehe Kapitel 6.5). Für die weiteren Untersuchungen ist es besonders interessant, ob sich durch Verwendung dieser PmB-Emulsion besondere bautechnische Eigenschaften ergeben, welche den Einsatz dieses teureren Produktes rechtfertigen.

Emulsion Nr. 5

Im Falle der Emulsion Nr. 5 ist die PAK-Immobilisierung beim Labormischgut eindeutig von der Bitumenzugabemenge abhängig. Die PAK werden im Vergleich zu anderen Emulsionen jedoch weniger gut eingeschlossen, was wahrscheinlich auf die ausgeprägte Maltenphase des enthaltenen Bitumens 160/220 zurückgeht, in welcher sich die lipophilen PAK offenbar gut lösen können. Des Weiteren stellt sie aus bautechnischer Sicht aufgrund des weichen Bitumens, das Gegenstück zur Emulsion Nr. 2 dar. Bitumenemulsionen mit so weichem Bitumen gelten bezüglich der erreichbaren Festigkeiten im Allgemeinen als riskant. Die Untersuchungen sollen zeigen, ob dieser Ruf berechtigt ist.

Emulsion Nr. 10

In den Modellversuchen erreicht diese Bitumenemulsion bei der Bindemittelzugabe von 1,25 M.-% die beste Immobilisierungsrates. Dies stimmt mit den durchgängig guten Resultaten an den pechhaltigen Ausbaustoffen überein. Die Emulsion Nr. 10 vertritt zudem in den folgenden Untersuchungen die weit verbreiteten Emulsionen mit Bitumen 70/100.

Durch die Auswahl dieser drei Bitumenemulsionen wird das Probenfeld für die weiteren Untersuchungen nicht nur in Bezug auf die PAK-Einbindung gespreizt, sondern auch im Hinblick auf Art, Sorte und Steifigkeit der emulgierten Bitumen und somit auch bezüglich der zu erwartenden bautechnischen Eigenschaften.

8 Untersuchungen an den aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen

8.1 Voraussetzungen und Zielstellung

In den vorangegangenen Untersuchungen wurde die Wirksamkeit von 10 handelsüblichen Bitumenemulsionen bei der Wiederverwertung von vier nicht aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen untersucht. Das heißt, die Sieblinien dieser Ausbaustoffe sind ausschließlich durch das vorhandene Material und die Ausbautechnologie bestimmt und weisen deswegen den für solche Ausbaustoffe typischen Füller- und Feinsandmangel auf (siehe Abbildungen 7.5 bis 7.8 auf den Seiten 85 und 86). Die Stückgrößenverteilungen liegen zudem teilweise außerhalb der empfohlenen Sieblinienbereiche der ZTV T-StB 95/02. Zudem unterliegen die Stückgrößenverteilungen großen Schwankungen, welche aus der materialtypischen Heterogenität pechhaltiger Ausbaustoffe resultieren. Daraus ergeben sich hohe Hohlraumgehalte der Probekörper, die zu vergrößerten Oberflächen für die Elution und zu nicht optimal ausgebildeten Korngerüsten führen. Dies beeinflusst insbesondere die Marshall-Stabilitäten negativ.

Zielstellung dieses Projektabschnittes ist es daher herauszufinden, welche bautechnischen Eigenschaften mit Emulsionsmischgut aus pechhaltigen Ausbaustoffen zu erzielen sind, wenn diese vorab einer Aufbereitung unterzogen werden. Durch die bautechnische Optimierung der pechhaltigen Ausbaustoffe soll eine *gleichmäßige und optimale Stückgrößenverteilung in allen Teilproben* erreicht werden, um dadurch ggf. die Hohlraumgehalte zu senken und die Marshall-Stabilitäten zu verbessern. Weil auch der Bindemittelgehalt einen maßgeblichen Einfluss auf die bautechnischen Eigenschaften eines Mischgutes hat, werden zusätzlich die Bitumenzugabemengen in drei Stufen variiert. Selbstverständlich sollen die so erzeugten Mischungen der drei ausgewählten Bitumenemulsionen und der drei verbliebenen Ausbaustoffe die umweltrelevanten Anforderungen der RuVA-StB 01/05 einhalten.

Zur Unterscheidung von den ursprünglichen Ausbaustoffen werden die optimierten Varianten im Folgenden mit den Kürzeln So, Bo und To bezeichnet. Wegen der vorwiegend bautechnischen Ausrichtung dieses Arbeitsabschnittes sind ausschließlich Untersuchungen an Probekörpern vorgesehen. Das heißt, mit den unverdichteten Mischgutvarianten werden keine Elutionen mehr durchgeführt, weil diese Daten für die gesetzte Zielstellung unerheblich sind.

8.2 Aufbereitung und Zusammensetzung der pechhaltigen Ausbaustoffe

In der Praxis werden die Sieblinien pechhaltiger Ausbaustoffe meist durch die Zugabe von frischen Ergänzungskörnungen verbessert. Dies führt zu unerwünschten Verdünnungseffekten, die nach Möglichkeit zu vermeiden sind. Aus diesem Grund wird die Zugabe von unbelasteten Gesteinen in dieser Arbeit ausgeschlossen. Daraus folgt, dass die Stückgrößenverteilung des Teersandes To innerhalb der in den ZTV T-StB 95/02 empfohlenen Sieblinienbereiche für Asphalttragschichten der Typen A und A0 bleiben muss. Alles andere erfordert die Zugabe von frischen, groben Gesteinskörnungen.

Aus diesen Prämissen ist die folgende Vorgehensweise zur Aufbereitung der Ausbaustoffe abzuleiten: Nach Auswahl der optimalen Stückgrößenverteilungen sind die pechhaltigen Ausbaustoffe durch Trockensiebung vollständig in Einzelkörnungen zu klassieren. Bei der späteren Mischgutherstellung sollen die angestrebten Sieblinien durch exakte Einwaage der Einzelkörnungen wieder zusammengesetzt werden. Fehlende Körnungen bzw. Körnungen von denen zu wenig Material vorhanden ist, werden durch die Aufbereitung anderer Körnungen mit überschüssigen Mengen ergänzt. Als angestrebte, optimale Stückgrößenverteilungen für die Ausbaustoffe werden die in den Abbildungen 8.1 und 8.2 dargestellten Sieblinien festgelegt. Diese Kornverteilungen sind sehr gut abgestuft und lassen bestmögliche bautechnische Eigenschaften der Probekörper erwarten.

Die nach der Absiebung hauptsächlich fehlenden Füller- und Feinsandanteile werden durch Brechen größerer Körnungen hergestellt. Auf diesem Wege können außerdem die zu Beginn der Untersuchungen wegen ihrer Korndimensionen manuell aussortierten Bestandteile der Ausbaustoffe S und B (siehe Kapitel 7.1) in die Wiederverwertung einbezogen werden. Die sehr groben Splittkörnungen werden zunächst im Prallbrecher zerkleinert und anschließend zur Verbesserung der Kornform nochmals durch einen Backenbrecher aufbereitet. Der größte Teil der so erhaltenen Splittkörnungen wird anschließend im Backenbrecher zu Sand verarbeitet, der wiederum das Ausgangsmaterial zur Herstellung von Füller mit Hilfe einer Scheibenschwingmühle bildet. Das Brechgut wird vor der Beimengung zu den fraktionierten Ausbaustoffen abgesiebt und dann den entsprechenden Kornklassen des jeweiligen Ausbaustoffes zugegeben. Die einzelnen Fraktionen der Ausgangsstoffe So, Bo und To werden trocken in verschlossenen Fässern gelagert. Bei Bedarf werden die benötigten Mengen nach den in Tabelle 8.1 aufgeführten Massenanteilen der einzelnen Kornfraktionen zusammengesetzt.

8.3 Eigenschaften der aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe

In Anlehnung an die im Kapitel 7.2.3 beschriebene Vorgehensweise werden an mehreren Proben der drei aufbereiteten Ausbaustoffe die folgenden Prüfgrößen untersucht:

8.3 Eigenschaften der aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe

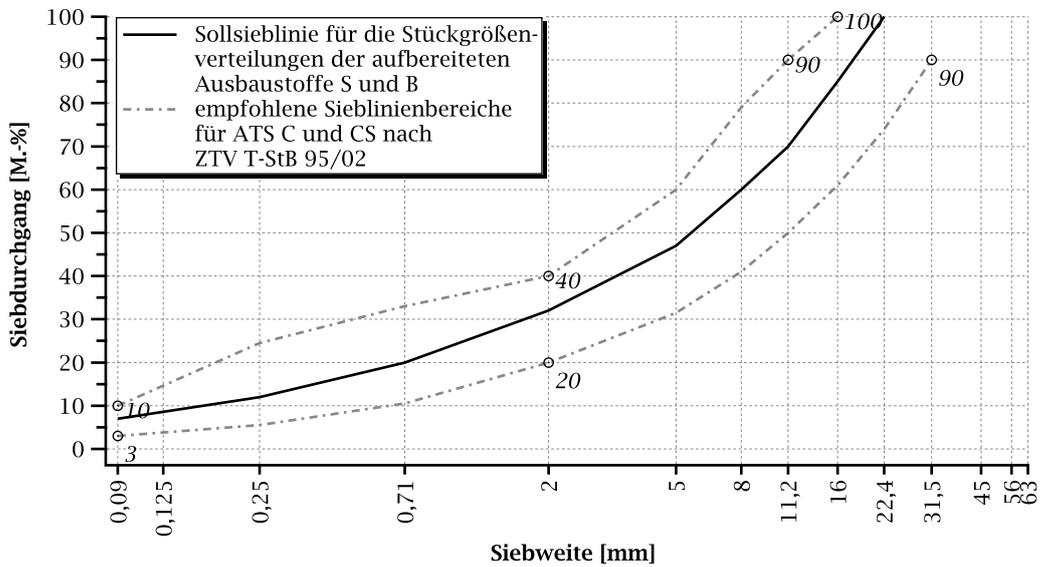


Abbildung 8.1: Stückgrößenverteilungen der optimierten Ausbaustoffe So und Bo

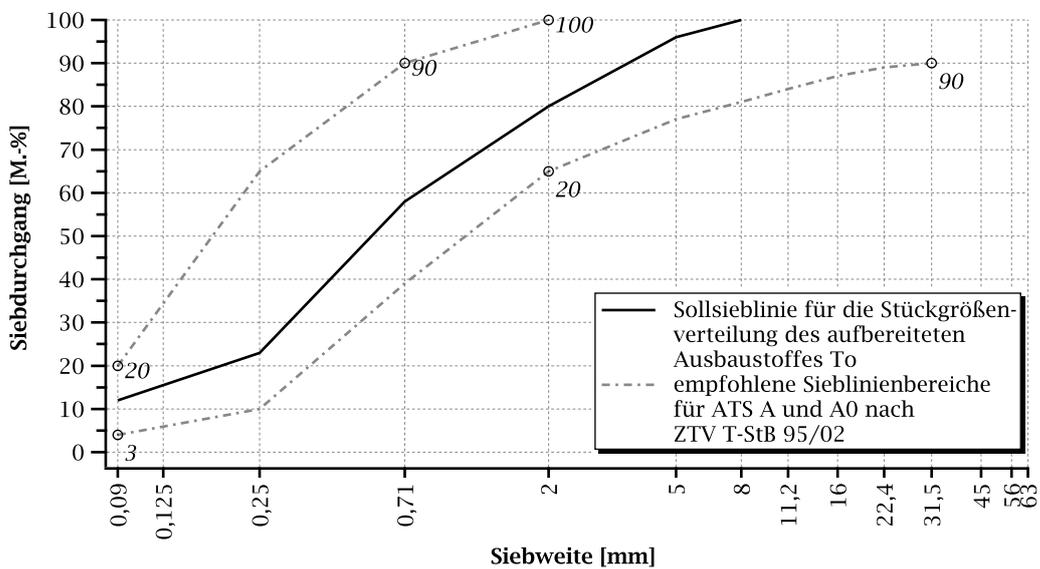


Abbildung 8.2: Stückgrößenverteilung des optimierten Ausbaustoffes To

Tabelle 8.1: Massenanteile der einzelnen Kornfraktionen zur Zusammensetzung der aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe So, Bo und To

Kornklasse [mm]	Massenanteile [M.-%]	
	So und Bo	To
≤ 0,09	7	12
0,09–0,25	5	11
0,25–0,71	8	35
0,71–2	12	22
2–5	15	14
5–8	13	6
8–11,2	10	—
11,2–16	15	—
16–22,4	15	—

- Bindemittelgehalt B_p
- Trockenraumdichte ρ_{pr} und optimaler Wassergehalt w_{pr}
- Gesamtgehalt an PAK im Feststoff ΣPAK_F
- PAK-Konzentration PAK_{T24} und Phenolindex PI_{T24} im Trogeluat

Die Gesamtgehalte an PAK in den Feststoffen ΣPAK_F dienen zur Einordnung der aufbereiteten Ausbaustoffe in die Verwertungsklassen der RuVA-StB 01/05 und haben damit lediglich informellen Charakter. Für die spätere Ergebnisinterpretation sind diese Prüfwerte nicht von Bedeutung. Tabelle 8.2 fasst die Ergebnisse der Voruntersuchungen an den optimierten Ausbaustoffen zusammen.

Die festgestellten Bindemittelgehalte B_p sind geringfügig höher als die der nicht aufbereiteten Materialien. Die Unterschiede resultieren aus der Probenaufbereitung und den bewusst veränderten Stückgrößenverteilungen der aufbereiteten Ausbaustoffe.

Wegen der deutlich größeren Feinkornanteile der optimierten Ausbaustoffe, waren vor Durchführung der Proctor-Versuche erhöhte Wasseransprüche gegenüber den Ausbaustoffen im Ausgangszustand zu vermuten. Während der Versuchsdurchführung stellte sich jedoch heraus, dass diese Vermutung nur auf den Ausbaustoff Bo zutrifft, bei welchem der Proctor-Wassergehalt w_{pr} gegenüber der nicht optimierten Variante um 1,5 M.-% angestiegen ist. Die Proctor-Wassergehalte der Ausbaustoffe So und To sind jedoch geringer als die ihrer nicht aufbereiteten Pendanten. Der durch die erhöhten Feinkornanteile erzeugte Porenschluss hat offensichtlich größeren Einfluss auf die Wasseransprüche dieser beiden Ausbaustoffe als ihre ebenfalls vergrößerten spezifischen Oberflächen. Die erreichten Proctor-Dichten ρ_{pr} sind bei allen Ausbaustoffen deutlich höher als vor der Aufbereitung. Dies bestätigt die beabsichtigte Wirkung der Sieblinienverbesserung.

Tabelle 8.2: Eigenschaften der aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffe

Prüfgröße	Einheit	Ausbaustoff		
		So	Bo	To
B_P	[M.-%]	2,8	2,9	0,8
w_{Pr}	[M.-%]	5,8	6,5	10,5
ρ_d	[g/cm ³]	2,119	2,151	1,929
ΣPAK_F P1	[mg/kg]	31,3	9,4	38,4
ΣPAK_F P2	[mg/kg]	27,6	10,7	39,9
ΣPAK_F Mittel	[mg/kg]	29,4	10,0	39,2
R	[mg/kg]	3,7	1,4	1,5
PAK_{T24} P1	[µg/l]	90,1	145,4	619,1
PAK_{T24} P2	[µg/l]	82,3	112,6	430,7
PAK_{T24} P3	[µg/l]	64,5	103,0	470,6
PAK_{T24} P4	[µg/l]	79,6	99,0	475,6
PAK_{T24} Mittel	[µg/l]	79,1	115,0	499,0
R	[µg/l]	25,6	46,4	188,4
PI_{T24} P1	[mg/l]	0,09	1,49	0,22
PI_{T24} P2	[mg/l]	0,04	1,25	0,23
PI_{T24} Mittel	[mg/l]	0,07	1,37	0,23
R	[mg/l]	0,05	0,24	0,01

Durch die Aufbereitung der pechhaltigen Ausbaustoffe verändern sich auch die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} und Phenolindizes PI_{T24} in den Eluaten. Beim Ausbaustoff To ist ein besonders extremer Anstieg der PAK-Konzentration auf im Mittel rund 500 µg/l festzustellen, wofür die im aufbereiteten Teersand in großen Mengen vorhandenen Feinstpartikel pechhaltigen Materials (sog. *Teerstäube*) verantwortlich sind. Die hohe spezifische Oberfläche dieser Bestandteile, sowie die während des Brechens und Mahlens erzeugten frischen Bruchflächen sorgen für diesen sprunghaften Anstieg.

Aufgrund der Gesamtgehalte an PAK im Feststoff ΣPAK_F sowie der Phenolindizes PI_{T24} der drei aufbereiteten Ausbaustoffe, sind diese in die folgenden Verwertungsklassen der RuVA-StB 01/05 einzuordnen:

- Ausbaustoff So: Verwertungsklasse B
- Ausbaustoff Bo: Verwertungsklasse C
- Ausbaustoff To: Verwertungsklasse B

8.4 Mischgut- und Probekörperherstellung, Probenlagerung

Die Herstellung des Mischgutes erfolgt analog zu der im Kapitel 7.3.1 beschriebenen Vorgehensweise mit jeweils drei Bindemittelzugabemengen. Gegenüber den Mischgutvarianten der nicht aufbereiteten Ausbaustoffe werden die Bindemittelzugaben beim Teersand To wegen des großen Anteils feiner Gesteinskörnungen und der hohen PAK-Konzentration im Eluat des Ausbaustoffes, um 0,5 M.-% angehoben. Bei den Ausbaustoffen So und Bo wird mit Rücksicht auf die bautechnischen Eigenschaften auf die Anhebung der Bindemittelzugabemengen verzichtet. Tabelle 8.3 führt die in diesen Untersuchungen verwendeten Bitumenzugabemengen sowie die daraus resultierenden, rechnerischen Gesamtbindemittelgehalte auf. Die genauen Mischgutrezepturen sind im Anhang C in Tabelle C.6 dokumentiert.

Tabelle 8.3: Bitumenzugabemengen B_Z und rechnerische Gesamtbindemittelgehalte B_{MG} der Mischgutvarianten der aufbereiteten Ausbaustoffe

phABS	B_P [M.-%]	B_Z [M.-%]	B_{MG} [M.-%]
So	2,8	1,5	4,2
		2,0	4,7
		2,5	5,2
Bo	2,9	1,5	4,3
		2,0	4,8
		2,5	5,3
To	0,8	3,0	3,7
		3,5	4,2
		4,0	4,6

Aus den drei im Kapitel 7.5 ausgewählten Bitumenemulsionen, den drei in Tabelle 8.3 festgelegten Bitumenzugabemengen und den drei optimierten pechhaltigen Ausbaustoffen ergeben sich insgesamt 27 Mischgutvarianten. Die rechnerischen Gesamtbindemittelgehalte B_{MG} dieser Mischungen erfüllen laut Tabelle 8.3 die Anforderungen der ZTV T-StB 95/02 an den Bindemittelgehalt der den Ausbaustoffen zuzuordnenden Asphalttragschichttypen. Im Falle der Ausbaustoffe So und Bo ist dies der Typ C mit einem Mindestbindemittelgehalt von 3,6 M.-%; beim Teersand To ist es der Typ A, dessen Mindestbindemittelgehalt 3,3 M.-% beträgt. Von jeder Charge hergestellten Mischgutes wird eine Probe zur Bestimmung der Rohdichte $\rho_{R,bit}$ zurückgestellt.

Die Herstellung und Lagerung der Probekörper entspricht der im Kapitel 7.3.1 dokumentierten Methodik. Von jeder Mischung werden acht Probekörper hergestellt; davon sind sechs zur Untersuchung der bautechnischen und zwei zur Bestimmung der umweltrelevanten Eigenschaften vorgesehen.

8.5 Probenbezeichnung

Die Probenbezeichnung für die Mischgutvarianten und für die Probekörper folgt der bisher verwendeten Systematik und setzt sich aus der Abkürzung für den verwendeten Ausbaustoff, der Nummer der verwendeten Bitumenemulsion und der zugegebenen Bitumenmenge zusammen, also z. B. So-02-1,5 (Ausbaustoff So - Emulsion Nr. 2 - 1,5 M.-% Bitumenzugabe).

8.6 Versuchsdurchführung

Nach Ablauf der vierzehntägigen Lagerungsfristen werden an den drei luftgelagerten Probekörpern die Raumdichten $\rho_{A,T}$ mittels Tauchwägungsverfahren bestimmt. Diese dienen gemeinsam mit der Mischgutrohddichte $\rho_{R,bit}$ zur Berechnung der Hohlraumgehalte H_{bit} nach DIN 1996-7 [1]. Direkt im Anschluss an die Raumdichtebestimmung finden die Marshall-Prüfungen statt. An den drei luftgelagerten Probekörpern werden die Marshall-Stabilität MS_{14L} und der Marshall-Fließwert FW_{14L} ermittelt. Die drei Luft-Wasser-gelagerten Probekörper dienen zur Bestimmung der Marshall-Stabilität MS_{7L7W} und des Marshall-Fließwertes MS_{7L7W} . Aus MS_{14L} und MS_{7L7W} wird wiederum die nach der Wasserlagerung verbliebene, relative Marshall-Stabilität $MS_{7L7Wrel}$ berechnet. Von je zwei Probekörpern aller Mischungen werden Trogeluate nach [6] hergestellt, an denen anschließend die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} und die Phenolindizes PI_{T24} zu bestimmen sind. Letztere werden nur an Eluaten von Probekörpern ermittelt, welche die Ausbaustoffe Bo oder To enthalten, da der Phenolindex im Eluat des unbehandelten Ausbaustoffes So bereits an der Nachweisgrenze des Verfahrens liegt.

8.7 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden sind alle Untersuchungsergebnisse eines Ausbaustoffes jeweils gemeinsam dargestellt, damit die Wirkung der Emulsionen auf die bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften insgesamt beurteilt werden kann. Darstellungsform und Auswertungssystematik folgen dabei immer dem gleichen Schema. Für den ersten Ausbaustoff (So) sind sie daher näher erläutert, bei den anderen beiden Ausbaustoffen werden nur noch die Ergebnisse aufgeführt. Die Marshall-Fließwerte dienen analog zu den Untersuchungen der bautechnisch nicht aufbereiteten Ausbaustoffe (siehe Kapitel 7.3.3) nicht zur Beurteilung der bautechnischen Eigenschaften und sind daher nur im Anhang D in Tabelle D.20 dokumentiert.

8.7.1 Ausbaustoff So

Abbildung 8.3 stellt die an den Probekörpern bestimmten Marshall-Stabilitäten MS_{14L} und MS_{7L7W} sowie deren Hohlraumgehalte H_{bit} dar. Die Prüfwerte sind auf der Abszisse

nach verwendeter Emulsion und zugegebener Bindemittelmenge sortiert. Oberhalb der Abszisse sind die in den Emulsionen verwendeten Bitumen angegeben. Bei den Marshall-Stabilitäten MS_{14L} ist für diejenigen Prüfwerte, bei denen die Bindemittelzugabemenge mit der in den vorangegangenen Untersuchungen verwendeten Zugabe übereinstimmt, zusätzlich ein prozentualer Wert angegeben. Dieser Wert gibt an, um wie viel Prozent sich die Marshall-Stabilität gegenüber dem Prüfwert der nicht optimierten Ausbaustoffe veränderte. Das Gleiche gilt für die Hohlraumgehalte H_{bit} . Die Prozentangaben bei den Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} beziehen sich dagegen auf die Marshall-Stabilitäten MS_{14L} der Probekörper und zeigen die nach der Wasserlagerung noch verbliebenen relativen Marshall-Stabilitäten $MS_{7L7Wrel}$ an.

Abbildung 8.4 stellt die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} in den Trogeluaten der aus dem Ausbaustoff So hergestellten Probekörper dar. Die Aufteilung der Abszisse ist mit der bei den bautechnischen Eigenschaften identisch. Die Prozentangaben an den Datenpunkten beziehen sich in diesem Diagramm auf die PAK-Konzentration im Trogeluat des losen, nicht umhüllten Ausbaustoffes So (100 %).

Die Hohlraumgehalte H_{bit} der Probekörper des Ausbaustoffes So erfüllen die Anforderung der ZTV T-StB 95/02 an Asphalttragschichten des Typs C in allen Fällen und wurden durch die Verbesserung der Sieblinie geringfügig (-3 Vol.-%) bis deutlich (-25 Vol.-%) gegenüber den Probekörpern aus dem nicht optimierten Ausbaustoff S herabgesetzt. Die Marshall-Stabilitäten MS_{14L} erfüllen ebenfalls die Mindestanforderung der ZTV T-StB 95/02 an Asphalttragschichten des Typs C, veränderten sich aber gegenüber denen des nicht verbesserten Ausbaustoffes so gut wie nicht. Mit Ausnahme der Mischung S-10-2,5 bewirkt die Steigerung der Bindemittelzugabe erwartungsgemäß eine Abnahme der Marshall-Stabilitäten, die dadurch bei zwei Mischungen bereits bis auf die Mindeststabilität für Asphalttragschichten des Typs C absinkt. Höhere Bindemittelzugaben als die in den Untersuchungen verwendeten, wären also bei diesem Ausbaustoff nicht sinnvoll, da die Marshall-Stabilität im Vordergrund der Optimierung steht. Unter Berücksichtigung der ausgewählten Idealsieblinie und der definierten Mischgutzusammensetzung wurden vor Versuchsdurchführung wesentlich stärkere Verbesserungen der Marshall-Stabilitäten erwartet. Ursache für die unerwartet niedrigen Veränderungen der Hohlraumgehalte und Marshall-Stabilitäten ist das angewendete statische Verdichtungsverfahren. Auf diesen Aspekt wird später genauer eingegangen, da dieses Phänomen auch die anderen beiden Ausbaustoffe betrifft.

Die Wasserempfindlichkeit der Mischgutvarianten steigt im Vergleich zu den nicht optimierten Gemischen leicht an und nimmt mit steigendem Bindemittelgehalt (sinkendem Hohlraumgehalt) erwartungsgemäß ab.

Alle PAK-Konzentrationen in den Trogeluaten der Probekörper sind wesentlich geringer als der nach RuVA-StB 01/05 maximal zulässige Wert von 30 $\mu\text{g/l}$. Der Mittelwert aller neun Mischungen beträgt 7,7 $\mu\text{g/l}$, was etwa 10 % der PAK-Konzentration im Eluat des nicht umhüllten Ausbaustoffes So entspricht. Die Einbindung der PAK beim Ausbaustoff So bereitet folglich mit keiner der neun Mischungen Probleme. Allerdings folgen

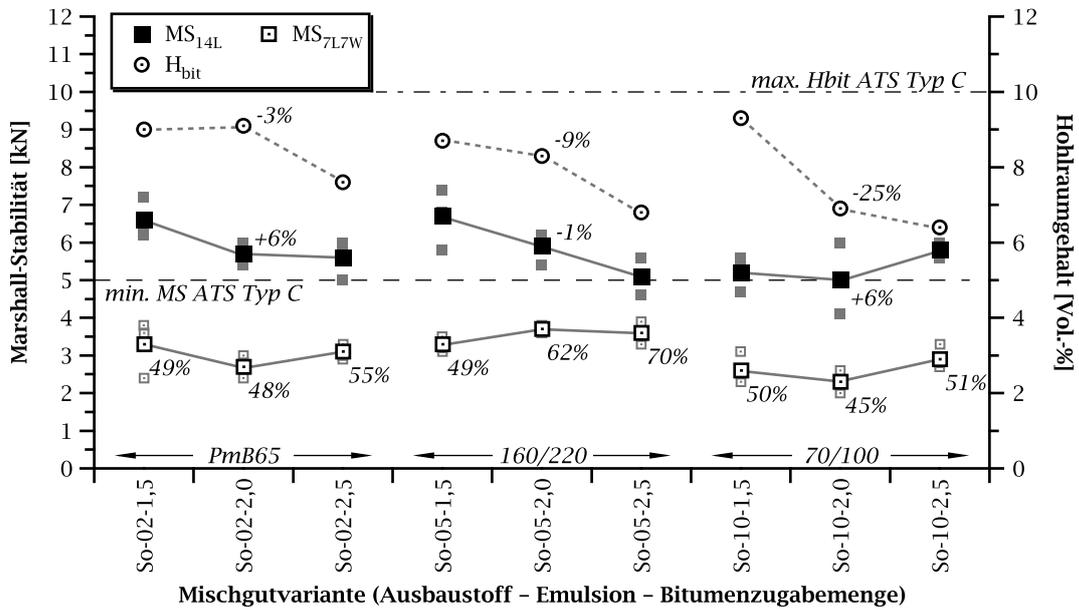


Abbildung 8.3: Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausbaustoff So hergestellten Probekörper

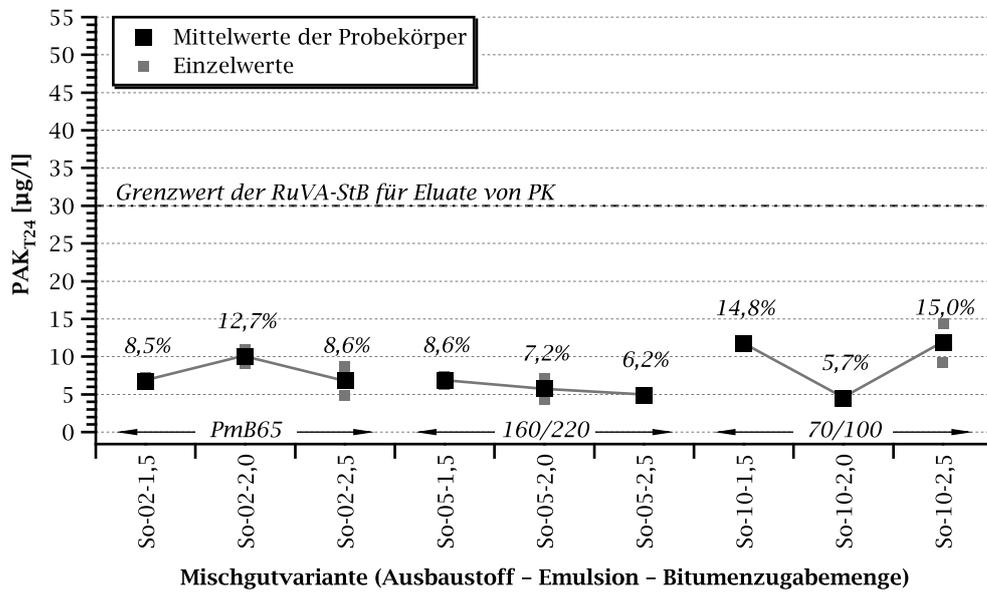


Abbildung 8.4: PAK-Konzentrationen in den Eluaten der aus dem Ausbaustoff So hergestellten Probekörper

nur die Ergebnisse der Mischungen mit Emulsion Nr. 5 einem plausiblen Verlauf, da die PAK-Konzentrationen nur bei diesen Mischungen mit steigender Bitumenzugabe abnehmen.

Es stellt sich nun die Frage, ob anhand der dargelegten Ergebnisse Mischungen zu identifizieren sind, die sowohl im Hinblick auf die bautechnischen Eigenschaften, als auch in Bezug auf die Schadstoffimmobilisierung vorteilhaft sind. In die vergleichende Bewertung aller Mischungen fließen daher die Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} und MS_{7L7W} , die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} im Trogeluat und beim Ausbaustoff Bo zusätzlich auch der Phenolindex PI_{T24} ein.

Um die Ergebnisse der einzelnen Mischungen einfach vergleichen zu können, ist eine Normierung der Prüfwerte erforderlich. Als Bezugsgröße für die Normierung eines Prüfwertes dient der jeweilige absolute Mittelwert aller neun Mischungen. Aus den Einzel- und Mittelwerten werden für jede Prüfgröße getrennt, die normierten, relativen Prüfwerte $relX_i$ der einzelnen Mischungen entsprechend Gleichung 8.1 errechnet.

$$relX_i = \frac{X_i}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

Darin bedeuten:

$relX_i$: relativer Prüfwert

X_i : absoluter Prüfwert

\bar{X} : mittlerer Prüfwert aller Mischungen eines Ausbaustoffes

Da die ermittelten Werte jeweils auf sehr kleinen Stichprobenumfängen¹ beruhen und bei den anderen beiden Ausbaustoffen zum Teil stark streuen, wird eine praxisorientierte, pragmatische Methode zur Auswahl der besten Mischungen gewählt und nachfolgend erläutert. Ziel dieses Teiles der vorliegenden Arbeit ist in erster Linie die Beantwortung der Frage, ob sich die Optimierung der Stückgrößenverteilungen der Ausbaustoffe So, Bo und To aus bautechnischer Sicht lohnt. Selbstverständlich ist dabei die Einhaltung der Grenzwerte der RuVA-StB 01/05 eine übergeordnete Bedingung. Daher wird vor der Bewertung aller Mischungen geprüft, ob bestimmte Mischungen wegen Nichteinhaltung umweltrelevanter Grenzwerte von vornherein auszuschließen sind. Anschließend wird bei den verbleibenden Mischungen anhand der bautechnischen Kennwerte die im Durchschnitt am besten geeignete Emulsion ausgewählt. Auf Grundlage der umweltrelevanten Kennwerte ist danach der optimale Bindemittelgehalt für diese Emulsion zu bestimmen, um so die insgesamt optimale Mischung herauszufinden.

Für den Ausbaustoff So ergeben sich die in Tabelle 8.4 aufgeführten relativen Prüfwerte. Die Ergebnisse sind nach Emulsionsnummer und Bitumenzugabemenge aufsteigend

¹Gemäß Kapitel 8.4 handelt es sich jeweils um 3 Einzelproben für die bautechnischen Eigenschaften und je 2 Einzelproben für die umweltrelevanten Eigenschaften.

sortiert. Beim Ausbaustoff So liegen die PAK-Konzentrationen aller Proben deutlich unterhalb des Grenzwertes der RuVA-StB 01/05 (siehe Abbildung 8.4). Daher sind alle aufgeführten Mischungen in das Auswahlverfahren einzubeziehen. Emulsion Nr. 5

Tabelle 8.4: Bewertung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften aller Mischungen mit dem Ausbaustoff So (optimale Mischung fett)

Mischung	$relMS_{14L}$ [%]	$relMS_{7L7W}$ [%]	$relPAK_{T24}$ [%]	Bitumen
So-02-1,5	115,1	107,3	87,8	
So-02-2,0	100,0	89,8	130,5	PmB 65
So-02-2,5	97,7	100,7	88,7	
So-05-1,5	116,3	107,3	88,8	
So-05-2,0	102,3	120,4	74,5	160/220
So-05-2,5	88,4	117,2	64,0	
So-10-1,5	91,3	86,5	152,7	
So-10-2,0	87,8	74,5	58,8	70/100
So-10-2,5	101,2	96,4	154,3	

erzielt die durchschnittlich besten bautechnischen Resultate, insbesondere bei den Luft-Wasser-gelagerten Probekörpern ($relMS_{7L7W}$). Mit dieser Emulsion werden also insgesamt sehr stabile und gleichzeitig gegen Wasserzutritt unempfindliche Probekörper erzeugt. Zum Vergleich: Die Probekörper mit Emulsion Nr. 10 sind alle als weniger stabil und sehr wasserempfindlich einzustufen. Auf Grundlage der erreichten PAK-Konzentrationen in den Trogeluaten der drei Mischungen mit Emulsion Nr. 5 müsste man die Mischung mit 2,5 M.-% Bitumenzugabe als besonders geeignet auswählen. Die Probekörper dieser Mischung haben allerdings nur vergleichsweise geringe Marshall-Stabilitäten nach Luftlagerung ($relMS_{14L}$). Daher wird die Mischung So-05-2,0 als besonders geeignet ausgewählt, bei der dieses Problem nicht auftritt. Sie erreicht hohe Marshall-Stabilitäten bei gleichzeitig wirksamer Einkapselung der PAK.

Die Reihenfolge des Abschneidens der Bitumenemulsionen überrascht insofern, als dass sie sowohl den Ergebnissen der Modellversuche in Kapitel 6 als auch der aufgrund der Bindemittelsteifigkeiten eigentlich zu erwartenden Reihenfolge widerspricht. Gemessen an den Untersuchungsergebnissen und den Resultaten der vergleichenden Betrachtungen, spricht bei diesem Ausbaustoff nichts gegen den Einsatz einer Bitumenemulsion mit Bitumen 160/220. Die Verwendung einer teureren Bitumenemulsion mit PmB, ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse dagegen nicht zu rechtfertigen. Es könnte natürlich auch die Emulsion Nr. 10 mit Bitumen 70/100 eingesetzt werden, ohne die geltenden Richtlinien zu verletzen; die Stabilitäten und Schadstoffimmobilisierungsraten sind hierbei aber wie bereits erwähnt, insgesamt etwas geringer und die Wasserempfindlichkeiten der Gemische deutlich höher.

8.7.2 Ausbaustoff Bo

Abbildung 8.5 stellt die Marshall-Stabilitäten MS_{14L} und MS_{7L7W} sowie die Hohlraumgehalte H_{bit} der Probekörper dar, die aus dem Ausbaustoff Bo hergestellt wurden. Die Abbildungen 8.6 und 8.7 zeigen die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} und Phenolindizes PI_{T24} in den Trogeluaten dieser Probekörper.

Die Probekörper der Mischungen mit dem Ausbaustoff Bo erfüllen die Anforderungen der ZTVT-StB 95/02 an den Hohlraumgehalt für Asphalttragschichten des Typs C nur zum Teil (siehe Abbildung 8.5). Trotz gleicher Sieblinien unterscheiden sich die Ausbaustoffe So und Bo in diesem Punkt. Dieser Unterschied korrespondiert mit den Ergebnissen der Proctor-Versuche und ist durch die ungünstigen granulometrischen Eigenschaften des Ausbaustoffes B bzw. Bo zu begründen (ungünstige Kornform und extreme Bruchflächigkeit). Der Ausbaustoff B wurde zwar aufbereitet zum Ausbaustoff Bo, aber alle Körner und Stücke des Ausbaustoffes B $< 22,4$ mm wurden granulometrisch nicht verändert sondern nur abgeseibt. Deshalb ist trotz der Aufbereitung auch im Ausbaustoff Bo eine große Zahl granulometrisch ungünstiger Körner und Stücke enthalten, die sich verdichtungshemmend auswirken.

Die bautechnischen Ergebnisse der Probekörper aus dem Ausbaustoff Bo sind insgesamt sehr uneinheitlich (siehe Abbildung 8.5). Während sich durch die Aufbereitung des Ausbaustoffes bei den Mischungen mit den Emulsionen Nr. 2 und 5 deutliche Steigerungen der Marshall-Stabilitäten MS_{14L} ergeben, sinken diese bei der Emulsion Nr. 10 um fast ein Drittel gegenüber der bautechnisch nicht aufbereiteten Mischgutvariante. Die Mindeststabilität für Asphalttragschichten des Typs C wird nur von vier der neun untersuchten Mischungen eingehalten. Unplausibel sind zudem die hohen Marshall-Stabilitäten der Mischungen Bo-02-2,0 und Bo-05-2,0, sie passen auch nicht mit den entsprechenden Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} zusammen.

Alle Proben erreichen nach der Luft-Wasser-Lagerung noch mehr als 50% der Stabilität nach Luftlagerung und gelten somit nicht als wasserempfindlich. Die Zunahme der Wasserempfindlichkeit gegenüber den vergleichbaren Mischungen mit dem nicht optimierten Ausbaustoff, ist auf die unterschiedlichen Bezugsgrößen zurückzuführen. Die bei zwei Emulsionen größeren Marshall-Stabilitäten MS_{14L} nach Luftlagerung führen auch zu einem höheren Bezugsniveau für die Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} , so dass die relativen Werte in der Folge absinken.

Wie die Abbildung 8.6 zeigt, bereitet die Immobilisierung der im Ausbaustoff Bo enthaltenen PAK keiner der drei untersuchten Bitumenemulsionen Probleme. Der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 von $30 \mu\text{g}/\text{l}$ wird von allen Proben deutlich unterschritten. Die mittlere PAK-Konzentration aller Eluate beträgt nur $9,3 \mu\text{g}/\text{l}$, entsprechend rund 8% der Konzentration im Eluat des losen, nicht umhüllten Ausbaustoffes. Die Ergebnisse der PAK-Analysen sind im Gegensatz zu den bautechnischen Kennwerten relativ einheitlich, was auf den Einfluss der Oberflächenreduzierung durch die Verdichtung zurückgeht, der eventuell vorhandene kompositionelle Unterschiede überdeckt.

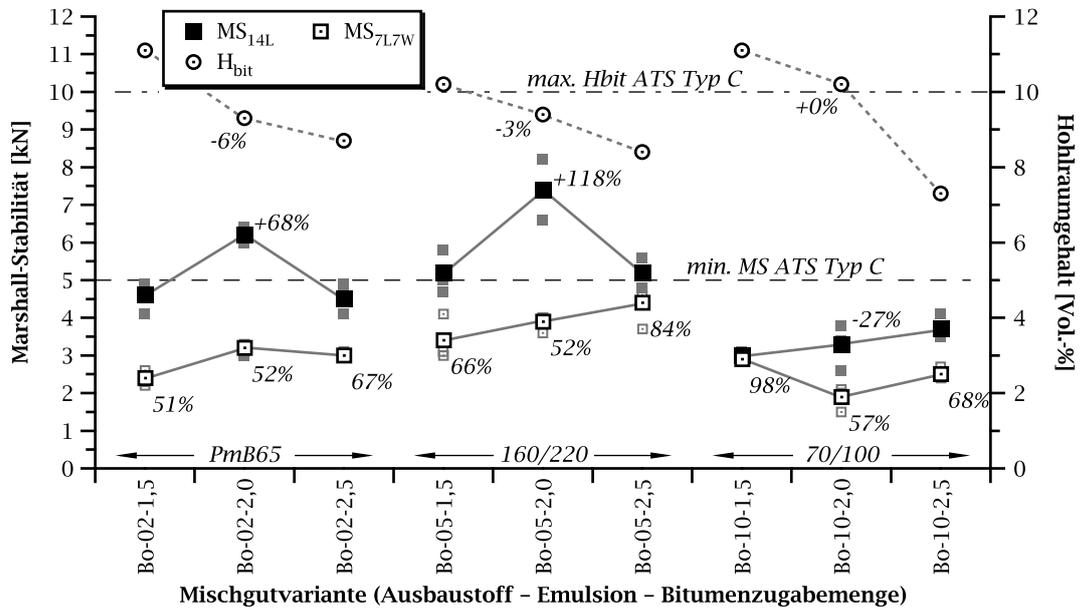


Abbildung 8.5: Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausgangsstoff Bo hergestellten Probekörper

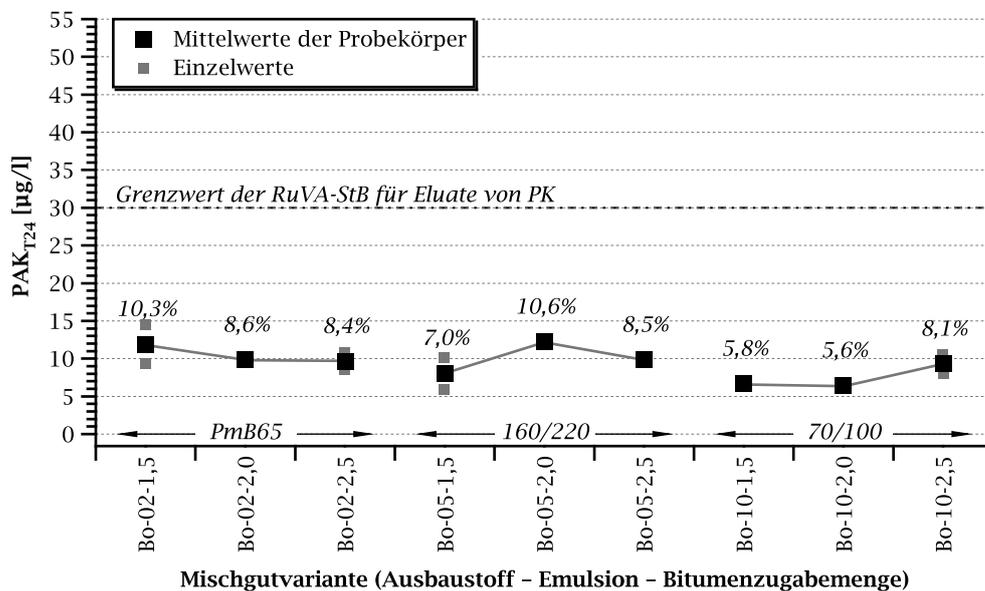


Abbildung 8.6: PAK-Konzentrationen in den Eluaten der aus dem Ausgangsstoff Bo hergestellten Probekörper

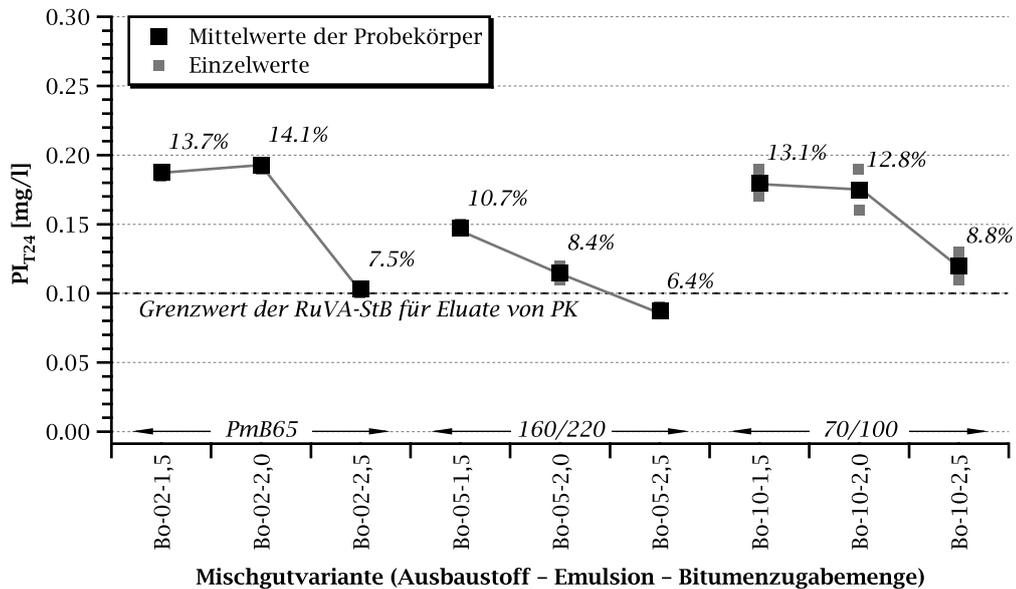


Abbildung 8.7: Phenolindizes in den Eluaten der aus dem Ausbaustoff Bo hergestellten Marshall-Probekörper

Erwartungsgemäß ist beim Ausbaustoff Bo die Einbindung der Phenole das Hauptproblem (siehe Abbildung 8.7), was mit den Ergebnissen des nicht verbesserten Ausbaustoffes übereinstimmt. Der mittlere Phenolindex aller Proben beträgt rund 0,15 mg/l. Das entspricht etwa 11 % des Phenolindizes des nicht umhüllten, losen Ausgangsmaterials. Die Emulsion Nr. 10 schneidet nicht mehr so gut ab, wie bei dem nicht optimierten Ausbaustoff B. Keine der Mischungen mit dieser Emulsion unterschreitet den nach den RuVA-StB 01/05 zulässigen Höchstwert von 0,1 mg/l. Diese Anforderung wird nur durch die Mischung Bo-05-2,5 erfüllt. Der Prüfwert der Mischung Bo-02-2,5 liegt nur sehr knapp darüber. Die Ergebnisse zeigen, dass die *sichere* Einhaltung des Grenzwertes nur durch höhere Bindemittelzugabemengen möglich wäre, da die höheren Bitumenzugaben deutliche Verminderungen der Phenolindizes bewirken. Dies steht allerdings im Widerspruch zu den bautechnischen Zielsetzungen.

Tabelle 8.5 stellt die relativen Prüfwerte aller Mischungen dar. Wegen des übergeordneten Gebotes der strikten Einhaltung umweltrelevanter Kennwerte, scheidet für die Auswahl einer optimalen Rezeptur allerdings alle Mischungen bis auf die Mischung Bo-05-2,5 aus. Nur bei dieser Mischung ist der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 für den Phenolindex im Probekörpereluat nicht überschritten. Zudem werden mit Emulsion Nr. 5 die besten Marshall-Stabilitäten erreicht. Folglich handelt es sich bei Mischung Bo-05-2,5 ganz eindeutig um die optimale Mischgutzusammensetzung. Auch bei diesem Ausbaustoff schneidet also eine Bitumenemulsion mit Bitumen 160/220 überraschend

Tabelle 8.5: Bewertung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften aller Mischungen mit dem Ausbaustoff Bo (optimale Mischung fett)

Mischung	$relMS_{14L}$ [%]	$relMS_{7L7W}$ [%]	$relPAK_{T24}$ [%]	$relPI_{T24}$ [%]	Bitumen
Bo-02-1,5	96,1	77,3	127,7	129,0	
Bo-02-2,0	129,5	104,5	105,5	132,5	PmB 65
Bo-02-2,5	94,7	99,0	103,7	70,6	
Bo-05-1,5	107,9	111,0	86,4	101,5	
Bo-05-2,0	154,5	126,2	130,9	79,2	160/220
Bo-05-2,5	108,6	142,6	105,3	60,2	
Bo-10-1,5	62,6	95,8	71,5	123,9	
Bo-10-2,0	68,2	60,9	69,1	120,5	70/100
Bo-10-2,5	78,0	82,7	100,0	82,6	

am besten ab. Der Einsatz einer PmB-Emulsion (Nr. 2) ist dagegen aufgrund der erzielten bautechnischen Eigenschaften überhaupt nicht zu rechtfertigen und wegen der weniger guten Phenoleinbindung auch nicht anzuraten. Insgesamt am schlechtesten platziert ist die Emulsion Nr. 10, die nur bei der PAK-Einbindung überdurchschnittlich gute Ergebnisse erreicht, bei den bautechnischen Kenngrößen dagegen völlig versagt. Die guten Ergebnisse bei der Phenoleinbindung am Ausbaustoff B erreicht sie beim Ausbaustoff Bo ebenfalls nicht mehr.

8.7.3 Ausbaustoff To

In Abbildung 8.8 sind die Marshall-Stabilitäten MS_{14L} und MS_{7L7W} sowie die Hohlraumgehalte H_{bit} der Probekörper dargestellt, die aus dem Ausbaustoff To hergestellt wurden. Abbildung 8.9 enthält die PAK-Konzentrationen PAK_{T24} in den Trogeluaten der Probekörper. Auf die Darstellung der Phenolindizes PI_{T24} wird verzichtet, weil diese in den Eluaten der Probekörper an der Nachweisgrenze des Prüfverfahrens liegen und daher nicht aussagekräftig sind. Sie sind gemeinsam mit den anderen Prüfwerten im Anhang E dokumentiert.

Die Hohlraumgehalte aller Probekörper des Ausbaustoffes To liegen deutlich oberhalb des Maximalwertes der ZTVT-StB 95/02 für Asphalttragschichten des Typs A (14 Vol.-%) aber noch unterhalb des Maximalwertes für den Typ A0 (20 Vol.-%). Gegenüber den Prüfwerten des nicht verbesserten Ausbaustoffes T haben sie durch die Aufbereitung und Verbesserung der Sieblinie um ca. 1,5–2,0 Vol.-% abgenommen. Durch die Erhöhung der Bitumenzugabe auf etwa 4,5 M.-% ließe sich der Hohlraumgehalt unter den Maximalwert für Asphalttragschichten des Typs C absenken. Das liefe allerdings der Wirtschaftlichkeit der Bauweise sowie den angestrebten Marshall-Stabilitäten zuwider. Die Marshall-

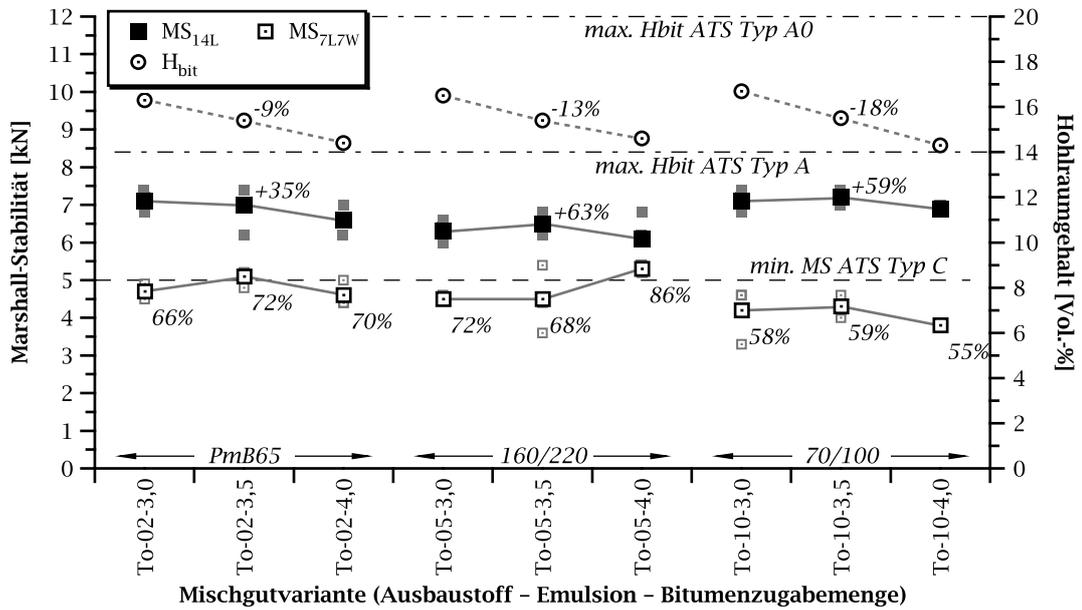


Abbildung 8.8: Marshall-Stabilitäten und Hohlraumgehalte der aus dem Ausgangsstoff To hergestellten Probekörper

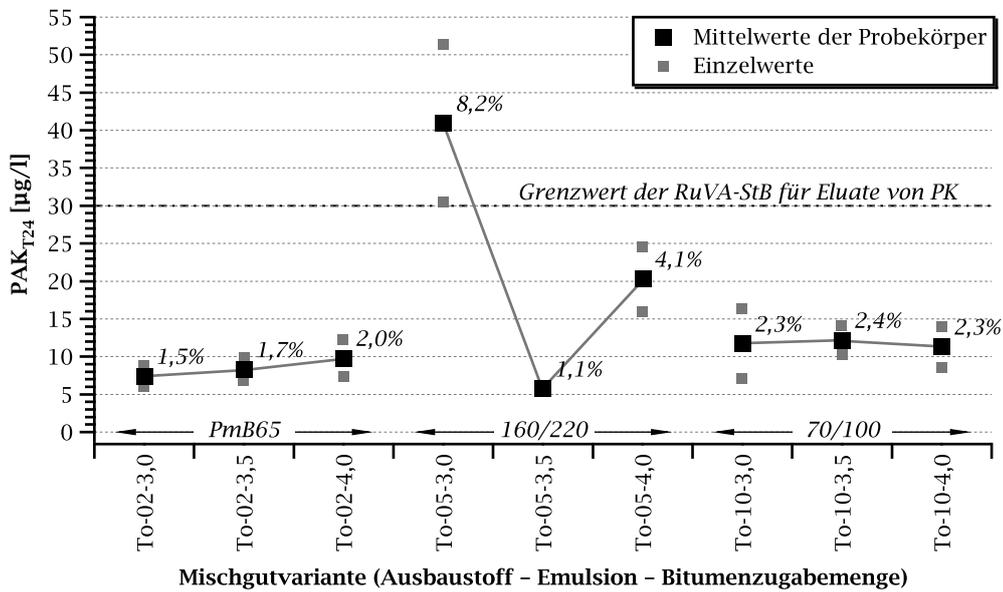


Abbildung 8.9: PAK-Konzentrationen in den Eluaten der aus dem Ausbaustoff To hergestellten Probekörper

Stabilität MS_{14L} steigt durch die Sieblinienverbesserung gegenüber dem nicht optimierten Ausbaustoff T im Mittel um rund 52% an und erreicht mit 6,8 kN das höchste Niveau aller Proben der gesamten Arbeit. Keiner der Prüfwerte ist geringer als 6 kN. Die höchsten Stabilitäten ergeben sich bei den Mischungen mit Emulsion Nr. 10. Nach Luft-Wasser-Lagerung erreichen die Mischgutvarianten To-02-3,5 und Bo-05-4,0 sogar noch die Mindeststabilität für Asphalttragschichten des Typs C. Die Wasserempfindlichkeit der Mischungen mit den Emulsionen Nr. 2 und Nr. 5 ist sehr niedrig, die der Mischungen mit Emulsion Nr. 10 dagegen deutlich höher. Die Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} betragen aber immer noch mehr als 50 % der Marshall-Stabilitäten MS_{14L} . Die Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen mit dem Ausbaustoff To sind insgesamt sehr ausgeglichen. Die Bindemittelzugabe hat auf die Marshall-Stabilität sowohl nach Luft- als auch nach Luft-Wasser-Lagerung nur minimalen Einfluss, bei den Hohlraumgehalten ist dagegen ein direkter Zusammenhang erkennbar.

Die sehr hohe PAK-Konzentration PAK_{T24} im Eluat des nicht umhüllten Ausbaustoffes To (499 $\mu\text{g/l}$) kann, bis auf die Ausnahme der Mischung To-05-3,0, in allen untersuchten Fällen soweit reduziert werden, dass der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 von 30 $\mu\text{g/l}$ eingehalten ist. Hieran zeigt sich der Einfluss der Oberflächenreduzierung durch die Verdichtung des Mischgutes bei der Probekörperherstellung besonders deutlich. Während der nicht umhüllte Ausbaustoff To durch seine sehr feinkörnige Sieblinie dem Elutionsmedium eine extrem große Oberfläche »anbietet«, ist diese beim verdichteten Probekörper wesentlich geringer, so dass sich die PAK-Konzentrationen im Eluat der Probekörper nur noch zwischen 1,5% (Mischung To-02-3,0) und 8,0% (Mischung To-05-3,0) des unbehandelten Ausbaustoffes bewegen. Unplausibel erscheinen die extremen Unterschiede bei den Mischgutvarianten mit Emulsion Nr. 5. Aufgrund der vergleichsweise hohen Homogenität des Ausbaustoffes To sowie ansonsten ebenfalls einheitlicher Ausgangsmaterialien und Herstellung der Probekörper kommen für diese Schwankungen eigentlich nur Ursachen in der Verfahrenskette der Eluatgewinnung, -aufbereitung und -analyse in Betracht.

Tabelle 8.6 fasst die relativen Prüfwerte aller Mischungen mit dem Ausbaustoff To zusammen, von denen die Mischung To-05-3,0 in der weiteren Betrachtung ausscheidet, da sie den Grenzwert der RuVA-StB 01/05 bei der PAK-Konzentration im Eluat der Probekörper überschreitet (siehe Abbildung 8.9). Anhand der in Tabelle 8.6 dargestellten Ergebnisse zeigt sich, dass die insgesamt besten bautechnischen Resultate mit den Mischungen der Emulsion Nr. 2 erzielt werden, insbesondere wegen der geringen Wasserempfindlichkeit der Gemische. Diese drückt sich durch besonders guten Marshall-Stabilitäten nach Luft-Wasser-Lagerung aus ($relMS_{7L7W}$). Mit der geringsten Bitumenzugabemenge von 3,0 M.-% wird die insgesamt beste PAK-Einbindung erreicht, eine höhere Bitumenzugabe ist daher für die sichere Einkapselung der PAK nicht erforderlich. Daher wird die Mischung To-02-3,0 als optimal für den Ausbaustoff To bewertet. Bei dieser Aussage ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit Ausnahme der Mischungen To-05-3,0 und To-05-4,0 durchweg gute Resultate erreichbar sind und die Absolutwerte insgesamt

Tabelle 8.6: Bewertung der bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften aller Mischungen mit dem Ausbaustoff To (optimale Mischung fett)

Mischung	$relMS_{14L}$ [%]	$relMS_{7L7W}$ [%]	$relPAK_{T24}$ [%]	Bitumen
To-02-3,0	102,9	105,9	52,2	
To-02-3,5	101,0	114,2	58,6	PmB 65
To-02-4,0	95,2	103,6	69,2	
To-05-3,0	91,3	102,1	288,5	
To-05-3,5	94,2	100,6	40,4	160/220
To-05-4,0	88,5	118,7	143,1	
To-10-3,5	103,8	96,1	82,6	
To-10-3,0	102,9	93,9	85,7	70/100
To-10-4,0	100,0	85,6	79,7	

nur wenig differieren. Somit wären auch andere Mischungen erfolgreich einsetzbar, z. B. diejenigen mit Emulsion Nr. 10, da die erreichten bautechnischen Eigenschaften nicht unbedingt den Einsatz einer PmB-Emulsion erfordern. Diese Entscheidung bleibt aber einer wirtschaftlichen Abwägung im Einzelfall überlassen.

8.7.4 Gemeinsame Ergebnisse der bautechnisch optimierten Ausbaustoffe

Aus den Untersuchungen ergeben sich einige Erkenntnisse, die alle drei untersuchten Ausbaustoffe betreffen. Diese werden im Folgenden erläutert.

Durch die bautechnische Optimierung der Ausbaustoffe sinken die Hohlraumgehalte der statisch verdichteten Probekörper zwar ab, aber der gewünschte Effekt tritt nicht im beabsichtigten Umfang und auch nicht systematisch ein. Beim Ausbaustoff Bo sind die Absenkungen im Grunde genommen vernachlässigbar, beim Ausbaustoff So dagegen sehr unregelmäßig. Beim Teersand To wiederum ergeben sich durch die verbesserte Sieblinie in allen drei Fällen verminderte Hohlraumgehalte. Zwischen den Hohlraumgehalten und den emulgierten Bitumensorten sind bei keinem der aufbereiteten Ausbaustoffe Abhängigkeiten zu erkennen. Dieses Phänomen stimmt mit den während der Probekörperherstellung gemachten Erfahrungen überein. Anfänglich wurde davon ausgegangen, dass die Einwaage für jeden Probekörper gegenüber den Mischungen mit den nicht optimierten Ausbaustoffen angehoben werden muss, um die angestrebte Höhe eines Marshall-Probekörpers von 63,5 mm etwa zu erreichen. Die so hergestellten Probekörper gerieten jedoch zu hoch und mussten verworfen werden. Aufgrund dessen fand die Probekörperherstellung im Folgenden mit den gleichen Einwaagen statt, wie bei den nicht optimierten Ausbaustoffen. Dadurch stimmen die erreichten Probekörperhöhen ungefähr mit dem Zielwert von 63,5 mm überein. Hieraus ist der Schluss zu ziehen, dass

das eingesetzte statische Verdichtungsverfahren nicht in der Lage ist, die Potenziale der verbesserten Stückgrößenverteilungen der optimierten Ausbaustoffe in vollem Umfang auszunutzen. Ursache dafür ist das Fehlen der für den Hohlraumschluss notwendigen Kornumlagerungsprozesse. Da das Mischgut während der Verdichtung in den Probekörperformen im Wesentlichen nur parallel zur Belastungsrichtung bewegt wird, ist die Ausbildung eines dichten und gut abgestützten Korngerüsts offensichtlich nicht in ausreichendem Maße möglich. Dies hat jedoch nichts mit dem angewendeten Verfahren im Speziellen zu tun, sondern gilt grundsätzlich für alle statischen Laborverdichtungsverfahren, denen sowohl die einrüttelnde Wirkung einer Vibrationsverdichtung als auch die walkende Wirkung einer Walzverdichtung fehlt. Dadurch werden Feinanteile nicht in die Kornzwischenräume größerer Körnungen gedrängt, so dass relativ große Hohlräume verbleiben. Eine Vibrationsverdichtung sollte aber bei Emulsionsmischgut grundsätzlich unterbleiben, um die frischen Bitumenfilme nicht sofort wieder von den Gesteinsoberflächen abzureißen. Erfahrungsgemäß müssen langsame, schwere Walzen eingesetzt werden, um optimale Verdichtungsergebnisse zu erhalten. Dieses Prinzip sollte auch bei einem Laborverdichtungsverfahren für Emulsionsmischgut umgesetzt werden, um den Untersuchungen praxisrelevante Verdichtungsbedingungen zu Grunde zu legen. Diese wesentliche Erkenntnis widerlegt den bisherigen Stand der Wissenschaft (siehe Kapitel 3.6.2 sowie [68] und [77]) und muss daher in anschließenden Forschungsarbeiten überprüft und umgesetzt werden. In einem ersten Schritt sollte dahingehend versucht werden, Emulsionsmischgut im Gyrator zu verdichten, weil dieser die o.g. Randbedingungen von allen existierenden Verdichtungsverfahren theoretisch am besten simulieren kann.

Auf die Marshall-Stabilitäten hat die Verbesserung der Stückgrößenverteilungen sehr unterschiedliche Auswirkungen. Beim Ausbaustoff So ist diese aufwendige Maßnahme so gut wirkungslos, beim Teersand To werden die Stabilitäten dagegen um mehr als 50% angehoben und beim Ausbaustoff Bo stellen sich extrem gespreizte Resultate ein. Ursache dafür sind ebenfalls die o.g. Aspekte zum angewendeten Laborverdichtungsverfahren. Eine grundsätzliche Empfehlung zur bautechnischen Aufbereitung der pechhaltigen Ausbaustoffe kann auf Grundlage der vorliegenden Daten daher nicht gegeben werden. Die Beantwortung der in der Zielstellung diesbezüglich formulierten Frage bleibt daher offen und muss durch anschließende Arbeiten unter Anwendung anderer Laborverdichtungsverfahren geklärt werden.

Ein Vergleich der Marshall-Stabilitäten aller Proben zeigt, dass sich durch die Verwendung verschiedener Emulsionen durchaus unterschiedliche Ergebnisse ergeben. Die Marshall-Stabilitäten MS_{7L7W} der Mischungen mit Emulsion Nr. 10 sind bis auf eine Ausnahme (Bo-10-1,5) immer niedriger als die der Mischgutvarianten mit den anderen beiden Bitumenemulsionen; die Wasserempfindlichkeit der Mischungen mit Emulsion Nr. 10 ist also größer als die der anderen Gemische. Die Bitumenemulsionen weisen darüber hinaus unterschiedliche Verträglichkeiten mit den Ausbaustoffen auf. Auch hier

ist die Emulsion Nr. 10 ein gutes Beispiel, die Marshall-Stabilitäten der Probekörper aus dem Ausbaustoff Bo unterschreiten die Prüfwerte der anderen Mischungen deutlich.

Die Immobilisierung der PAK ist mit Ausnahme der Mischung To-05-3,0 insgesamt nie problematisch, wenn man zur Bewertung die bauvertraglich relevanten PAK-Konzentrationen in den Trogeluaten der Probekörper heranzieht. Dennoch lassen sich auch bei diesem Aspekt Unterschiede in der Wirkung der untersuchten Bitumenemulsionen erkennen, so dass die Immobilisierungsrate durch die Wahl einer geeigneten Emulsion in der Eignungsprüfung optimierbar ist.

Grundsätzliche Schwierigkeiten bereitet die Einbindung der Phenole. Nur eine Mischgutvariante (Bo-05-2,5) erfüllt die Anforderung der RuVA-StB 01/05. Durch Erhöhung der Bindemittelzugaben könnte der Grenzwert wahrscheinlich aber auch mit den anderen Emulsionen eingehalten werden. Es ist davon auszugehen, dass dazu ca. 3,0-3,5 M.-% Bitumen zuzugeben wären. Die Emulsion Nr. 5 käme mit einer Bitumenzugabe von 3,0 M.-% aus, um den Grenzwert sicher einzuhalten, bei der Emulsion Nr. 2 wären dagegen voraussichtlich 3,5 M.-% erforderlich. Um die Phenole wirkungsvoll und wirtschaftlich zu immobilisieren, ist also die gezielte Auswahl einer dafür geeigneten Emulsion in der Eignungsprüfung unerlässlich.

Diese Ergebnisse unterstreichen, dass es zum Erreichen optimaler bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften eines Emulsionsmischgutes unabdingbar ist, Ausbaustoff und Bitumenemulsion im konkreten Fall innerhalb der Eignungsprüfungen aufeinander abzustimmen. Dazu kann es auch erforderlich sein, mehrere Bitumenemulsionen in den Eignungsprüfungen zu untersuchen. Diese Vorgehensweise könnte als erweiterte Eignungsprüfung für Kaltrecyclingmischgut mit Bitumenemulsionen betrachtet werden. Zu deren Umfang und Inhalt wird im nächsten Kapitel ein Vorschlag formuliert.

8.7.5 Vorschlag für erweiterte Eignungsprüfungen an Kaltrecyclingmischgut mit Bitumenemulsion

In eine erweiterte Eignungsprüfung an Kaltrecyclingmischgut mit Bitumenemulsion sollten mindestens drei verschiedene Bitumenemulsionen mit jeweils drei verschiedenen Bitumenzugabemengen einfließen, um eine optimale Rezeptur festlegen zu können. Es wäre wünschenswert, Emulsionen verschiedener Hersteller zu untersuchen, wobei jedoch die Verfügbarkeit in der Region nicht außer Acht gelassen werden kann, so dass ggf. auf drei verschiedene Emulsionen eines Herstellers zurückgegriffen werden muss. Die Bitumenemulsionen sollten sich im Hinblick auf die emulgierten Bitumen unterscheiden oder auch durch eventuell verwendete Zusätze wie z. B. Haftvermittler. Wie die Untersuchungsergebnisse an den nicht aufbereiteten Ausbaustoffen zeigen, müssen anionische Bitumenemulsionen nicht von vornherein ausgeschlossen werden.

Nach Bestimmung der üblichen bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften des Ausbaustoffes ist im Einzelfall zunächst über eine Sieblinienverbesserung zu

entscheiden. Grundlage dafür bilden die Stückgrößenverteilung des Ausbaustoffes und ihre möglicherweise auszugleichende Abweichung zum angestrebten Sieblinienbereich nach ZTV T-StB 95/02.

Die weiteren Untersuchungen finden dann *entweder* am originalen *oder* am bautechnisch verbesserten Ausbaustoff statt, weil die Untersuchung beider Varianten zu einem Untersuchungs- und Prüfaufwand mit nicht vertretbarem Umfang führen würde. Dies treibt nicht nur die Kosten unnötig in die Höhe sondern bedarf auch eines wesentlich größeren Untersuchungszeitraumes. Dies ist in praxi nicht umsetzbar.

In den Untersuchungen sollten Kenngrößen zur Beurteilung der bautechnischen Eignung der verschiedenen Mischungen nach Luft- und Luft-Wasser-Lagerung an Laborprobekörpern bestimmt werden. Für die Eignungsprüfungen ist es ausreichend, die umweltrelevanten Kenngrößen PAK-Konzentration und Phenolindex im Trogeluat der Probekörper zu bestimmen.

Entsprechend der im Kapitel 8.7.1 beschriebenen Methodik sollte nach Vorliegen aller Ergebnisse die am besten geeignete Mischgutzusammensetzung ausgewählt und zur Ausführung empfohlen werden.

Für die Durchführung der erweiterten Eignungsprüfungen ist ein Zeitraum von insgesamt etwa acht Wochen nötig. Die Straßenbauverwaltung sollte Eignungsprüfungen für geplante Kaltrecyclingmaßnahmen daher mit ausreichendem zeitlichem Abstand, getrennt von konkreten Baumaßnahme beauftragen und die Ergebnisse dem Bauauftragnehmer anschließend zur Verfügung stellen.

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Pechhaltige Straßenausbaustoffe sind umweltgerecht und möglichst hochwertig wiederzuverwerten. In Bezug auf die Einbindung der darin enthaltenen PAK und Phenole gilt das Kaltrecycling mit Bitumenemulsion im Allgemeinen als das sicherste Verfahren. Systematische Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Bitumenemulsionen hinsichtlich der Schadstoffimmobilisierung und der erreichbaren bautechnischen Eigenschaften fehlten bislang allerdings. Um die daraus resultierenden Fragestellungen, die im Kapitel 2 formuliert sind, zu beantworten, wurde ein Untersuchungsprogramm bearbeitet, das vier pechhaltige Ausbaustoffe sowie neun kationische Bitumenemulsionen und eine anionische Bitumenemulsion für Recyclingzwecke einschließt. Die vier Ausbaustoffe repräsentieren alle in Deutschland vorkommenden Varianten pechhaltigen Straßenaufbruchs.

Um zunächst genauere Kenntnis über das Brechverhalten kationischer Bitumenemulsionen zu erlangen, wird im ersten Schritt ein verbessertes, an die europäische Normung angelehntes Prüfverfahren entwickelt. Es ist weitestgehend von subjektiven Einflüssen befreit und erlaubt die angestrebte Ableitung charakteristischer Größen für das Brechverhalten von Bitumenemulsionen. Die Versuche an insgesamt acht kationischen Bitumenemulsionen ergeben, dass sich das Brechverhalten entsprechend eines exponentiellen Kurvenverlaufes mit den drei Parametern a , b und c entwickelt. Die drei Parameter sind physikalisch interpretiert, so dass der formulierte mathematische Zusammenhang als Stoffgesetz angesehen werden kann. Die Parameter b und c lassen sich in Zusammenhang mit dem *Fünf-Stufen-Modell* von GLET bringen, welches das Brechverhalten von Emulsionsmischgut aus baupraktischer Sicht beschreibt. Die auf Grundlage dieses Stoffgesetzes ermittelten Ergebnisse stehen nicht im Widerspruch zu denen der klassischen Prüf- und Auswertungsmethoden sondern präzisieren und ergänzen diese maßgeblich. Auf Grundlage der Parameter b und c können Bitumenemulsionen entsprechend ihres Brechverhaltens in vier Typen eingeteilt werden. Diese Kategorisierung hat eine weitreichende praktische Bedeutung bezüglich der Eignung und Auswahl von Bitumenemulsionen für bestimmte Einsatzzwecke. Insgesamt ist somit festzustellen, dass im Hinblick auf das Brechverhalten die im Kapitel 2 formulierte Zielstellung dieser Arbeit erfüllt ist.

Im Rahmen der Modellversuche zur PAK-Immobilisierung durch Bitumenemulsionen wird ein einfaches und sicheres Verfahren zur Herstellung eines geeigneten, definierten und pechhaltigen Labormischgutes entwickelt. Die Bestimmung der durch Umhüllung des pechhaltigen Labormischgutes mit verschiedenen Bitumenemulsionen erzeugten Schichtdicken der Bitumenfilme erfolgt mit Hilfe eines selbst entwickelten, rechnerisch-experimentellen Lösungsansatzes. Die berechneten Dicken werden als ideale Schicht-

dicken bezeichnet, da sie unter vereinfachenden Annahmen geltende Näherungswerte darstellen. Unter den ausgewählten Untersuchungsbedingungen liegen die ideellen Schichtdicken je nach Bindemittelzugabe etwa zwischen zwei und sechs Hundertstel-millimeter. Bitumenfilme dieser Dicke sind nachweislich in der Lage, PAK wirksam einzuschließen, ohne hierzu auf Oberflächenreduzierungseffekte durch Verdichtung oder auf die Bindung pechhaltiger Feinanteile angewiesen zu sein. Dies verschafft dem Kaltrecycling mit Bitumenemulsionen einen Sicherheitsvorsprung gegenüber anderen Verfahren. Mit dieser Feststellung ist die in der Zielstellung der Arbeit formulierte Frage nach der selbstständigen Wirksamkeit der Bitumenemulsionen bezüglich der PAK-Immobilisierung eindeutig beantwortet.

Die erreichten Immobilisierungsraten hängen von der Menge an zugegebenem Bitumen ab. Schon bei einer Zugabe von nur 0,75 M.-% Bitumen in emulgierter Form sinken die PAK-Konzentrationen in den Eluaten in jedem Fall auf weniger als zwei Drittel des Ausgangsmaterials. Werden dem pechhaltigen Labormischgut 1,25 M.-% Bitumen zugegeben, vermindern sich die PAK-Konzentrationen in den meisten Fällen auf weniger als 50%. Auf Grundlage der vorliegenden Daten ist jedoch die in der Zielstellung formulierte Frage nach Zusammenhängen zwischen kompositionellen Merkmalen der Bitumenemulsionen und der erreichbaren Schadstoffimmobilisierung nicht eindeutig zu beantworten. Vermutlich sind die unterschiedlichen Immobilisierungsraten auf die emulgierten Bitumen zurückzuführen. Härtere Bitumen sind aufgrund ihrer weniger stark ausgeprägten Maltenphase für die Einbindung von PAK wahrscheinlich besser geeignet als weiche Bitumen. Diese noch zu überprüfende und statistisch zu untermauernde Vermutung läuft der Forderung nach möglichst weichen Bitumen zuwider, die wegen ihrer geringeren Neigung zum Zusammenziehen der Bindemittelfilme an den Kornoberflächen günstiger für die optimale Umhüllung der Körner zu sein scheinen. Die Hersteller müssen hier also einen geeigneten Kompromiss suchen. Außerdem unterstreicht diese Erkenntnis die Notwendigkeit der Auswahl einer Bitumenemulsion auf Grundlage einer gründlichen und repräsentativen Eignungsprüfung.

An den vier Ausbaustoffen finden in ihrem Ausgangszustand Untersuchungen unter Einbeziehung aller zehn Bitumenemulsionen statt. Nach Abschluss dieser Untersuchungen erfolgt eine Optimierung der Sieblinien der Ausbaustoffe nach bautechnischen Gesichtspunkten. Im Labor gebrochenes Material ergänzt die den Materialien typischerweise fehlenden Füller- und Feinsandkörnungen. Dabei findet ausschließlich vorhandenes pechhaltiges Material Verwendung, so dass eine vollständige Wiederverwertung der Ausbaustoffe erreicht wird. Die Untersuchungen der drei aufbereiteten pechhaltigen Materialien finden unter Verwendung von drei ausgewählten Bitumenemulsionen statt.

Zur Beschreibung des Ausgangszustandes der vier Ausbaustoffe werden die PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in ihren Eluaten ermittelt. Diese beiden Kennwerte werden außerdem am losen, nicht verdichteten Mischgut und an den fertigen Probekörpern bestimmt. Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Ausbaustoffe mit denen der Mischgutvarianten ist die Wirksamkeit der Bitumenemulsionen in Bezug auf die

Schadstoffimmobilisierung abzuleiten. Der Vergleich von Mischgut und Probekörper zeigt die diesbezügliche Wirkung der Verdichtung (Oberflächenreduzierung). An den Probekörpern werden jeweils nach Luft- und Luft-Wasser-Lagerung Marshall-Versuche durchgeführt, um deren bautechnische Eigenschaften mit den Anforderungen der ZTVT-StB 95/02 vergleichen zu können.

Die in den Modellversuchen nachgewiesene, schadstoffimmobilisierende Wirkung der Bitumenfilme ist ebenfalls an den realen pechhaltigen Ausbaustoffen festzustellen. Auch hier ergeben sich bereits durch die reine Umhüllung mit Bitumenemulsion deutliche Reduzierungen. In vielen Fällen wird der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 für die PAK-Konzentration in Eluaten von Probekörpern (max. 30 µg/l) bereits durch das noch unverdichtete Mischgut eingehalten und durch die Verdichtung des Mischgutes zum Probekörper weiter reduziert. Die sichere Einbindung der PAK ist folglich mit den untersuchten Bitumenemulsionen und den zur Verfügung stehenden Ausbaustoffen problemlos möglich. Bei den verdichteten Probekörpern sind die Unterschiede in den Immobilisierungsraten zwischen den einzelnen Bitumenemulsionen so gering, dass sie vernachlässigbar sind.

Die Einbindung der Phenole, die im Wesentlichen braunkohlenteerpechhaltige Ausbaustoffe betrifft, bereitet allen untersuchten kationischen Bitumenemulsionen Schwierigkeiten. Deshalb ist der Phenoleinbindung durch die Auswahl einer geeigneten Bitumenemulsion in der Eignungsprüfung ganz besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die Phenolindizes werden durch die Umhüllung und Verdichtung zwar reduziert, der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 für den Phenolindex im Eluat von Probekörpern (max. 0,1 mg/l) wird aber nur in sehr wenigen Fällen eingehalten. Die Phenolimmobilisierung kann durch erhöhte Bindemittelzugaben verbessert werden. Die Bitumenzugabemenge ist deshalb erforderlichenfalls so weit zu Lasten der bautechnischen Eigenschaften zu erhöhen, bis der Grenzwert der RuVA-StB 01/05 eingehalten wird.

In den vergleichenden Untersuchungen an den nicht aufbereiteten Ausbaustoffen kann am Beispiel der Emulsion Nr. 9 nachgewiesen werden, dass die sichere Einbindung der Phenole auch mit einer anionischen Bitumenemulsion gelingen kann. Die diesbezüglich guten Ergebnisse der Emulsion Nr. 9 gehen vermutlich auf ihre hohe Affinität zum vorwiegend basischen Ausbaustoff B zurück. Die Ergebnisse widerlegen eindeutig die in der Fachwelt vertretene Meinung, dass anionische Emulsionen für die Wiederverwertung pechhaltiger Ausbaustoffe wegen ihres basischen Charakters *grundsätzlich* ungeeignet seien. Vielmehr wird hieran deutlich, dass die möglichst gute Abstimmung zwischen Emulsion und Ausbaustoff wesentlich wichtiger ist, als Einflüsse aus dem Chemismus einer im Emulsionsmischgut mengenmäßig nur marginal vertretenen Bitumenemulsion auf die Löslichkeit der Phenole.

Die Ergebnisse der Modellversuche am pechhaltigen Labormischgut spiegeln sich in den Ergebnissen der realen Ausbaustoffe nicht wider. Es lassen sich keine Abhängigkeiten zwischen den verwendeten Bitumenemulsionen und der PAK-Immobilisierung am losen Mischgut finden. Dieser Umstand geht auf die Beschaffenheit der pechhalti-

gen Ausbaustoffe zurück, deren Zusammensetzung und Granulometrie insbesondere im Ausgangszustand starken, zufälligen Veränderungen unterworfen sind. Die daraus resultierenden Effekte überdecken die übrigen Einflüsse. Die hohe Veränderlichkeit ist typisch für pechhaltige Straßenausbaustoffe und wirkt sich auch auf die bautechnischen Eigenschaften des daraus erzeugten Mischgutes aus.

Die Probekörper der in ihrem Ausgangszustand belassenen pechhaltigen Ausbaustoffe erfüllen nach Luftlagerung in den meisten Fällen die Anforderungen der ZTVT-StB 95/02 an die Marshall-Stabilität von Asphalttragschichten des Typs B, einige Proben erfüllen auch die Anforderungen an den Typ C. Unterschiede zwischen den Bitumenemulsionen sind aus den erwähnten Gründen nicht erkennbar. Die Wasserempfindlichkeit der Gemische ist gering, da die nach der Luft-Wasserlagerung verbleibenden Stabilitäten mehr als 50% der Stabilitäten nach Luftlagerung betragen. Die Hohlraumgehalte der Probekörper lassen sich zwar ebenfalls in die Anforderungen der ZTVT-StB 95/02 einordnen, sind aber insgesamt relativ hoch. Die Verringerung der Hohlraumgehalte könnte sowohl die bautechnischen als auch die umweltrelevanten Eigenschaften verbessern. Dabei ist zu jedoch beachten, dass zum Austreten des im Emulsionsmischgut enthaltenen Wassers ein Mindesthohlraumgehalt erforderlich ist.

Durch die bautechnische Optimierung der Stückgrößenverteilungen der Ausbaustoffe sinken die Hohlraumgehalte der Probekörper zwar ab, die Verringerungen sind aber unsystematisch und deutlich geringer als erwartet. Auf die Marshall-Stabilitäten hat die Verbesserung der Sieblinien sehr unterschiedliche Auswirkungen. Beim steinkohlenteerpechhaltigen Granulat ist sie so gut wie wirkungslos, beim Teersand steigen die Stabilitäten um mehr als 50% an und beim braunkohlenteerpechhaltigen Ausbaustoff stellen sich extrem gespreizte Resultate ein. Diese Effekte sind auf das angewendete statische Verdichtungsverfahren zurückzuführen. Dieses bewirkt die erforderlichen Kornumlagerungen nicht in ausreichendem Umfang, wodurch vorhandene Hohlräume nicht ausgefüllt werden und sich die einzelnen Körner nicht optimal gegeneinander abstützen. Eine generelle Aussage zum Nutzen einer bautechnischen Optimierung pechhaltiger Ausbaustoffe ist auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse daher nicht zu treffen. Insofern ist auch die in der Zielstellung formulierte Frage nach dem Nutzen einer bautechnischen Optimierung der Ausbaustoffe nicht allgemeingültig zu beantworten. Deswegen sollte im Einzelfall über eine Sieblinienverbesserung im Rahmen der Eignungsprüfung anhand der granulometrischen Eigenschaften sowie der Stück- und Korngrößenverteilungen eines pechhaltigen Ausbaustoffes entschieden werden.

Die Marshall-Stabilitäten der bautechnisch optimierten Ausbaustoffe erfüllen nach Luftlagerung der Probekörper mit einigen Ausnahmen beim braunkohlenteerpechhaltigen Granulat die Anforderungen der ZTVT-StB 95/02 an Asphalttragschichten des Typs C. Durch die Verwendung verschiedener Emulsionen ergeben sich durchaus unterschiedliche Ergebnisse, insbesondere was die Wasserempfindlichkeit der Gemische betrifft. Die Bitumenemulsionen weisen verschiedene Verträglichkeiten mit den Ausbaustoffen auf, was besonders beim braunkohlenteerpechhaltigen Granulat hervortritt,

weil dieser Ausbaustoff Bestandteile mit basischem Charakter enthält, was kationischen Bitumenemulsionen Schwierigkeiten bei der Umhüllung der Körner und bei der Haftung der Bitumenfilme bereitet.

Die Gesamtschau der erreichten bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften ermöglicht die Auswahl von optimalen Mischgutrezepturen für die drei bautechnisch optimierten Ausbaustoffe. Die Auswahl zeigt, dass sowohl beim steinkohlenteerpechhaltigen als auch beim braunkohlenteerpechhaltigen Granulat die besten Resultate mit einer Emulsion erzielt werden, die ein Bitumen 160/220 enthält. Der Einsatz einer PmB-Emulsion erscheint dagegen nur beim Teersand sinnvoll. Bis auf wenige Ausnahmen lassen sich mit allen drei untersuchten Emulsionen gute bautechnische Eigenschaften erzielen, diese können jedoch durch eine gezielte Auswahl der Bitumenemulsion und der Bindemittelzugabe optimiert werden.

Die Untersuchungen haben insgesamt sehr deutlich gezeigt, dass es zum Erreichen optimaler bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften eines Emulsionsmischgutes unabdingbar ist, Ausbaustoff und Bitumenemulsion im konkreten Fall innerhalb der Eignungsprüfungen bestmöglich aufeinander abzustimmen. Erweiterte Eignungsprüfungen im Sinne des Kapitels 8.7.5 sind dafür am besten geeignet. Für diese ist ein Zeitraum von insgesamt etwa acht Wochen erforderlich. Die Straßenbauverwaltung sollte Eignungsprüfungen für geplante Kaltrecyclingmaßnahmen daher mit ausreichendem zeitlichem Abstand, getrennt von konkreten Baumaßnahmen beauftragen und die Ergebnisse dem Bauauftragnehmer anschließend zur Verfügung stellen.

10 Ausblick

Bei der weiteren wissenschaftlichen Bearbeitung der Thematik sollte grundsätzlich beachtet werden, dass vergleichende Betrachtungen zur Wirksamkeit von Bitumenemulsionen, unter Verwendung realer, bautechnisch nicht weiter behandelter, pechhaltiger Ausbaustoffe mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Die Einflüsse aus Granulometrie und Zusammensetzung der Ausbaustoffe überlagern die möglicherweise durch die Bitumenemulsionen vorhandenen Unterschiede. Es sollte deswegen ausschließlich auf Versuche mit bautechnisch optimierten, oder besser noch mit definiert zusammengesetzten Materialien, wie sie im Kapitel 6 beschrieben sind, zurückgegriffen werden.

Darüber hinaus erscheint es äußerst vorteilhaft, die Bitumenemulsionen im Labor selbst zu erzeugen, weil dann sowohl die kompositionellen Parameter der verwendeten Emulsionen bekannt sind als auch deren Vergleichbarkeit während der gesamten Arbeit sichergestellt ist. Außerdem werden dadurch Einflüsse aus Probenlagerung und -transport minimiert bzw. ausgeschlossen.

Weiterführende wissenschaftliche Arbeiten zu den hier behandelten Themen sollten sich in erster Linie der erweiterten Untersuchung

- des Brechverhaltens von Bitumenemulsionen,
- der Schadstoffimmobilisierung mit Bitumenemulsionen sowie
- der Verdichtung emulsionsgebundener Laborprobekörper

widmen. Dabei sollten sich die Arbeiten auf jeweils ein Thema beschränken und im Gegenzug ihre Ergebnisse durch ausreichend große Stichprobenumfänge absichern.

Im Kapitel 5.9 wird bereits auf die Notwendigkeit der Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für das in dieser Arbeit entwickelte Prüf- und Auswertungsverfahren hingewiesen und es werden konkrete Hinweise zur möglichen Zusammensetzung des Probenfeldes gegeben. Da das hier entwickelte Prüfverfahren im Vergleich zu den genormten Methoden wesentlich verfeinerte Aussagen zulässt und somit ein besseres Instrument für die anforderungsgerechte Auswahl von Bitumenemulsionen zur Verfügung stellt, erscheint es wünschenswert, dieses Prüfverfahren auch in der künftigen Normung zu verankern. Die Schaffung eines statistisch abgesicherten und möglichst allgemeingültigen Bewertungshintergrundes ist dafür unumgänglich.

Künftige Arbeiten zum Thema Schadstoffimmobilisierung durch Bitumenemulsionen sollten nach Möglichkeit mit PAK- bzw. Phenol-dotiertem Mischgut stattfinden. Nur diese Vorgehensweise sichert die Gleichmäßigkeit des Gesamtgehaltes an PAK und Phenol in allen verwendeten Proben ab. Im Kapitel 6.6 sind zwei denkbare Varianten der

Probenherstellung aufgezeigt. Von besonderem Interesse wären sowohl die zeitliche Entwicklung der Einkapselung von PAK und Phenol als auch die sichere Klärung der Zusammenhänge mit kompositionellen Merkmalen der Bitumenemulsionen. Die Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der Schadstoffimmobilisierung ist die logische Fortführung der vorliegenden Arbeit, in welcher die Wirkweise von Bitumenemulsionen bei der Einkapselung von PAK und Phenol grundsätzlich geklärt wurde. Von entscheidender Bedeutung für die umweltgerechte Wiederverwertung pechhaltiger Straßenausbaustoffe ist jedoch neben der generellen Wirksamkeit auch die Dauerhaftigkeit der Einkapselung.

Unbedingt notwendig erscheint es außerdem, in weiteren Arbeiten nach einem Laborverdichtungsverfahren zu suchen, mit dem Emulsionsmischgut praxisnah verdichtet werden kann (langsame, walkende Verdichtung). Vor diesem Hintergrund sollte in einem ersten Schritt versucht werden, Emulsionsmischgut im Gyrator zu verdichten, weil dieser die o. g. Randbedingungen von allen existierenden Verdichtungsverfahren theoretisch am besten simulieren kann. Ziel dieser Arbeit müsste es unter anderem sein, praxisnah verdichtete Laborprobekörper herzustellen, bei denen die Verwendung eines Größtkorns von 31,5 mm unproblematisch ist. Die Korngröße von 31,5 mm ist die größte in Tragschichten einsetzbare Korngröße und tritt insbesondere bei pechhaltigen Straßenausbaustoffen historisch bedingt (Makadam-Bauweise) relativ häufig auf. Nach Entwicklung oder Auswahl eines verbesserten Laborverdichtungsverfahrens kann dann die offen gebliebene Frage nach der Wirkung einer bautechnischen Optimierung pechhaltiger Ausbaustoffe geklärt werden.

Quellenverzeichnis

- [1] Norm DIN 1996-7 Dezember 1992. *Prüfung von Asphalt; Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad*
- [2] Norm DIN 18127 November 1997. *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch*
- [3] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (Hrsg.): *EPA Method 610 - Polynuclear Aromatic Hydrocarbons*. Dezember 1996
- [4] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Prüfung von Straßenausbaumaterial auf carbostämmige Bindemittel - Quantitative Bestimmung*. 2004. Köln, 2004. - FGSV-Nr. AP 27/3
- [5] Norm DIN 1996-11 Juli 1981. *Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete; Bestimmung von Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert*
- [6] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *TP Min-StB - Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau : Teil 7.1.2 Trogverfahren*. Ausgabe 1999. Köln, 1999. - FGSV-Nr. 610
- [7] Norm DIN 38409-16 Juni 1984. *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung des Phenol-Index (H 16)*
- [8] Norm DIN 52047-1 Dezember 1980. *Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Brechverhaltens von Emulsionen, Unstabile kationische Bitumenemulsionen*
- [9] Norm DIN 52048 Dezember 1980. *Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Wassergehaltes bituminöser Emulsionen; Destillationsverfahren*
- [10] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Merkblatt für die Verwertung von pechhaltigen Straßenausbaustoffen und von Asphaltgranulat in bitumengebundenen Tragschichten durch Kaltaufbereitung in Mischanlagen M VB-K*. Ausgabe 2007. Köln : FGSV Verlag, 2007. - FGSV-Nr. 755. - ISBN 978-3-939715-36-8
- [11] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen*. Ausgabe 2001. Köln : FGSV Verlag, 2001. - FGSV-Nr. 499

- [12] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Richtlinien für die umweltverträgliche Wiederverwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau RuVA-StB 01*. Ausgabe 2001 – Fassung 2005. Köln : FGSV Verlag, 2005. – FGSV-Nr. 795
- [13] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *TL PmB – Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen*. Ausgabe 2001. Köln, 2001. – FGSV-Nr. 748
- [14] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *TL PmOB – Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bindemittel für Oberflächenbehandlungen (mit bitumenhaltigen Bindemitteln)*. Ausgabe 1997. Köln, 1992. – FGSV-Nr. 753
- [15] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau*. Ausgabe 1995 – Fassung 2002. Köln : FGSV Verlag, 2002. – FGSV-Nr. 999
- [16] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.): *Wasserwirtschaftliche Beurteilung der Lagerung, Aufbereitung und Verwertung von bituminösem Straßenaufbruch (Ausbauasphalt und pechhaltiger Straßenaufbruch)*. 2001-03-20. – Merkblatt Nr. 3.4/1
- [17] *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen KrW-/AbfG*. (v. 1994-09-27)
- [18] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Begriffsbestimmungen – Teil: Straßenbautechnik*. Ausgabe 2003. Köln : FGSV Verlag, 2003. – ISBN 3-937356-10-X
- [19] Norm DIN 1995-1 Oktober 1989. *Bitumen und Steinkohlenteerpech, Anforderungen an die Bindemittel, Straßenbaubitumen*
- [20] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (Hrsg.): *MAK- und BAT-Werte-Liste 2005*. Weinheim : Wiley-VCH, 2005. – ISBN 3-527-31356-7
- [21] BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN (Hrsg.): *Technische Regeln für Gefahrstoffe: Teer und andere Pyrolyseprodukte aus organischem Material : TRGS 551*. 2003. – Bundesarbeitsblatt Nr. 7-8/199
- [22] EHLERS, E.-H.: Umweltschutz im Straßenbau – Beurteilung teerhaltiger Ausbaumaterialien. In: *Ost-Westeuropäischer Straßenkongress Warschau*, 1993

- [23] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Erläuterungen zu den Richtlinien für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauphalt im Straßenbau*. Ausgabe 2001 – Fassung 2005. Köln : FGSV Verlag, 2005. – FGSV-Nr. 795/1
- [24] STENZ, G.: *Orientierende Erkundungen zur ubiquitären Belastung von Böden mit Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK)*. Tübingen, Eberhard Karls Universität, Fakultät für Chemie und Pharmazie, Diplomarbeit, 1997
- [25] RUMP, H.-H. ; SCHOLZ, B.: *Untersuchung von Abfällen, Reststoffen und Altlasten: Praktische Anleitung für chemische, physikalische und biologische Methoden*. Weinheim : Wiley-VCH, 1995. – ISBN 3-527-28754-X
- [26] LOYEK, D. ; EBERHARD KARLS UNIVERSITÄT TÜBINGEN, INSTITUT FÜR GEOLOGIE UND PALÄONTOLOGIE, LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (Hrsg.): *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA)*. Bd. C44: *Die Löslichkeit und Lösungskinetik von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) aus der Teerphase*. 1998
- [27] BJØRSETH, A.: *Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. New York : Marcel Dekker Inc., 1983. – ISBN 0824718453
- [28] SIMS, R. C. ; OVERCASH, M. R.: *Residue Reviews*. Bd. 88: *Fate of Polynuclear Aromatic Compounds (PNAs) in Soil-Plant Systems*. New York : Springer Verlag, 1983
- [29] EUROPÄISCHE UNION (Hrsg.): *Richtlinie 67/548/EWG des Rates vom 27. Juni 1967 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe*. 2004
- [30] OLTMANN, J. ; HASSAUER, M. ; SCHNEIDER, K. ; KALBERLAH, F. ; LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): *Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung*. Bd. 14/94: *Kompendium Stoffdatenblätter, Zusammenstellung spezifischer Kenndaten zu altlastentypischen Substanzen*. 1994. ISSN 0944-3304
- [31] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.): *Umwelt-Lexikon*. <http://www.stmugv.bayern.de/de/service/lexikon/pq.htm>. – Online-Ressource, Abruf: 2005-10-26
- [32] KRASS, K. ; ROHLER, M. ; RADENBERG, M.: *Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für PAK- und Phenolauflösung im Trogverfahren / Ruhr-Universität Bochum, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau*. 2001 (12.0205.10). – Forschungsbericht. Teilvorhaben 1 Teil B des BMBF-Verbundvorhabens „Reststoffverwertung im Straßenbau“

- [33] GLET, W.: Nachweis von PAK in Straßenausbaumaterial mit dem Sublimierverfahren. In: *Bitumen* 60 (1998), Nr. 1, S. 18-21
- [34] WIKIMEDIA FOUNDATION INCORPORATED (Hrsg.): *Naphthalin - Wikipedia*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Naphthalin>. - Online-Ressource, Abruf: 2005-11-21
- [35] KOCH, Boris: *Einführung in die Organische Chemie; VII Sauerstoff-Verbindungen; Alkohole, Phenole, Ether*. Bremerhaven : Hochschule. - Losebl.-Ausg., Stand: 2005-07-05
- [36] WIKIMEDIA FOUNDATION INCORPORATED (Hrsg.): *Phenole - Wikipedia*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Phenole>. - Online-Ressource, Abruf: 2005-10-25
- [37] HEIMER, K.: Schnellverfahren zur Ermittlung von phenolhaltigen Verbindungen in Straßenbaumaterial / STB Prüfinstitut für Baustoffe und Umwelt GmbH. 1998 (FE 146 1035). - Forschungsbericht. Teilvorhaben 1 Teil C des BMBF-Verbundvorhabens „Reststoffverwertung im Straßenbau“
- [38] GLET, W.: Das Eluierverhalten von Phenolen aus teerhaltigem Straßenaufbruch. In: *Bitumen* 53 (1991), Nr. 4, S. 154 ff.
- [39] GATTERMANN, L. ; WIELAND, H. ; WIELAND, T. ; SUCROW, W.: *Die Praxis des organischen Chemikers*. 43. Auflage. Berlin : Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 1982. - ISBN 3110066548
- [40] WITTING, B.: Qualitativer Nachweis carbostämmiger Bindemittel in Baustoffen. In: *Bitumen* 57 (1995), Nr. 2, S. 81 ff.
- [41] FRANKE, H.-J. ; PÄTZOLD, H.: Neuere Erkenntnisse bei der Verfestigung teerhaltiger Ausbaustoffe für hydraulisch gebundene Tragschichten. In: FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (Hrsg.): *Betonstraßentagung 1991*. Köln : FGSV-Verlag, 1991 (Schriftenreihe der Arbeitsgruppe „Betonstraßen“ der FGSV Heft 20), S. 46 ff.. - FGSV-Nr. B 20
- [42] METZ, G.: *Kaltrecycling in situ - Untersuchung und Auswertung sächsischer Erprobungsstrecken : Band 1 Untersuchungsbericht*. Dresden, Technische Universität, Lehrstuhl Straßenbau, Praktikumsbericht, 1998
- [43] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (Hrsg.): *Prüfung von Straßenausbaumaterial auf carbostämmige Bindemittel - Schnellverfahren*. Ausgabe 2001. Köln, 2001. - FGSV-Nr. AP 27/2
- [44] WÖRNER, Th. ; FAULSTICH, M. ; METZ, G. ; SCHIEDER, D.: Wiederverwertung pechhaltiger Straßenausbaustoffe mit Bitumenemulsion / Technische Universität München,

- Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung. 2005 (F 5009). – Forschungsbericht. BayFORREST-Projekt F 189; Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
- [45] WICHERT, B.: Qualitativer und halbquantitativer Nachweis von Pechanteilen in Bindemitteln und Ausbaustoffen des Straßenbaus. In: *Bitumen* 59 (1997), Nr. 1, S. 29-32
- [46] SCHÜTZ, W. ; GÖDDECKE, C. ; TEKATH, S. ; GROTHUSEN, H.-D.: Nachweis und Bewertung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in teerhaltigen Straßenbefestigungen durch standardisierte HPLC. In: *Bitumen* 55 (1993), Nr. 4, S. 163-172
- [47] ZANDER, M.: *Polycyclische Aromaten*. Stuttgart : B.G. Teubner Verlag, 1995. – ISBN 3519035375
- [48] LEE, M. L. ; NOVOTNY, M. V. ; BARTLE, K. D.: *Analytical Chemistry of Polycyclic Aromatic Compounds*. New York : Academic Press, 1981
- [49] Norm DIN 38414-4 Oktober 1984. *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser, Abwasser und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4)*
- [50] OBERMANN, P. ; CREMER, S. ; LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.): *Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden und Deponien: Entwicklung eines aussagekräftigen Elutionsverfahrens*. Bd. 6. 1992
- [51] CIUPE, R. ; FUHSE, M. ; HADERS, J.: Ein Indikator für Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. In: *GIT Labor-Fachzeitschrift* 46 (2002), Nr. 11, S. 1270 f.
- [52] PORTMANN INSTRUMENTS AG (Hrsg.): *Elektronische Nase zur Teerbestimmung in Strassenbelägen*. Biel-Benken (Schweiz) : Firmenprospekt, Januar 2005
- [53] WIKIMEDIA FOUNDATION INCORPORATED (Hrsg.): *Emulsion – Wikipedia*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Emulsion>. – Online-Ressource, Abruf: 2005-11-25
- [54] HOLL, A.: *Bitumen-Emulsionen in Straßenerhalt und Straßenbau*. 2., neubearbeitete Auflage. Fachverband für Bitumenemulsionen und Straßenerhaltungsbauweisen e. V., 2004
- [55] WIKIMEDIA FOUNDATION INCORPORATED (Hrsg.): *Tenside – Wikipedia*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Tenside>. – Online-Ressource, Abruf: 2005-11-25
- [56] BLEIER, J. ; LENHARD, S. ; STAMM, J. v.: Bitumenemulsionen und ihre Teilchenvergrößerung. In: *Bitumen* 61 (1999), Nr. 1, S. 9-18

- [57] BLEIER, J.: *Kaltrecycling-Technologie mit Bitumenemulsion-Zementstabilisierung*. Januar 2002. – Vortragskonzept für die Tagung »Kaltrecycling« der Firma »Egli Kaltverfahren GmbH« am 24.01.2002 in Jungholz
- [58] Norm DIN EN 13808 Juli 2005. *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Rahmenwerk für die Spezifizierung kationischer Bitumenemulsionen*
- [59] Norm DIN 1995-3 Oktober 1989. *Bitumen und Steinkohlenteerpech, Anforderungen an die Bindemittel, Bitumenemulsionen*
- [60] HOLL, A.: *Bitumen-Emulsionen in Straßenerhalt und Straßenbau*. Juni 2002. – Entwurfsfassung
- [61] GLET, W.: *Kaltverfahren zur Wiederverwendung teerhaltiger Ausbaustoffe*. 1992. – Manuskript zum Vortrag auf dem dav-Seminar in Willingen
- [62] Norm DIN 52047-2 Dezember 1980. *Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Brechverhaltens von Emulsionen, Unstabile anionische Bitumenemulsionen*
- [63] Norm DIN EN 13075-1 Oktober 2002. *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Brechverhaltens - Teil 1: Bestimmung des Brechwertes kationischer Bitumenemulsionen, Verfahren mit Feinmineralstoff*
- [64] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (Hrsg.): *Merkblatt für die Wiederverwendung pechhaltiger Stoffe im Straßenbau unter Verwendung von Bitumenemulsionen*. Ausgabe 1993. Köln : FGSV Verlag, 1993. – FGSV-Nr. 755
- [65] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (Hrsg.): *Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau M KRC*. Ausgabe 2005. Köln : FGSV Verlag, 2005. – FGSV-Nr. 636. – ISBN 3-937356-59-2
- [66] HOLL, A.: Eignungsprüfung von Kalt-Recycling-Massen für Straßenbefestigungen. In: *Bitumen* 53 (1991), Nr. 1, S. 12 ff.
- [67] GLET, W. ; KRASS, K. ; RADENBERG, M.: Erprobung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von emulsionsgebundenem Mischgut. In: *Straße und Autobahn* 43 (1992), Nr. 9, S. 546 ff.
- [68] ROSSBERG, Konrad ; LANGHAMMER, Lutz: Untersuchungen zur Verdichtung von emulsionsgebundenen Asphalt-Schotter-Gemischen im Kaltrecycling. In: *Bitumen* 56 (1994), Nr. 2, S. 54 ff.
- [69] MINISTÈRE DE L'URBANISME, DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS (Hrsg.): *Essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés: Essai Duriez LPC : Méthode N° 14*. Paris, 1979. – deutsche Übersetzung

- [70] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (Hrsg.): *Merkblatt für die Verwertung von Asphaltgranulat und pechhaltigen Straßenausbaustoffen in Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln*. Ausgabe 2002. Köln : FGSV Verlag, 2002. – FGSV-Nr. 826
- [71] GLET, W. ; RODE, F.: Die Wiederverwendung von Ausbaupasphalten durch Bindung mit Bitumenemulsionen. In: *Bitumen* 51 (1989), Nr. 2, S. 65 ff.
- [72] KOLL, R.-J.: Wiederverwendung pechhaltiger Straßenausbaustoffe – ein Beispiel aus der Praxis. In: *Bitumen* 57 (1995), Nr. 3, S. 109 ff.
- [73] KUHLE, O.: Wiederverwendung von pechhaltigen Ausbaustoffen durch Einbindung mit hydraulischen Bindemitteln. In: *Straße und Autobahn* 47 (1996), Nr. 10, S. 593 ff.. – ISSN 0039-2219
- [74] RECHENBERG, W. ; SPANKA, G. ; THIELEN, G.: Einbinden organischer Schadstoffe durch Zementverfestigung. In: *Beton* 43 (1993), Nr. 2 und 3, S. 72-76 und 122-125
- [75] LEWE, H. ; WITTING, B.: Probleme mit teerhaltigem Straßenaufbruchmaterial. In: *Straße und Autobahn* 40 (1989), Nr. 11, S. 426 ff.
- [76] ROSENBERG, R. ; TAPPERT, A.: Grundsätze der Beurteilung und praktische Einsatzmöglichkeiten von pechhaltigem Straßenbaumaterial. In: *Straße und Autobahn* 43 (1992), Nr. 11, S. 719 ff.
- [77] LANGHAMMER, L.: *Stoffliche und konstruktive Untersuchungen zum Kaltrecycling für Tragschichten*. Dresden, Technische Universität, Lehrstuhl Straßenbau, Diss., 1998
- [78] METZ, G.: *Einfluss der Bindemittelprovenienz auf mechanische Eigenschaften von Asphalt*. Dresden, Technische Universität, Lehrstuhl Straßenbau, Diplomarbeit, Dezember 1999
- [79] WIRTGEN GMBH: Wirtschaftliche Herstellung von Kaltmischgütern mit Schaumbitumen. In: *asphalt* 33 (1998), Nr. 5, S. 28 ff.. – ISSN 0945-6228
- [80] WÖRNER, Th. ; METZ, G.: Veränderung der Eigenschaften von polymermodifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt / Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung. 2004 (F 5011). – Forschungsbericht. BAST-Projekt FE 07.199/2002/BGB; Bundesanstalt für Straßenwesen

Stichwortverzeichnis

- A**
Ausbaustoffe *siehe* pechhaltige Ausbaustoffe
 untersuchte *siehe* pechhaltige Ausbaustoffe, untersuchte
- B**
bautechnische Optimierung *siehe* pechhaltige Ausbaustoffe, bautechnische Optimierung
Bitumen.....5, 10
 Kolloidsystem..... 77
 PAK-Gehalt.....5f
 Phenolgehalt.....5f
bitumendominant.....38
Bitumenemulsionen
 amphotere.....20, 22
 anionische .. 20, 22, 45, 75, 78, 107, 131, 133, 135
 Arten.....20
 Emulgatoren.....20, 23, 78
 Herstellung..... 20f
 kationische ..20, 22f, 29, 35, 41, 45, 60, 64, 75, 107
 nichtionische 20, 22
 Partikelgrößen.....22
 Typen.....62, 65
 untersuchte . 45, 52, 73, 89, 95, 114
 Wirksamkeit . 42, 56, 75-79, 87, 89, 103f, 107, 109, 119, 132, 137f
bituminöse Bindemittel..... 5
Braunkohlenteer 5
Brechverhalten3, 24, 29, 41, 57, 61, 131
 Auswertungsbereich..... 57
 Differenzkurve 55-60
 Erweiterte Untersuchung 55-63
 Normprüfung.....25f
 optimierter Auswertungsbereich 59
 praktische Bedeutung 63f, 131
 Quarzmehlanspruch 25, 61f
 Quarzmehlzugabe.....48, 52, 61
 Stoffgesetz 58, 131
 Parameter 59, 131
 Typen.....62, 65
 Versuchsaufbau 49
Brechvorgang 23f
- C**
Carbobitumen.....15f, 46, 88
 Pechgehalt 15
- D**
Doppelkolbenprinzip 32f, 91
Downcycling 3
- E**
elektrochemische Doppelschicht.....20
Elutionsverfahren
 DEV S4 19
 pH-stat-Verfahren..... 19
 Trojelution..... 19, 44
Emulsionen
 Öl-in-Wasser.....20
 Wasser-in-Öl.....20
Emulsionsbitumen.....20
Emulsionsmischgut
 Bitumenzugabemenge ... 70-73, 89, 95, 114, 133
 Herstellung 73, 79, 91, 95, 114, 131

- Mixed-in-place..... 63, 65
Mixed-in-plant..... 63, 65
optimaler Wassergehalt..... 30
Verdichtung 91
nach Duriez [69] 32
nach Glett, Krass, Radenberg [67]
33
nach TU München..... 33, 91
- F**
Fünf-Stufen-Modell . 29, 31, 56, 63f, 131
- G**
GC/MS *siehe* PAK, Analytik
- H**
Haftverbesserer *siehe* Haftvermittler
Haftvermittler 96, 106f, 128
Hochtemperaturteer 5
Hohlraumgehalt *siehe* Probekörper,
Hohlraumgehalt
hydraulisch dominant 38
- I**
ideelle Schichtdicke ... 70ff, 75, 78, 132
- K**
Kaltrecycling
in situ 38
mit Bitumenemulsion 28-35
mit hydraulischem Bindemittel 35ff
mit hydraulischem Bindemittel und
Bitumenemulsion 37-40
mit Schaumbitumen 40
Verfahren 26
Kolloidmühle 21
Komplexbindung 37f
Komplexrecycling 37
-bauweise 39
-mischgut 37, 39
Korngrößenverteilung 16
Granulat B 85
Granulat C 86
- Granulat S 85
Teersand T 86
- L**
Luft-/Wasserlagerung 33f, 91
Luftlagerung 33f, 91
- M**
Marshall-Fließwert ... *siehe* Probekörper,
Marshall-Fließwert
Marshall-Stabilität ... *siehe* Probekörper,
Marshall-Stabilität
- P**
PAK 6-11
Analytik 17ff, 44
Analysefehler 76f
Diffusion 10, 77, 80
Feststoffgehalt 17, 27, 87, 112f, 195
von Bitumen 6
von Pechbitumen 6
von Teer 6
Immobilisierung 3, 34,
36, 67f, 74f, 77f, 94, 103, 107f,
120, 128, 131ff
Modellversuche ... 41f, 67-80, 94,
103, 107f, 119, 131, 133
zeitlicher Verlauf 79
Immobilisierungsrate 3, 76, 79, 103,
108, 128, 132f
Konzentration im Eluat 10, 27,
36, 39, 42, 68, 74ff, 84-89, 92ff,
100-104, 107, 112-125, 129,
132f, 188-210
Löslichkeit *siehe* PAK,
Wasserlöslichkeit
Solubilisierung 10, 78
Struktur 7f
Sublimation 10f, 18, 67, 79
Wasserlöslichkeit 8ff
Wirkung 8f

- fruchtbarkeits-
 beeinträchtigende.....8f
 gesundheitsschädliche.....8f
 karzinogene.....8f
 mutagene.....8f
 ökotoxikologische.....8f
 Pech.....5f, 10
 Aufkommen in Deutschland....14f
 Nachweis.....*siehe* Teer, Nachweis
 pechhaltige Ausbaustoffe 14-19, 45, 81
 Arten.....16
 Ausgangszustand.....81ff
 bautechnische Aufbereitung....43,
 109f, 127
 bautechnische Optimierung.3, 126,
 134, 138
 Heißaufbereitung (Verbot)...11, 14
 Kaltaufbereitung.....*siehe*
 Kaltrecycling, Verfahren
 untersuchte.....45, 81ff
 Verwertungsklassen.....26f, 112
 Verwertungsverfahren.....26f
 Kaltrecyclingverfahren.....*siehe*
 Kaltrecycling, Verfahren
 Vorkommen.....14f
 pechhaltige Emulsion.....68f
 pechhaltiges Labormischgut.....69
 Anforderungen.....67
 Herstellung.....68f
 PAK-Konzentrationen.....201-210
 Phenolindizes.....74
 Phenole.....11-14
 Analytik.....17f, 44
 Feststoffgehalt
 von Bitumen.....6
 von Pechbitumen.....6
 von Teer.....6
 Immobilisierung..3, 14, 34, 36, 92,
 104, 106f, 128, 133
 Index im Eluat.....11, 18, 27, 35f,
 42, 74, 84-89, 92, 94, 100-107,
 112f, 115, 118, 120, 122, 129,
 132f, 188-210
 Löslichkeit.....*siehe* Phenole,
 Wasserlöslichkeit
 Solubilisierung.....36, 39
 Struktur.....11ff
 Wasserlöslichkeit 13f, 36, 105, 107,
 133
 Wirkung.....11ff
 ätzende.....12f
 gesundheitsschädliche.....12f
 karzinogene.....13
 mutagene.....12f
 ökotoxikologische.....12f
 reizende.....12f
 toxische.....12f
 Polyzyklische aromatische Kohlenwas-
 serstoffe.....*siehe*
 PAK
 Probekörper
 Bezeichnung.....91, 115
 Herstellung.....89ff, 114
 Hohlraumgehalt.....34, 42, 84,
 89, 92-100, 106, 109, 115-126,
 134, 177-186
 Lagerung.....89ff, 114
 Marshall-Fließwert.33f, 42f, 92, 95,
 115, 182-186
 Marshall-Stabilität.33f, 42f, 84, 89,
 91-99, 106, 109, 115-125, 127f,
 134, 180-186
Q
 Quarzmehlanspruch.*siehe* Brechverhal-
 ten, Quarzmehlanspruch
 Quarzmehlzugabe *siehe* Brechverhalten,
 Quarzmehlzugabe
R
 Recyclingemulsionen.....22, 31, 44, 73

S

Schadstoffimmobilisierung..28, 35, 39f,
63, 70, 94f, 118, 131ff, 137
zeitlicher Verlauf 138
Schwelteer 5
Steinkohlenteer.....5
Straßenteerspezialpech 5, 14
Stückgrößenverteilung.....16
Ausbaustoff Bo.....111
Ausbaustoff So.....111
Ausbaustoff To 111
Granulat B..... 85
Granulat C.....86
Granulat S..... 85
Teersand T 86

T

Teer 5f, 10
Geruch.....10
Nachweis.....17ff
Geruchsprobe 17
Teerglanz.....17
PAK-Gehalt.....5f
Phenolgehalt 5f
Teerpech..... 5
Teersand 16
Bauweise mit 16
Korngrößenverteilung.....86
Stückgrößenverteilung 86
untersuchter 46, 81, 83
Vorkommen 16
Tenside.....10, 20, 23, 78
amphotere.....20
anionische..... 20
kationische 20
nichtionische 20
solubilisierende Wirkung 10, 78

U

Untersuchungsprogramm 41-45

V

Verwertungsklassen .. *siehe* pechhaltige
Ausbaustoffe, Verwertungsklas-
sen
Verwertungsverfahren *siehe*
pechhaltige Ausbaustoffe, Ver-
wertungsverfahren

W

Wiederverwertung .. *siehe* Kaltrecycling,
Verfahren

Anhang A

Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Bitumenemulsionen

Tabelle A.1: Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Emulsionen Nr. 1, 4 und 7

Emulsion	Nr.	1	1	4	4	7	7
Charge	Nr.	1	2	1	2	1	2
Hersteller		a	a	c	c	e	e
Menge	kg	20	5	4 x 5	2 x 5	3 x 2	12
Abfülldatum	—	2002-10-16	2005-03-14	2002-11-05	2005-02-09	2003-01-20	2004-10-19
Lieferdatum	—	2002-10-18	2005-03-17	2002-11-08	2005-02-17	2003-01-31	2004-10-20
Zustand	—	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
Äußere Beschaffenh.	—	DIN 52002	br, fl, ho, KB	br, fl, ho, KB	sw, fl, ho, KB	sw, fl, ho, KB	br, fl, ho, KB
Ladungsart	—	DIN 52044	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch
WE	M.-%	DIN 52048	39,5	39,3	33,3	33,7	35,1
EP RuK	°C	DIN 52011	41,3	45,1	39,3	38,5	45
BP Fvaafß	°C	DIN 52012	-17,5	-20,5	-17,5	-14	-12
t _a	s	DIN 52023	10	8	15	10	9
QMA(DIN)	g	DIN 52047	289	270	118	194	270
Veränderungen nach thermischer Beanspruchung entsprechend DIN 52018							
EP RuK	°C	DIN 52011	47,4	47,4	41,6	41,3	50
BP Fvaafß	°C	DIN 52012	-14	-19	-15	-17	-11
							53,5
							-13

br = braun, sw = schwarz, fl = flüssig, ho = homogen, KB = kein Bodensatz

Tabelle A.2: Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Emulsionen Nr. 2 und 8

Emulsion	Nr.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	8
Charge	Nr.	1	2	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	1
Hersteller		b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	f
Menge	kg	10	2 x 5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4 x 5
Abfülldatum	—	2002-10-15	2003-01-30	2005-02-03	2005-04-18	2005-04-18	2005-04-28	2005-04-01						
Lieferdatum	—	2002-10-22	2003-02-04	2005-02-08	2005-04-21	2005-04-21	2005-05-13	2003-04-03						
Zustand	—	gebrochen	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.						
Äußere														
Beschaffenh.	—	DIN 52002	br, df, B	br, df, ho, kB	br, fl, ho, kB									
Ladungsart	—	DIN 52044	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch						
<i>WE</i>	M.-%	DIN 52048	33,9	33,5	34,7	34,7	34,8	35,3						
<i>EP RuK</i>	°C	DIN 52011	49,6	47,1	50,6	—	—	36,0						
<i>BP Fraaß</i>	°C	DIN 52012	-18	-20	-18,5	—	—	-21						
<i>t_A</i>	s	DIN 52023	11	9	9	—	—	9						
<i>QMA(DIN)</i>	g	DIN 52047	251	225	238	—	—	—						
Veränderungen nach thermischer Beanspruchung entsprechend DIN 52018														
<i>EP RuK</i>	°C	DIN 52011	54,7	56,9	56,2	—	—	—						
<i>BP Fraaß</i>	°C	DIN 52012	-15	-15,5	-17,5	—	—	—						

br = braun, fl = flüssig, df = dickflüssig, ho = homogen, B = Bodensatz, kB = kein Bodensatz

Tabelle A.3: Ergebnisse der Eingangskontrollen an den Emulsionen Nr. 3 und 9

Emulsion	Nr.	3	3	3	9	9	9	
Charge	Nr.	1	2	3	1	2	3	
Hersteller		b	b	b	d	d	d	
Menge	kg	10	10	5	5	2	2	
Abfülldatum	—	2002-10-15	2002-01-30	2005-02-03	2003-04-28	2005-01-25	2005-04-05	
Lieferdatum	—	2002-10-22	2002-02-04	2005-02-08	2003-04-30	2005-01-28	2005-04-07	
Zustand	—	gebrochen	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	
Äußere Beschaffenh.	—	br, fl, ho, B	br, fl, ho, kB					
Ladungsart	—	kationisch	kationisch	kationisch	anionisch	anionisch	anionisch	
<i>W_E</i>	M.-%	39,1	37,6	38,9	39,5	38,7	43,9	
<i>EP Ruk</i>	°C	51	44,4	50,3	36,7	36,5	38,6	
<i>BP Fraaß</i>	°C	-15	-16,5	-15	-20	-18	-17,5	
<i>t_A</i>	s	9	9	8	8	8	7	
<i>QMA(DIN)</i>	g	307	315	334	—	—	15,5	
Veränderungen nach thermischer Beanspruchung entsprechend DIN 52018								
<i>EP Ruk</i>	°C	DIN 52011	55,4	48,6	55,1	39,1	—	42,3
<i>BP Fraaß</i>	°C	DIN 52012	-12	-15	-14	-17	—	-14

br = braun, sw = schwarz, fl = flüchtig, ho = homogen, kB = kein Bodensatz

Tabelle A.4: Ergebnisse der Eingangskontrollen an der Emulsion Nr. 5

Emulsion	Nr.	5	5	5	5	5	5
Charge	Nr.	1	2	3	4	5	5
Hersteller		d	d	d	d	d	d
Menge	kg	2 x 5	—	2 x 1	2	2,5	5
Abfülldatum	—	2002-12-03	—	2004-10-20	2005-02-07	2005-04-18	2005-05-02
Lieferdatum	—	2003-01-28	2003-09-04	2004-10-22	2005-02-24	2005-04-19	2005-05-04
Zustand	—	i.O.	i.O.	i.O.	Frostschaden	i.O.	i.O.
Äußere							
Beschaffenh.	—	DIN 52002	br, fl, ho, kB	br, fl, ho, kB	—	br, fl, ho, kB	br, fl, ho, kB
Ladungsart	—	DIN 52044	kationisch	kationisch	—	kationisch	kationisch
^{WE}	M.-%	DIN 52048	33,8	40,5	—	40,5	38,5
<i>EP RuK</i>	°C	DIN 52011	43,4	41,2	—	—	—
<i>BP Fraaß</i>	°C	DIN 52012	-16,5	-20,5	—	—	—
<i>t_A</i>	s	DIN 52023	9	9	—	—	—
<i>QMA(DIN)</i>	g	DIN 52047	260	231	—	—	—
Veränderungen nach thermischer Beanspruchung entsprechend DIN 52018							
<i>EP RuK</i>	°C	DIN 52011					
<i>BP Fraaß</i>	°C	DIN 52012					

br = braun, fl = flüssig, ho = homogen, kB = kein Bodensatz

Tabelle A.5: Ergebnisse der Eingangskontrollen an der Emulsion Nr. 6

Emulsion	Nr.	6	6	6	6	6	6	6
Charge	Nr.	1	2	3	4	5	6	6
Hersteller		d	d	d	d	d	d	d
Menge	kg	2	2	5	2	2 x 1	2	2
Abfülldatum	—	2002-11-12	2003-03	2003-04-28	—	2004-10-20	—	—
Lieferdatum	—	2002-11-26	2003-04-09	2003-04-30	2003-09-04	2004-10-22	2005-02-24	—
Zustand	—	gebrochen	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
Äußere Beschaffenh.	—	sw, kB, Kl	br, fl, ho, kB					
Ladungsart	—	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch
<i>W_E</i>	M.-%	35,6	38	38,3	38,4	41,4	40,6	40,6
<i>EP Ruk</i>	°C	41,4	39,4	37,9	39,1	40,5	40,2	40,2
<i>BP Fraaß</i>	°C	-22	-21	-22	—	-24	-26	-26
<i>t_A</i>	s	11	9,5	9	—	9	8	8
<i>QMA(DIN)</i>	g	155	—	—	—	206,5	223	223
Veränderungen nach thermischer Beanspruchung entsprechend DIN 52018								
<i>EP Ruk</i>	°C	50,1	—	39,9	—	—	46,3	—
<i>BP Fraaß</i>	°C	-18	—	-20	—	—	-22	-22

br = braun, sw = schwarz, fl = flüssig, ho = homogen, Kl = Klumpen, kB = kein Bodensatz

Tabelle A.6: Ergebnisse der Eingangskontrollen an der Emulsion Nr. 10

Emulsion	Nr.	10	10	10	10	10	10
Charge	Nr.	1	2	3	4	5	5
Hersteller		g	g	g	g	g	g
Menge	kg	2 x 1	2 x 1	2 x 1	2 x 1	5 x 1	5 x 1
Abfülldatum	—	2003-06-26	—	2004-10-26	2005-01-31	—	—
Lieferdatum	—	2003-07-04	2003-08-13	2004-11-02	2005-02-04	2005-04-26	—
Zustand	—	gebrochen	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
Äußere							
Beschaffenh.	—	br, fl, ho, kB					
Ladungsart	—	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch	kationisch
<i>WE</i>	M.-%	37,6	40,1	40,8	38,6	38,3	38,3
<i>EP RuK</i>	°C	51,5	46,5	51,1	47,2	—	—
<i>BP Fraaß</i>	°C	-14	-12	-13	-16	—	—
<i>t_A</i>	s	7	9	8	8	—	—
<i>QMA(DIN)</i>	g	240	200	249	240	—	—
Veränderungen nach thermischer Beanspruchung entsprechend DIN 52018							
<i>EP RuK</i>	°C	56	52,5	52,5	51,3	—	—
<i>BP Fraaß</i>	°C	-14	-12	-12	-14,5	—	—

br = braun, fl = flüssig, ho = homogen, kB = kein Bodensatz

Anhang B

Brechverhalten der kationischen Bitumenemulsionen

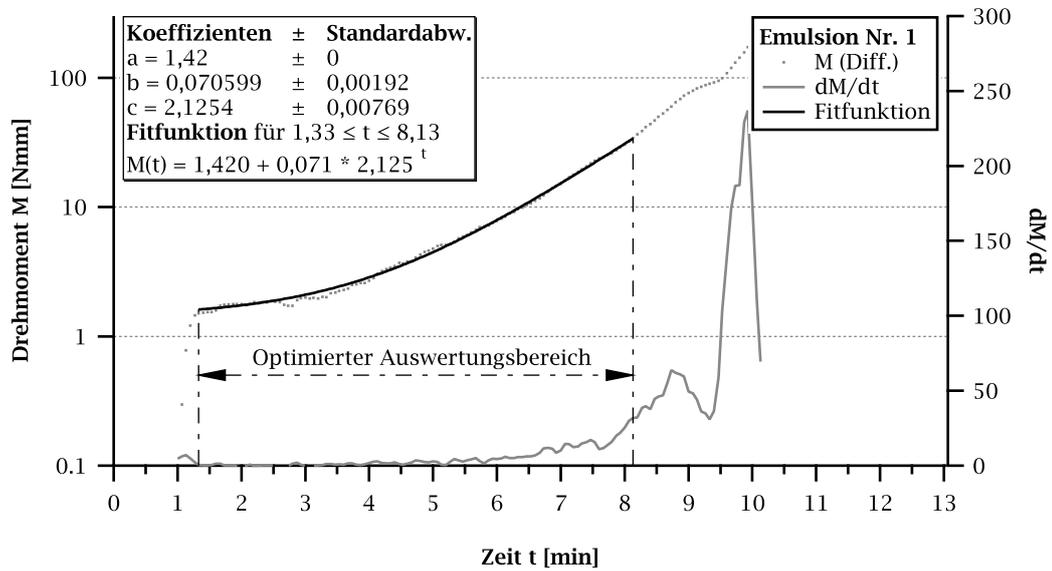


Abbildung B.1: Brechverhalten der Emulsion Nr. 1

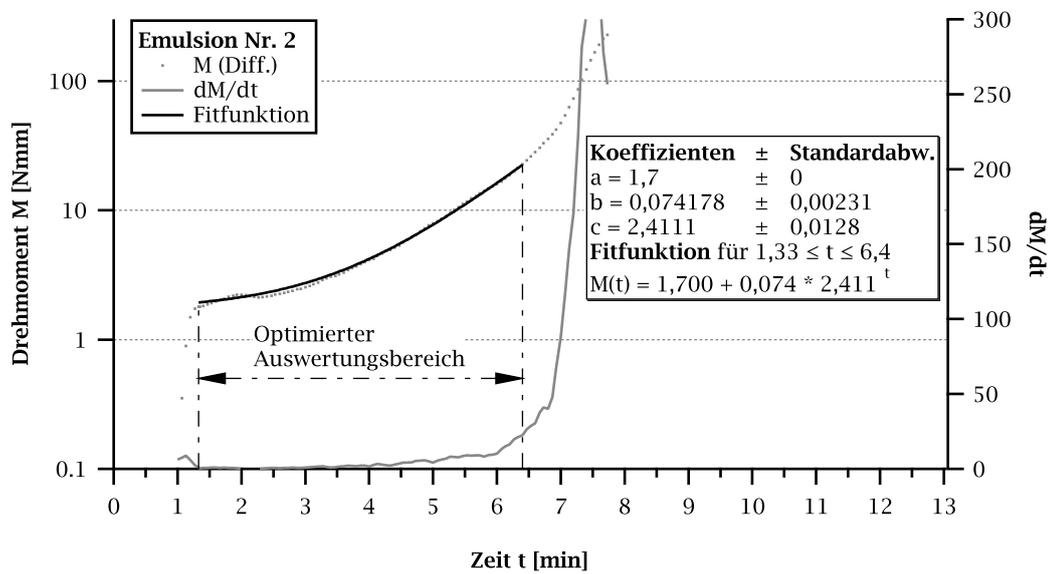


Abbildung B.2: Brechverhalten der Emulsion Nr. 2

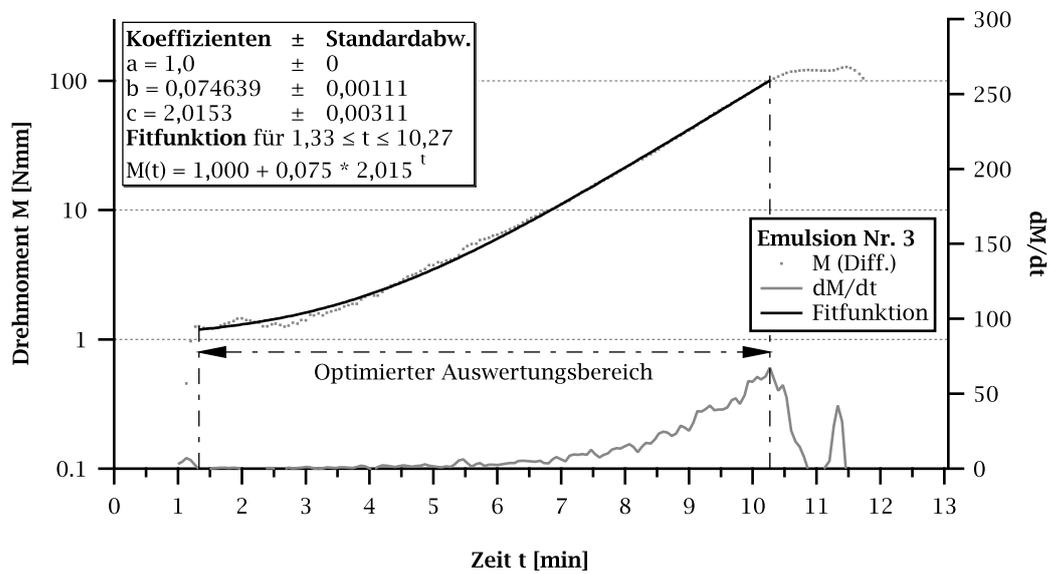


Abbildung B.3: Brechverhalten der Emulsion Nr. 3

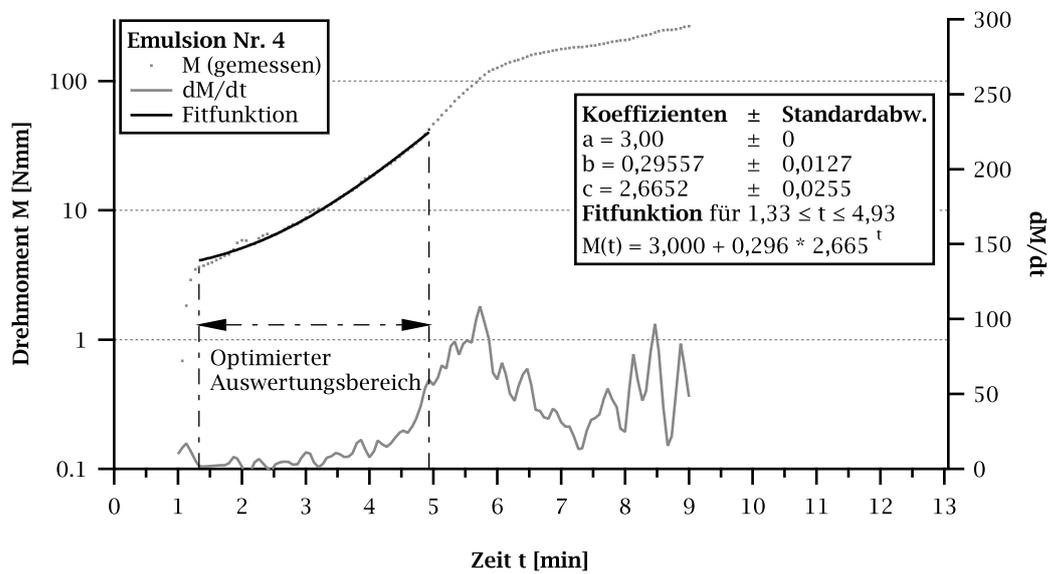


Abbildung B.4: Brechverhalten der Emulsion Nr. 4

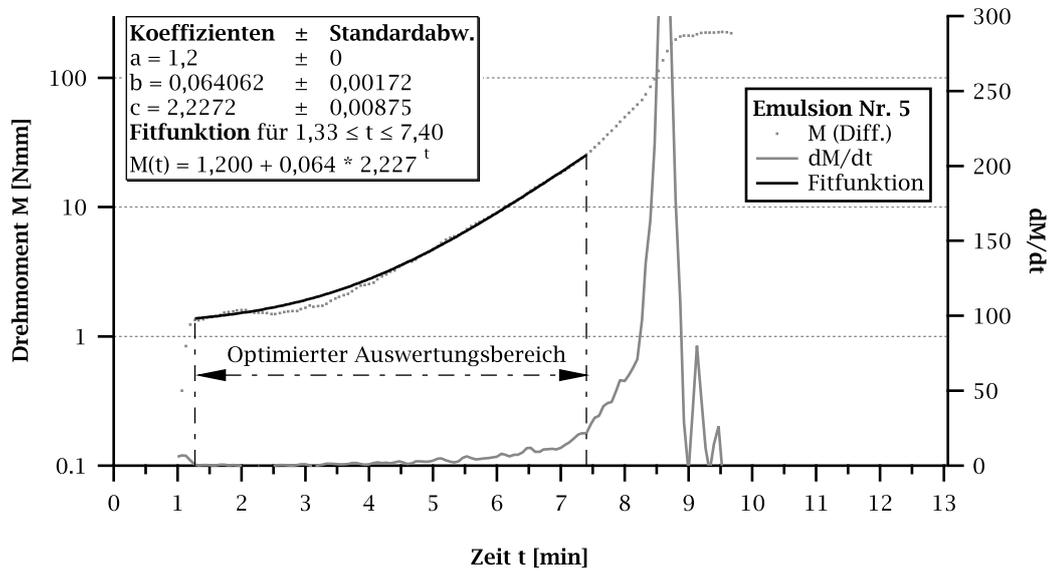


Abbildung B.5: Brechverhalten der Emulsion Nr. 5

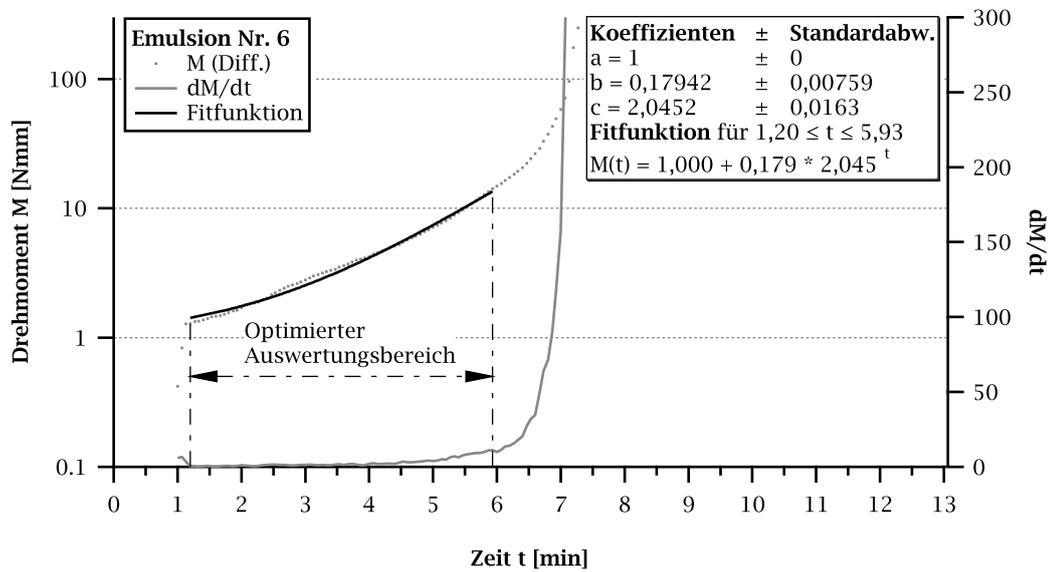


Abbildung B.6: Brechverhalten der Emulsion Nr. 6

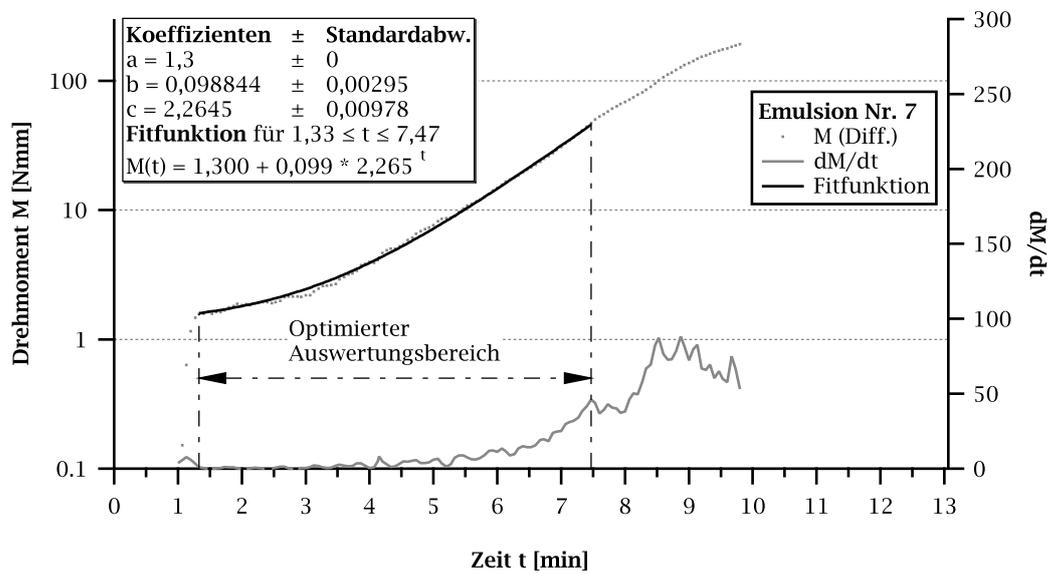


Abbildung B.7: Brechverhalten der Emulsion Nr. 7

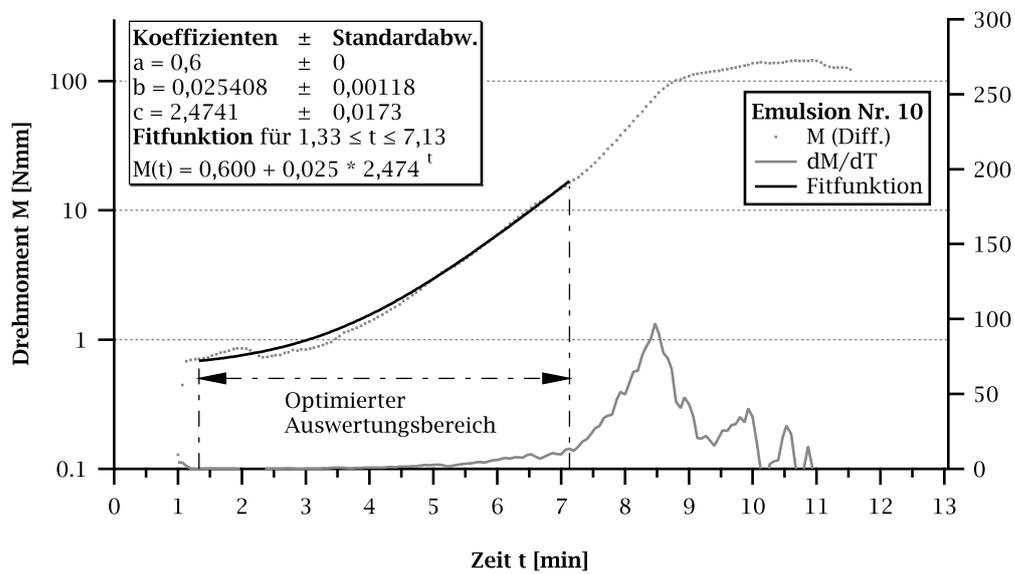


Abbildung B.8: Brechverhalten der Emulsion Nr. 10

Anhang C

Mischgutrezepturen

Tabelle C.1: Zur Umhüllung des pechhaltigen Labormischgutes mit Bitumenemulsion verwendete Rezepturen

Em	Nr.	1	1	2	2	3	3	4	4	5
Charge	Nr.	2	2	3	3	3	3	2	2	3
w_E	M.-%	60,8	60,8	65,3	65,3	61,1	61,1	66,3	66,3	59,5
B_Z	M.-%	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
E_Z	M.-%	0,82	0,82	0,77	0,77	0,82	0,82	0,75	0,75	0,84
phLMG	Nr.	14a	14b	11	15	10	15	11	16	7
B_Z	M.-%	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
E_Z	M.-%	1,23	1,23	1,15	1,15	1,23	1,23	1,13	1,13	1,26
phLMG	Nr.	14a	14b	11	15	10	15	11	16	7
B_Z	M.-%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E_Z	M.-%	1,65	1,65	1,53	1,53	1,64	1,64	1,51	1,51	1,68
phLMG	Nr.	14a	14b	11	15	10	15	11	16	7
B_Z	M.-%	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
E_Z	M.-%	2,06	2,06	1,91	1,91	2,05	2,05	1,89	1,89	2,10
phLMG	Nr.	14a	14b	11	15	10	15	11	16	7
Em	Nr.	5	6	6	7	7	9	9	10	10
Charge	Nr.	3	5	6	2	2	2	3	3	4
w_E	M.-%	59,5	58,6	59,4	58,7	58,7	61,3	61,3	59,2	61,4
B_Z	M.-%	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
E_Z	M.-%	0,84	0,85	0,84	0,85	0,85	0,82	0,89	0,84	0,81
phLMG	Nr.	12	9	13	9	13	10	16	8	12
B_Z	M.-%	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
E_Z	M.-%	1,26	1,28	1,26	1,28	1,28	1,22	1,34	1,27	1,22
phLMG	Nr.	12	9	13	9	13	10	16	8	12
B_Z	M.-%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
E_Z	M.-%	1,68	1,71	1,68	1,70	1,70	1,63	1,78	1,69	1,63
phLMG	Nr.	12	9	13	9	13	10	16	8	12
B_Z	M.-%	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
E_Z	M.-%	2,10	2,13	2,10	2,13	2,13	2,04	2,23	2,11	2,04
phLMG	Nr.	12	9	13	9	13	10	16	8	12

Tabella C.2: Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff S

Em	Nr.	1	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	9	10	10
Charge	Nr.	1	2	2	1	1	3	2	5	1	2	1	1	2	3
<i>w_E</i>	M.-%	39,5	33,5	37,6	33,3	33,8	40,5	38,0	41,4	35,1	41,3	35,3	39,5	40,1	40,8
<i>B_Z</i>	M.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<i>E_Z</i>	M.-%	2,5	2,3	2,4	2,2	2,3	2,5	2,4	2,6	2,3	2,6	2,3	2,5	2,5	2,5
<i>W_Z</i>	M.-%	1,0	0,8	0,9	0,7	0,8	1,0	0,9	1,1	0,8	1,1	0,8	1,0	1,0	1,0
<i>B_Z</i>	M.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
<i>E_Z</i>	M.-%	3,3	3,0	3,2	3,0	3,0	3,4	3,2	3,4	3,1	3,4	3,1	3,3	3,3	3,4
<i>W_Z</i>	M.-%	1,3	1,0	1,2	1,0	1,0	1,4	1,2	1,4	1,1	1,4	1,1	1,3	1,3	1,4
<i>B_Z</i>	M.-%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>E_Z</i>	M.-%	4,1	3,8	4,0	3,7	3,8	4,2	4,0	4,3	3,9	4,3	3,9	4,1	4,2	4,2
<i>W_Z</i>	M.-%	1,6	1,3	1,5	1,2	1,3	1,7	1,5	1,8	1,4	1,8	1,4	1,6	1,7	1,7

Tabelle C.3: Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff B

Em	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
Charge	Nr.	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	3
<i>WE</i>	M.-%	39,5	33,5	37,6	33,3	33,8	38,0	35,1	35,3	39,5	40,1	40,8
<i>Bz</i>	M.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<i>Ez</i>	M.-%	2,5	2,3	2,4	2,2	2,3	2,4	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5
<i>Wz</i>	M.-%	1,0	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
<i>Bz</i>	M.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
<i>Ez</i>	M.-%	3,3	3,0	3,2	3,0	3,0	3,2	3,1	3,1	3,3	3,3	3,4
<i>Wz</i>	M.-%	1,3	1,0	1,2	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,4
<i>Bz</i>	M.-%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>Ez</i>	M.-%	4,1	3,8	4,0	3,7	3,8	4,0	3,9	3,9	4,1	4,2	4,2
<i>Wz</i>	M.-%	1,6	1,3	1,5	1,2	1,3	1,5	1,4	1,4	1,6	1,7	1,7

Tabelle C.4: Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff C

Em	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
Charge	Nr.	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	3
<i>WE</i>	M.-%	39,5	33,5	37,6	33,3	33,8	38,0	35,1	35,3	39,5	40,1	40,8
<i>BZ</i>	M.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<i>EZ</i>	M.-%	2,5	2,3	2,4	2,2	2,3	2,4	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5
<i>WZ</i>	M.-%	1,0	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
<i>BZ</i>	M.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
<i>EZ</i>	M.-%	3,3	3,0	3,2	3,0	3,0	3,2	3,1	3,1	3,3	3,3	3,4
<i>WZ</i>	M.-%	1,3	1,0	1,2	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,4
<i>BZ</i>	M.-%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>EZ</i>	M.-%	4,1	3,8	4,0	3,7	3,8	4,0	3,9	3,9	4,1	4,2	4,2
<i>WZ</i>	M.-%	1,6	1,3	1,5	1,2	1,3	1,5	1,4	1,4	1,6	1,7	1,7

Tabelle C.5: Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit dem Ausbaustoff T

Em	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
Charge	Nr.	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	3
<i>WE</i>	M.-%	39,5	33,5	37,6	33,3	33,8	38,0	35,1	35,3	39,5	40,1	40,8
<i>Bz</i>	M.-%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>Ez</i>	M.-%	4,1	3,8	4,0	3,7	3,8	4,0	3,9	3,9	4,1	4,2	4,2
<i>Wz</i>	M.-%	1,6	1,3	1,5	1,2	1,3	1,5	1,4	1,4	1,6	1,7	1,7
<i>Bz</i>	M.-%	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
<i>Ez</i>	M.-%	5,0	4,5	4,8	4,5	4,5	4,8	4,6	4,6	5,0	5,0	5,1
<i>Wz</i>	M.-%	2,0	1,5	1,8	1,5	1,5	1,8	1,6	1,6	2,0	2,0	2,1
<i>Bz</i>	M.-%	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
<i>Ez</i>	M.-%	5,8	5,3	5,6	5,2	5,3	5,6	5,4	5,4	5,8	5,8	5,9
<i>Wz</i>	M.-%	2,3	1,8	2,1	1,7	1,8	2,1	1,9	1,9	2,3	2,3	2,4

Tabelle C.6: Zusammensetzungen der Mischgutvarianten mit den bautechnisch aufbereiteten pechhaltigen Ausbaustoffen So, Bo und To

phABS		So	So	So	Bo	Bo	Bo	To	To	To
Em	Nr.	2	5	10	2	5	10	2	5	10
Charge	Nr.	4	6	5	5	6	5	4	5	5
w_E	M.-%	34,7	38,5	38,3	34,8	38,5	38,3	34,7	40,5	38,3
B_Z	M.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	3,0	3,0	3,0
E_Z	M.-%	2,3	2,4	2,4	2,3	2,4	2,4	4,6	5,0	4,9
W_Z	M.-%	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	1,6	2,0	1,9
B_Z	M.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,5	3,5	3,5
E_Z	M.-%	3,1	3,2	3,2	3,1	3,2	3,2	5,4	5,9	5,7
W_Z	M.-%	1,1	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,9	2,4	2,2
B_Z	M.-%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4,5	4,5	4,5
E_Z	M.-%	3,8	4,1	4,1	3,8	4,1	4,1	6,1	6,7	6,5
W_Z	M.-%	1,3	1,6	1,6	1,3	1,6	1,6	2,1	2,7	2,5

Anhang D

Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen

Tabelle D.1: Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes S

Kornklasse	Siebdurchgang [M.-%]				
	SGV 1	SGV 2	SGV 3	SGV	KGV
≤ 0,09	1,2	0,9	0,7	0,9	4,2
0,09-0,25	3,6	2,2	2,1	2,6	10,1
0,25-0,71	10,1	7,0	7,2	8,1	19,8
0,71-2	24,0	19,1	19,8	20,9	34,2
2-5	48,0	41,2	38,8	42,7	56,8
5-8	61,6	56,9	53,1	57,2	72,4
8-11,2	73,2	68,2	62,3	67,9	81,7
11,2-16	83,0	80,8	72,2	78,7	89,7
16-22,4	89,8	89,9	82,8	87,5	94,6
22,4-31,5	96,9	94,2	93,6	94,9	100,1
31,5-45	100,0	100,0	100,0	100,0	—
45-56	—	—	—	—	—
56-63	—	—	—	—	—

Tabelle D.2: Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes B

Kornklasse	Siebdurchgang [M.-%]				
	SGV 1	SGV 2	SGV 3	SGV	KGV
≤ 0,09	1,1	1,5	0,9	1,2	4,8
0,09-0,25	2,8	4,8	2,6	3,4	8,9
0,25-0,71	6,6	11,9	6,4	8,3	15,8
0,71-2	14,0	24,0	14,0	17,3	24,5
2-5	23,7	42,0	27,1	30,9	37,3
5-8	34,9	56,0	38,6	43,2	48,2
8-11,2	46,1	70,0	51,1	55,7	57,4
11,2-16	61,3	81,2	62,9	68,5	68,5
16-22,4	76,9	92,3	76,0	81,7	82,5
22,4-31,5	97,4	100,0	97,9	98,4	97,5
31,5-45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
45-56	—	—	—	—	—
56-63	—	—	—	—	—

Tabelle D.3: Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes C

Kornklasse	Siebdurchgang [M.-%]				
	SGV 1	SGV 2	SGV 3	SGV	KGV
≤ 0,09	0,9	0,8	0,8	0,8	13,8
0,09-0,25	3,2	3,1	3,1	3,1	25,9
0,25-0,71	9,1	8,7	8,7	8,8	40,8
0,71-2	21,2	19,9	20,2	20,4	57,5
2-5	41,4	39,8	40,4	40,5	76,9
5-8	57,5	55,9	57,1	56,8	91,8
8-11,2	72,2	70,4	72,0	71,5	99,9
11,2-16	87,6	85,6	84,5	85,9	100,0
16-22,4	92,5	92,4	90,8	91,9	—
22,4-31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	—
31,5-45	—	—	—	—	—
45-56	—	—	—	—	—
56-63	—	—	—	—	—

Tabelle D.4: Stück- und Korngrößenverteilung des Ausbaustoffes T

Kornklasse	Siebdurchgang [M.-%]				
	SGV 1	SGV 2	SGV 3	SGV	KGV
≤ 0,09	3,4	2,7	3,3	3,1	2,2
0,09-0,25	15,6	12,4	13,0	13,7	13,2
0,25-0,71	58,3	46,2	43,9	49,4	54,8
0,71-2	80,5	67,1	64,2	70,6	75,6
2-5	92,4	85,0	82,9	86,8	91,3
5-8	97,8	96,1	95,7	96,5	98,2
8-11,2	100,0	98,9	99,5	99,5	100,0
11,2-16	100,0	100,0	100,0	100,0	—
16-22,4	—	—	—	—	—
22,4-31,5	—	—	—	—	—
31,5-45	—	—	—	—	—
45-56	—	—	—	—	—
56-63	—	—	—	—	—

Tabelle D.5: Ergebnisse der Proctor-Versuche an den pechhaltigen Ausbaustoffen

w_{Pr} [M.-%]	Trockenraumdichten ρ_{Pr} [g/cm ³]						
	S	B	C	T	To	So	Bo
4,0	1,938	1,991	1,650	—	—	—	—
4,5	—	—	—	—	—	2,027	—
5,0	—	1,996	1,702	—	—	2,057	2,097
5,5	—	—	—	—	—	2,097	2,107
6,0	1,979	1,935	1,673	—	—	2,141	2,120
6,5	—	—	—	—	—	2,135	2,151
7,0	—	—	—	—	—	—	2,164
7,5	—	—	—	—	—	—	—
8,0	2,007	—	—	—	—	—	—
8,5	—	—	—	—	—	—	—
9,0	—	—	—	—	—	—	—
9,5	—	—	—	—	1,924	—	—
10,0	—	—	—	1,799	1,930	—	—
10,5	—	—	—	—	—	—	—
11,0	—	—	—	—	1,928	—	—
11,5	—	—	—	—	—	—	—
12,0	—	—	—	1,810	1,896	—	—
12,5	—	—	—	—	1,871	—	—
13,0	—	—	—	1,812	—	—	—

Tabelle D.6: Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff S

Mischgut	$\rho_{A,T}$			$\rho_{r,bit}$ [g/cm ³]	H_{bit} [Vol.-%]
	PK1 [g/cm ³]	PK2 [g/cm ³]	Mittel [g/cm ³]		
S-01-1,5	2,250	2,283	2,266	2,546	11,0
S-01-2,0	2,306	2,287	2,297	2,511	8,5
S-01-2,5	2,278	2,288	2,283	2,512	9,1
S-02-2,0	2,305	2,295	2,300	2,539	9,4
S-03-2,0	2,312	2,311	2,311	2,509	7,9
S-04-2,0	2,294	2,298	2,296	2,533	9,4
S-05-2,0	2,300	2,307	2,303	2,532	9,0
S-06-2,0	2,320	2,324	2,322	2,521	7,9
S-07-2,0	2,310	2,307	2,309	2,541	9,1
S-08-2,0	2,302	2,318	2,310	2,526	8,6
S-09-2,0	2,301	2,295	2,298	2,528	9,1
S-10-2,0	2,301	2,297	2,299	2,530	9,1

Schlüssel: Ausbaustoff – Emulsion – Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.7: Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff B

Mischgut	$\rho_{A,T}$			$\rho_{r,bit}$ [g/cm ³]	H_{bit} [Vol.-%]
	PK1 [g/cm ³]	PK2 [g/cm ³]	Mittel [g/cm ³]		
B-01-1,5	2,297	2,326	2,312	2,542	9,1
B-01-2,0	2,308	2,309	2,309	2,527	8,6
B-01-2,5	2,295	2,302	2,298	2,534	9,3
B-02-2,0	2,322	2,303	2,313	2,566	9,9
B-03-2,0	2,310	2,292	2,301	2,572	10,5
B-04-2,0	2,306	2,306	2,306	2,561	10,0
B-05-2,0	2,306	2,317	2,312	2,572	10,1
B-06-2,0	2,308	2,331	2,319	2,571	9,8
B-07-2,0	2,320	2,313	2,317	2,564	9,7
B-08-2,0	2,333	2,336	2,335	2,571	9,2
B-09-2,0	2,330	2,309	2,320	2,552	9,1
B-10-2,0	2,328	2,323	2,325	2,589	10,2

Schlüssel: Ausbaustoff – Emulsion – Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.8: Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff C

Mischgut	$\rho_{A,T}$			$\rho_{r,bit}$ [g/cm ³]	H_{bit} [Vol.-%]
	PK1 [g/cm ³]	PK2 [g/cm ³]	Mittel [g/cm ³]		
C-01-1,5	2,093	2,209	2,151	2,352	8,5
C-01-2,0	2,197	2,218	2,208	2,389	7,6
C-01-2,5	2,187	2,165	2,176	2,363	7,9
C-02-2,0	2,229	2,224	2,227	2,385	6,6
C-03-2,0	2,235	2,240	2,237	2,387	6,3
C-04-2,0	2,240	2,236	2,238	2,372	5,6
C-05-2,0	2,242	2,238	2,240	2,390	6,3
C-06-2,0	2,236	2,235	2,236	2,380	6,1
C-07-2,0	2,239	2,236	2,237	2,385	6,2
C-08-2,0	2,235	2,243	2,239	2,377	5,8
C-09-2,0	2,241	2,240	2,240	2,399	6,6
C-10-2,0	2,246	2,244	2,245	2,394	6,2

Schlüssel: Ausbaustoff – Emulsion – Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.9: Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus dem Ausbaustoff T

Mischgut	$\rho_{A,T}$			$\rho_{r,bit}$ [g/cm ³]	H_{bit} [Vol.-%]
	PK1 [g/cm ³]	PK2 [g/cm ³]	Mittel [g/cm ³]		
T-01-2,5	2,082	2,082	2,082	2,490	16,4
T-01-3,0	2,131	2,125	2,128	2,466	13,7
T-01-3,5	2,074	2,123	2,099	2,444	14,1
T-02-3,5	2,011	2,013	2,012	2,421	16,9
T-03-3,5	1,976	1,973	1,974	2,450	19,4
T-04-3,5	2,017	2,009	2,013	2,414	16,6
T-05-3,5	1,975	1,973	1,974	2,431	18,8
T-06-3,5	1,972	1,974	1,973	2,429	18,8
T-07-3,5	1,985	1,979	1,982	2,443	18,9
T-08-3,5	1,999	1,996	1,998	2,451	18,5
T-09-3,5	2,011	2,012	2,011	2,423	17,0
T-10-3,5	2,008	2,004	2,006	2,437	17,7

Schlüssel: Ausbaustoff – Emulsion – Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.10: Raumdichten, Rohdichten und Hohlraumgehalte der Mischgutvarianten und Probekörper aus den Ausbaustoffen So, Bo und To

Mischgut	$\rho_{A,T}$				$\rho_{r,bit}$ [g/cm ³]	H_{bit} [Vol.-%]
	PK1 [g/cm ³]	PK2 [g/cm ³]	PK3 [g/cm ³]	Mittel [g/cm ³]		
So-02-1,5	2,301	2,299	2,296	2,299	2,5	9
So-02-2,0	2,291	2,275	2,305	2,290	2,5	9,1
So-02-2,5	2,300	2,308	2,309	2,306	2,5	7,6
So-05-1,5	2,299	2,308	2,301	2,303	2,5	8,7
So-05-2,0	2,318	2,302	2,287	2,302	2,5	8,3
So-05-2,5	2,320	2,318	2,302	2,313	2,5	6,8
So-10-1,5	2,299	2,299	2,293	2,297	2,5	9,3
So-10-2,0	2,304	2,316	2,297	2,306	2,5	6,9
So-10-2,5	2,327	2,327	2,329	2,328	2,5	6,4
Bo-02-1,5	2,321	2,319	2,310	2,317	2,6	11,1
Bo-02-2,0	2,341	2,338	2,313	2,331	2,6	9,3
Bo-02-2,5	2,342	2,319	2,306	2,322	2,5	8,7
Bo-05-1,5	2,312	2,304	2,308	2,308	2,6	10,2
Bo-05-2,0	2,351	2,325	2,333	2,336	2,6	9,4
Bo-05-2,5	2,324	2,332	2,328	2,328	2,5	8,4
Bo-10-1,5	2,309	2,286	2,283	2,293	2,6	11,1
Bo-10-2,0	2,317	2,318	2,319	2,318	2,6	10,2
Bo-10-2,5	2,363	2,340	2,347	2,350	2,5	7,3
To-02-3,0	2,042	2,038	2,043	2,041	2,4	16,3
To-02-3,5	2,043	2,063	2,059	2,055	2,4	15,4
To-02-4,0	2,059	2,052	2,060	2,057	2,4	14,4
To-05-3,0	2,033	2,025	2,039	2,032	2,4	16,5
To-05-3,5	2,048	2,051	2,053	2,051	2,4	15,4
To-05-4,0	2,044	2,052	2,061	2,052	2,4	14,6
To-10-3,0	2,042	2,026	2,044	2,037	2,4	16,7
To-10-3,5	2,053	2,054	2,037	2,048	2,4	15,5
To-10-4,0	2,049	2,055	2,061	2,055	2,4	14,3

Schlüssel: Ausbaustoff – Emulsion – Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.11: Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes S

Mischgut	MS_{14L}				MS_{7L7W}				$MS_{7L7Wrel}$
	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	
S-01-1,5	3,8	4,4	4,3	4,2	2,6	3,2	2,7	2,8	68%
S-01-2,0	3,7	3,9	3,3	3,6	2,8	3,2	2,3	2,8	76%
S-01-2,5	2,9	3,1	3,2	3,1	2,3	2,1	2,2	2,2	72%
S-02-2,0	5,6	5,0	5,6	5,4	3,0	3,2	3,1	3,1	57%
S-03-2,0	4,8	5,4	5,0	5,1	2,9	3,1	3,4	3,1	62%
S-04-2,0	5,4	4,4	5,6	5,1	3,3	2,7	3,2	3,1	60%
S-05-2,0	6,8	6,8	6,4	6,7	4,2	4,2	4,6	4,3	65%
S-06-2,0	6,2	6,0	6,0	6,1	6,8	3,2	3,1	4,4	72%
S-07-2,0	4,2	4,3	5,8	4,8	2,3	2,8	2,4	2,5	52%
S-08-2,0	5,8	4,8	5,6	5,4	3,6	3,1	3,9	3,5	65%
S-09-2,0	5,4	4,8	5,4	5,2	4,2	3,2	3,5	3,6	70%
S-10-2,0	5,4	6,4	6,0	5,9	3,7	3,2	3,4	3,4	58%

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.12: Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes B

Mischgut	MS_{14L}				MS_{7L7W}				$MS_{7L7Wrel}$
	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	
B-01-1,5	4,5	4,5	3,6	4,2	3,1	2,7	2,7	2,8	67%
B-01-2,0	3,4	4,0	3,3	3,6	2,2	2,2	2,9	2,4	68%
B-01-2,5	3,4	3,4	3,7	3,5	3,7	3,1	2,4	3,1	88%
B-02-2,0	3,9	4,0	3,2	3,7	1,9	2,7	2,4	2,3	63%
B-03-2,0	2,9	3,0	4,9	3,6	6,0	2,9	6,9	5,3	146%
B-04-2,0	1,6	3,8	3,6	3,0	2,3	2,5	2,5	2,4	81%
B-05-2,0	5,0	3,8	4,1	4,3	2,3	1,9	2,9	2,4	55%
B-06-2,0	3,0	1,9	4,0	3,0	2,3	2,5	2,5	2,4	82%
B-07-2,0	4,0	6,0	3,6	4,5	2,1	1,6	2,6	2,1	46%
B-08-2,0	3,4	4,0	3,4	3,6	2,3	2,6	2,7	2,5	70%
B-09-2,0	3,9	3,8	2,9	3,5	3,8	2,6	1,5	2,6	75%
B-10-2,0	3,4	3,4	3,4	3,4	3,1	3,9	5,8	4,3	125%

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.13: Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes C

Mischgut	MS_{14L}				MS_{7L7W}				$MS_{7L7Wrel}$
	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	
C-01-1,5	3,8	4,1	4,2	4,0	3,4	3,6	3,6	3,5	88 %
C-01-2,0	5,0	5,1	5,9	5,3	4,0	3,8	3,8	3,9	73 %
C-01-2,5	3,1	3,3	3,0	3,1	2,9	2,6	2,6	2,7	86 %
C-02-2,0	4,7	4,4	4,7	4,6	3,7	3,7	3,7	3,7	80 %
C-03-2,0	4,3	4,4	4,3	4,3	3,5	3,5	3,5	3,5	81 %
C-04-2,0	4,5	4,6	4,7	4,6	3,8	3,8	4,1	3,9	85 %
C-05-2,0	5,2	4,5	4,4	4,7	4,2	3,9	4,0	4,0	86 %
C-06-2,0	4,3	4,2	4,1	4,2	3,3	3,2	3,7	3,4	81 %
C-07-2,0	4,0	4,3	4,1	4,1	3,2	2,9	2,6	2,9	70 %
C-08-2,0	4,2	4,4	4,3	4,3	3,8	3,9	3,2	3,6	84 %
C-09-2,0	5,0	4,5	5,2	4,9	3,6	3,5	3,9	3,7	75 %
C-10-2,0	4,9	4,7	4,6	4,7	4,2	3,5	3,6	3,8	80 %

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.14: Marshall-Stabilitäten der Probekörper des Ausbaustoffes T

Mischgut	MS_{14L}				MS_{7L7W}				$MS_{7L7Wrel}$
	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	
T-01-2,5	3,9	4,5	4,5	4,3	2,9	2,9	2,9	2,9	67 %
T-01-3,0	4,3	4,1	4,3	4,2	2,8	2,9	2,6	2,8	65 %
T-01-3,5	4,1	4,1	4,1	4,1	2,6	2,8	2,8	2,7	67 %
T-02-3,5	5,4	5,2	4,9	5,2	3,0	3,0	3,0	3,0	58 %
T-03-3,5	3,3	3,2	3,0	3,2	2,1	2,0	2,1	2,1	65 %
T-04-3,5	4,9	4,5	4,5	4,6	2,9	2,7	2,8	2,8	60 %
T-05-3,5	5,2	4,7	4,9	4,9	2,8	2,4	2,9	2,7	55 %
T-06-3,5	3,9	3,6	3,7	3,7	2,3	2,3	2,4	2,3	62 %
T-07-3,5	4,7	4,4	4,5	4,5	3,2	3,1	3,5	3,3	72 %
T-08-3,5	3,7	3,4	3,3	3,5	2,4	2,2	2,1	2,2	64 %
T-09-3,5	3,8	3,7	3,8	3,8	2,5	2,6	2,7	2,6	69 %
T-10-3,5	3,9	3,8	4,3	4,0	3,3	3,4	3,2	3,3	82 %

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.15: Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes S

Mischgut	FW_{14L}				FW_{7L7W}			
	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]
S-01-1,5	2,6	2,5	1,9	2,3	3,3	3,8	3,2	3,4
S-01-2,0	2,8	2,3	3,3	2,8	4,6	5,8	4,2	4,9
S-01-2,5	2,8	3,2	5,6	3,9	6,1	5,2	4,2	5,2
S-02-2,0	3,0	3,2	2,9	3,0	4,4	4,5	4,4	4,4
S-03-2,0	4,8	2,2	2,9	3,3	5,7	4,4	4,5	4,9
S-04-2,0	4,0	4,3	2,4	3,6	4,4	3,4	4,0	3,9
S-05-2,0	4,0	4,0	3,3	3,8	3,6	4,4	3,0	3,7
S-06-2,0	2,3	3,2	2,4	2,6	4,4	3,6	3,7	3,9
S-07-2,0	2,6	3,5	3,6	3,2	4,3	5,3	4,8	4,8
S-08-2,0	3,3	3,9	2,1	3,1	4,0	3,4	3,7	3,7
S-09-2,0	4,6	4,2	3,3	4,0	4,5	3,2	4,6	4,1
S-10-2,0	4,1	3,0	2,6	3,2	3,9	5,0	3,4	4,1

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.16: Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes B

Mischgut	FW_{14L}				FW_{7L7W}			
	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]
B-01-1,5	3,1	5,1	4,0	4,1	3,7	3,9	2,8	3,5
B-01-2,0	3,8	3,2	3,4	3,5	3,0	3,5	3,9	3,5
B-01-2,5	3,5	2,8	4,6	3,6	7,8	4,9	4,0	5,6
B-02-2,0	4,2	3,0	2,9	3,4	2,9	3,1	2,7	2,9
B-03-2,0	2,0	1,9	1,8	1,9	3,3	4,2	3,7	3,7
B-04-2,0	4,4	3,0	3,8	3,7	4,7	3,7	7,0	5,1
B-05-2,0	4,4	4,0	4,2	4,2	5,5	4,1	3,9	4,5
B-06-2,0	3,4	3,4	4,2	3,7	3,2	5,2	2,3	3,6
B-07-2,0	6,0	6,0	6,6	6,2	4,8	3,7	4,7	4,4
B-08-2,0	1,8	2,1	1,6	1,8	3,1	2,1	3,7	3,0
B-09-2,0	3,0	4,4	2,3	3,2	2,8	4,3	3,8	3,6
B-10-2,0	2,9	2,7	3,4	3,0	3,0	2,4	3,3	2,9

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.17: Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes C

Mischgut	FW_{14L}				FW_{7L7W}			
	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]
C-01-1,5	4,2	4,7	4,2	4,4	4,9	5,7	5,3	5,3
C-01-2,0	3,2	3,2	3,2	3,2	4,3	4,5	4,4	4,4
C-01-2,5	5,0	5,3	4,8	5,0	5,4	6,2	5,5	5,7
C-02-2,0	3,7	4,7	4,5	4,3	5,8	6,1	5,5	5,8
C-03-2,0	4,6	4,8	4,8	4,7	5,1	5,4	5,0	5,2
C-04-2,0	3,7	4,1	4,3	4,0	5,6	5,7	5,4	5,6
C-05-2,0	4,6	5,1	3,8	4,5	5,2	4,9	5,3	5,1
C-06-2,0	4,8	4,6	5,8	5,1	5,1	5,0	5,0	5,0
C-07-2,0	5,7	5,3	5,2	5,4	6,2	8,7	5,8	6,9
C-08-2,0	4,0	4,7	4,3	4,3	5,8	5,1	4,9	5,3
C-09-2,0	4,5	4,6	4,7	4,6	4,9	4,6	4,6	4,7
C-10-2,0	5,1	4,8	5,4	5,1	6,0	4,9	5,0	5,3

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.18: Marshall-Fließwerte der Probekörper des Ausbaustoffes T

Mischgut	FW_{14L}				FW_{7L7W}			
	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]
T-01-2,5	1,6	3,0	2,5	2,4	2,4	1,9	2,3	2,2
T-01-3,0	1,3	1,9	2,5	1,9	2,8	2,9	2,6	2,8
T-01-3,5	1,7	2,0	2,3	2,0	2,0	1,7	1,7	1,8
T-02-3,5	2,6	1,6	2,2	2,1	1,6	1,8	2,1	1,8
T-03-3,5	2,2	2,5	2,6	2,4	2,1	2,1	2,2	2,1
T-04-3,5	1,7	1,8	1,8	1,8	2,0	1,8	2,0	1,9
T-05-3,5	2,6	2,8	2,3	2,6	1,8	2,3	2,2	2,1
T-06-3,5	2,5	3,1	2,1	2,6	3,0	3,2	2,6	2,9
T-07-3,5	2,3	3,2	2,0	2,5	1,7	2,3	2,3	2,1
T-08-3,5	1,5	3,3	2,2	2,3	2,6	2,8	2,6	2,7
T-09-3,5	3,0	2,5	2,1	2,5	2,0	2,3	1,7	2,0
T-10-3,5	2,5	2,8	2,2	2,5	2,8	1,9	2,6	2,4

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.19: Marshall-Stabilitäten der Probekörper der Ausbaustoffe So, Bo und To

Mischgut	MS_{14L}				MS_{7L7W}				$MS_{7L7Wrel}$
	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	PK1 [kN]	PK2 [kN]	PK3 [kN]	Mittel [kN]	
So-02-1,5	6,4	7,2	6,2	6,6	3,8	3,6	2,4	3,3	49%
So-02-2,0	6,0	5,8	5,4	5,7	3,0	2,8	2,4	2,7	48%
So-02-2,5	5,0	5,8	6,0	5,6	2,9	3,0	3,3	3,1	55%
So-05-1,5	5,8	6,8	7,4	6,7	3,5	3,2	3,1	3,3	49%
So-05-2,0	6,2	6,0	5,4	5,9	3,6	3,6	3,8	3,7	62%
So-05-2,5	5,6	5,0	4,6	5,1	3,3	3,9	3,5	3,6	70%
So-10-1,5	5,6	5,4	4,7	5,2	3,1	2,3	2,5	2,6	50%
So-10-2,0	6,0	5,0	4,1	5,0	2,0	2,2	2,6	2,3	45%
So-10-2,5	6,0	5,6	5,8	5,8	2,7	2,8	3,3	2,9	51%
Bo-02-1,5	4,8	4,1	4,9	4,6	2,3	2,6	2,2	2,4	51%
Bo-02-2,0	6,4	6,0	3,0	6,2	3,1	3,2	3,3	3,2	52%
Bo-02-2,5	4,9	4,1	4,6	4,5	3,1	3,0	3,0	3,0	67%
Bo-05-1,5	5,8	5,0	4,7	5,2	3,1	3,0	4,1	3,4	66%
Bo-05-2,0	8,2	7,4	6,6	7,4	4,0	4,0	3,6	3,9	52%
Bo-05-2,5	5,2	5,6	4,8	5,2	4,6	4,8	3,7	4,4	84%
Bo-10-1,5	3,1	2,9	3,0	3,0	2,9	3,0	2,9	2,9	98%
Bo-10-2,0	2,6	3,8	3,4	3,3	1,5	2,1	2,0	1,9	57%
Bo-10-2,5	4,1	3,5	3,6	3,7	2,7	2,5	2,4	2,5	68%
To-02-3,0	7,4	6,8	7,2	7,1	4,7	4,5	4,9	4,7	66%
To-02-3,5	6,2	7,4	7,4	7,0	5,2	4,8	5,2	5,1	72%
To-02-4,0	6,6	6,2	7,0	6,6	5,0	4,4	4,4	4,6	70%
To-05-3,0	6,4	6,0	6,6	6,3	4,6	4,5	4,5	4,5	72%
To-05-3,5	6,2	6,8	6,6	6,5	5,4	4,4	3,6	4,5	68%
To-05-4,0	5,4	6,2	6,8	6,1	5,4	5,2	5,2	5,3	86%
To-10-3,0	7,2	6,8	7,4	7,1	4,6	4,6	3,3	4,2	58%
To-10-3,5	7,0	7,4	7,2	7,2	4,2	4,0	4,6	4,3	59%
To-10-4,0	7,0	6,8	7,0	6,9	3,8	3,8	3,8	3,8	55%

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabelle D.20: Marshall-Fließwerte der Probekörper der Ausbaustoffe So, Bo und To

Mischgut	FW_{14L}				FW_{7L7W}			
	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]	PK1 [mm]	PK2 [mm]	PK3 [mm]	Mittel [mm]
So-02-1,5	1,8	1,7	1,8	1,8	2,9	2,5	1,7	2,4
So-02-2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,8	2,5	2,5	2,6
So-02-2,5	2,3	2,0	2,2	2,2	3,4	3,3	2,9	3,2
So-05-1,5	1,5	1,4	1,6	1,5	1,9	2,8	2,2	2,3
So-05-2,0	1,9	1,5	2,4	1,9	2,4	2,2	2,3	2,3
So-05-2,5	2,1	1,9	2,2	2,1	3,0	3,0	2,0	2,7
So-10-1,5	1,4	1,7	1,3	1,5	2,5	2,4	2,2	2,4
So-10-2,0	2,1	3,7	2,5	2,8	3,2	3,2	2,5	3,0
So-10-2,5	2,4	1,8	2,1	2,1	3,3	3,0	2,6	3,0
Bo-02-1,5	2,3	2,6	1,8	2,2	2,1	2,3	2,2	2,2
Bo-02-2,0	2,0	1,7	1,6	1,8	1,9	1,8	2,1	1,9
Bo-02-2,5	2,1	2,7	2,5	2,4	2,0	2,7	3,1	2,6
Bo-05-1,5	2,5	2,8	2,0	2,4	1,7	1,7	2,1	1,8
Bo-05-2,0	2,3	2,1	1,8	2,1	1,7	1,8	1,7	1,7
Bo-05-2,5	2,5	2,2	2,1	2,3	2,1	2,4	2,2	2,2
Bo-10-1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	2,5	2,4	2,4	2,4
Bo-10-2,0	2,0	2,5	1,9	2,1	2,5	3,0	2,8	2,8
Bo-10-2,5	1,8	1,8	1,9	1,8	2,5	2,4	2,8	2,6
To-02-3,0	1,4	1,8	1,3	1,5	1,4	1,5	1,2	1,4
To-02-3,5	1,7	1,8	1,7	1,7	1,2	1,5	1,5	1,4
To-02-4,0	1,9	1,6	1,8	1,8	1,5	1,5	1,7	1,6
To-05-3,0	1,5	1,6	1,7	1,6	1,3	1,5	1,4	1,4
To-05-3,5	1,2	1,9	1,4	1,5	1,3	1,5	1,4	1,4
To-05-4,0	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,6
To-10-3,0	1,4	1,7	1,5	1,5	1,6	1,3	1,6	1,5
To-10-3,5	1,7	1,7	1,6	1,7	1,6	1,9	1,3	1,6
To-10-4,0	1,3	1,5	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2	1,3

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Anhang E

Ergebnisse der PAK- und Phenolanalysen

Tabelle E.1: PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes S

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittel
Naphthalin $\mu\text{g/l}$	2,51	2,26	3,60	3,11	2,87
Acenaphthylen $\mu\text{g/l}$	0,50	0,45	0,62	0,52	0,52
Acenaphthen $\mu\text{g/l}$	9,88	10,45	11,23	8,08	9,91
Fluoren $\mu\text{g/l}$	9,94	10,12	9,60	7,00	9,17
Phenanthren $\mu\text{g/l}$	12,17	6,00	13,86	8,49	10,13
Anthracen $\mu\text{g/l}$	4,37	5,27	5,10	3,90	4,66
Fluoranthren $\mu\text{g/l}$	5,02	6,35	10,48	8,56	7,60
Pyren $\mu\text{g/l}$	2,66	3,63	7,07	5,79	4,79
Benzo(a)anthracen $\mu\text{g/l}$	0,26	0,41	0,66	0,50	0,46
Chrysen $\mu\text{g/l}$	0,21	0,29	0,48	0,38	0,34
Benzo(b)fluoranthren $\mu\text{g/l}$	0,08	0,07	0,09	0,08	0,08
Benzo(k)fluoranthren $\mu\text{g/l}$	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07
Benzo(a)pyren $\mu\text{g/l}$	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06
Dibenzo(a,h)anthracen $\mu\text{g/l}$	0,05	0,06	0,01	0,00	0,03
Benzo(g,h,i)perylen $\mu\text{g/l}$	0,02	0,03	0,22	0,20	0,12
Indeno(1,2,3-c,d)pyren $\mu\text{g/l}$	0,06	0,03	0,00	0,00	0,02
<i>PAK</i> _{T24} $\mu\text{g/l}$	47,84	45,54	63,19	46,73	50,83
<i>PI</i> _{T24} mg/l	$\leq 0,02^*$				

*Nachweisgrenze

Tabelle E.2: PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes B

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittel
Naphthalin	µg/l	101,92	75,82	64,39	57,87	75,00
Acenaphthylen	µg/l	1,40	6,22	6,04	5,28	4,73
Acenaphthen	µg/l	23,93	21,99	21,88	20,20	22,00
Fluoren	µg/l	17,11	15,36	15,35	11,72	14,88
Phenanthren	µg/l	29,70	26,86	25,37	7,93	22,46
Anthracen	µg/l	9,46	8,63	5,15	4,28	6,88
Fluoranthren	µg/l	6,55	5,39	4,32	3,57	4,96
Pyren	µg/l	15,52	13,37	2,75	2,27	8,48
Benzo(a)anthracen	µg/l	1,48	1,00	0,30	0,23	0,75
Chrysen	µg/l	1,35	0,92	0,62	0,39	0,82
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,61	0,30	0,10	0,11	0,28
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,53	0,23	0,10	0,06	0,23
Benzo(a)pyren	µg/l	0,48	0,24	0,06	0,04	0,20
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	0,31	0,13	0,04	0,01	0,12
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	0,07	0,05	0,04	0,01	0,04
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	0,29	0,10	0,02	0,01	0,11
<i>PAK_{T24}</i>	µg/l	210,71	176,61	146,52	113,95	161,95
<i>PI_{T24}</i>	mg/l	10,60	36,80	2,23	2,15	12,95

Tabelle E.3: PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes C

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittel
Naphthalin	µg/l	0,61	0,55	1,20	1,23	0,90
Acenaphthylen	µg/l	1,55	0,09	0,00	0,01	0,41
Acenaphthen	µg/l	0,35	2,62	4,11	3,91	2,75
Fluoren	µg/l	0,72	0,75	1,45	1,32	1,06
Phenanthren	µg/l	1,97	0,80	6,33	4,12	3,30
Anthracen	µg/l	0,86	1,12	1,53	1,34	1,21
Fluoranthren	µg/l	3,25	4,69	6,18	5,65	4,94
Pyren	µg/l	3,02	4,21	5,51	5,39	4,53
Benzo(a)anthracen	µg/l	0,32	0,50	0,32	0,37	0,38
Chrysen	µg/l	0,28	0,43	0,42	0,36	0,38
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,03	0,09	0,09	0,09	0,07
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,08	0,03	0,06	0,05	0,05
Benzo(a)pyren	µg/l	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	0,09	0,02	0,01	0,01	0,03
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
<i>PAK_{T24}</i>	µg/l	13,19	15,95	27,26	23,92	20,08
<i>PI_{T24}</i>	mg/l	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*	0,05	0,03

*Nachweisgrenze

Tabelle E.4: PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes T

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittel
Naphthalin	µg/l	7,31	5,53	1,94	1,17	3,99
Acenaphthylen	µg/l	0,86	0,84	1,05	1,22	1,00
Acenaphthen	µg/l	38,89	39,84	42,39	38,83	39,99
Fluoren	µg/l	16,56	19,13	19,39	19,55	18,66
Phenanthren	µg/l	25,98	30,01	43,30	43,95	35,81
Anthracen	µg/l	5,56	6,52	8,83	8,70	7,40
Fluoranthren	µg/l	18,77	21,45	51,88	54,25	36,59
Pyren	µg/l	9,98	11,27	32,03	33,25	21,63
Benzo(a)anthracen	µg/l	1,16	1,40	2,57	2,73	1,96
Chrysen	µg/l	0,89	1,02	2,74	3,03	1,92
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,04	0,14	0,51	0,62	0,33
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,13	0,04	0,27	0,34	0,20
Benzo(a)pyren	µg/l	0,04	0,03	0,19	0,25	0,13
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	0,06	0,08	0,19	0,22	0,14
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	0,10	0,13	0,15	0,06	0,11
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01
<i>PAK_{T24}</i>	µg/l	126,33	137,44	207,45	208,19	169,85
<i>PI_{T24}</i>	mg/l	≤ 0,02*	≤ 0,02*	0,03	≤ 0,02*	≤ 0,02*

*Nachweisgrenze

Tabelle E.5: PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes So

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittel
Naphthalin	µg/l	5,10	6,30	5,72	6,12	5,81
Acenaphthylen	µg/l	0,95	0,52	0,72	0,35	0,64
Acenaphthen	µg/l	6,92	10,10	8,16	8,42	8,40
Fluoren	µg/l	10,29	11,89	6,37	10,93	9,87
Phenanthren	µg/l	19,37	20,72	14,16	16,58	17,71
Anthracen	µg/l	5,80	4,99	3,68	5,11	4,90
Fluoranthren	µg/l	15,23	10,31	8,33	10,62	11,12
Pyren	µg/l	10,40	6,21	5,05	6,02	6,92
Benzo(a)anthracen	µg/l	2,96	0,85	0,52	2,38	1,68
Chrysen	µg/l	2,70	0,53	0,97	2,69	1,72
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	2,62	2,44	2,88	4,17	3,03
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	1,57	1,43	2,58	1,49	1,77
Benzo(a)pyren	µg/l	2,74	2,97	1,72	2,63	2,51
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	0,12	0,00	1,01	1,10	0,56
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	1,55	1,19	1,46	0,00	1,05
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	1,80	1,84	1,18	0,98	1,45
PAK_{T24}	µg/l	90,12	82,29	64,51	79,59	79,13
PI_{T24}	mg/l	0,09	0,04	—	—	0,06

Tabelle E.6: PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes Bo

		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittel
Naphthalin	µg/l	42,42	40,34	43,37	43,27	42,35
Acenaphthylen	µg/l	0,72	0,65	0,45	0,48	0,57
Acenaphthen	µg/l	21,40	13,45	11,81	12,37	14,76
Fluoren	µg/l	13,46	9,66	8,06	8,53	9,93
Phenanthren	µg/l	27,38	21,31	16,48	17,12	20,57
Anthracen	µg/l	6,29	5,27	5,10	4,65	5,33
Fluoranthen	µg/l	8,22	4,49	4,10	3,71	5,13
Pyren	µg/l	4,56	2,54	2,14	2,20	2,86
Benzo(a)anthracen	µg/l	2,36	1,13	0,53	0,48	1,13
Chrysen	µg/l	2,51	0,92	0,69	0,72	1,21
Benzo(b)fluoranthen	µg/l	2,61	1,80	1,02	0,74	1,54
Benzo(k)fluoranthen	µg/l	3,52	2,57	3,52	0,94	2,64
Benzo(a)pyren	µg/l	2,98	2,33	1,11	0,95	1,84
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	2,28	2,17	0,96	0,94	1,59
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	2,11	1,79	1,15	1,02	1,52
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	2,54	2,21	2,54	0,84	2,03
<i>PAK_{T24}</i>	µg/l	145,36	112,63	103,03	98,96	115,00
<i>PI_{T24}</i>	mg/l	1,49	1,25	—	—	1,37

Tabelle E.7: PAK-Konzentration und Phenolindex im Eluat des Ausbaustoffes To

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittel
Naphthalin $\mu\text{g/l}$	9,94	6,67	8,34	8,13	8,27
Acenaphthylen $\mu\text{g/l}$	1,54	1,14	1,30	1,22	1,30
Acenaphthen $\mu\text{g/l}$	79,97	55,00	46,68	49,63	57,82
Fluoren $\mu\text{g/l}$	31,57	23,55	16,20	17,47	22,20
Phenanthren $\mu\text{g/l}$	80,34	64,48	47,72	51,55	61,02
Anthracen $\mu\text{g/l}$	15,60	11,90	10,62	11,30	12,36
Fluoranthen $\mu\text{g/l}$	128,99	90,43	100,66	92,47	103,14
Pyren $\mu\text{g/l}$	74,27	51,63	50,71	51,67	57,07
Benzo(a)anthracen $\mu\text{g/l}$	42,48	25,36	30,76	33,54	33,03
Chrysen $\mu\text{g/l}$	58,06	33,79	47,40	50,48	47,43
Benzo(b)fluoranthen $\mu\text{g/l}$	34,13	22,04	46,44	48,50	37,78
Benzo(k)fluoranthen $\mu\text{g/l}$	19,12	10,68	17,45	17,37	16,16
Benzo(a)pyren $\mu\text{g/l}$	22,20	14,71	27,09	28,82	23,21
Dibenzo(a,h)anthracen $\mu\text{g/l}$	3,19	4,31	4,08	2,43	3,50
Benzo(g,h,i)perylen $\mu\text{g/l}$	7,31	6,94	9,84	6,47	7,64
Indeno(1,2,3-c,d)pyren $\mu\text{g/l}$	10,40	8,11	5,30	4,54	7,09
PAK_{T24} $\mu\text{g/l}$	619,11	430,74	470,59	475,59	499,01
PI_{T24} mg/l	0,22	0,23	—	—	0,23

Tabella E.8: Gesamtgehalt an PAK im Feststoff der Ausbaustoffe So, Bo und To

	So			Bo			To		
	Probe 1	Probe 2	Mittel	Probe 1	Probe 2	Mittel	Probe 1	Probe 2	Mittel
Naphthalin	0,09	0,08	0,08	0,37	0,42	0,40	0,03	0,04	0,04
Acenaphthylen	0,42	0,38	0,40	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03
Acenaphthen	0,45	0,39	0,42	0,44	0,53	0,49	0,59	0,74	0,67
Fluoren	0,80	0,67	0,74	0,43	0,58	0,51	0,35	0,42	0,39
Phenanthren	3,62	2,99	3,30	2,41	3,03	2,72	1,86	2,38	2,12
Anthracen	1,89	1,60	1,75	0,65	0,83	0,74	0,53	0,68	0,61
Fluoranthren	6,25	5,34	5,79	1,66	2,04	1,85	6,99	7,80	7,40
Pyren	4,35	3,76	4,05	1,12	1,46	1,29	4,29	4,41	4,35
Benzo(a)anthracen	1,76	1,60	1,68	0,52	0,59	0,55	4,33	3,71	4,02
Chrysen	2,48	2,16	2,32	0,65	0,00	0,32	5,50	4,63	5,07
Benzo(b)fluoranthren	4,23	3,98	4,11	0,12	0,14	0,13	7,34	8,09	7,72
Benzo(k)fluoranthren	1,41	1,54	1,48	0,08	0,10	0,09	2,09	2,31	2,20
Benzo(a)pyren	2,88	2,49	2,69	0,68	0,76	0,72	3,53	3,79	3,66
Dibenzo(a,h)anthracen	0,29	0,31	0,30	0,09	0,11	0,10	0,66	0,69	0,68
Benzo(g,h,i)perylene	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,33	0,27	0,30	0,06	0,06	0,06	0,28	0,17	0,23
Σ PAK _F	31,27	27,59	29,43	9,35	10,70	10,02	38,43	39,94	39,19

Tabella E.9: PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper des Ausbaustoffes S

Mischgut	PAK _{T24} [µg/l]			Pl _{T24} [mg/l]					
	MG 1	MG 2	Mittel	MG 1	MG 2	Mittel			
S-01-1,5	17,91	16,45	17,18	8,98	7,10	8,04	—	—	—
S-01-2,0	19,46	14,55	17,01	7,71	8,28	8,00	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*
S-01-2,5	15,38	15,26	15,32	9,86	5,55	7,70	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*
S-02-2,0	31,89	58,66	45,28	3,50	10,77	7,14	0,03	≤ 0,02*	0,03
S-03-2,0	34,80	30,72	32,76	4,60	3,88	4,24	—	—	—
S-04-2,0	23,13	—	23,13	5,33	8,05	6,69	—	—	—
S-05-2,0	7,27	6,46	6,87	5,26	3,63	4,44	—	—	—
S-06-2,0	6,77	7,07	6,92	5,39	5,03	5,21	—	—	—
S-07-2,0	4,65	5,01	4,83	5,42	2,62	4,02	—	—	—
S-08-2,0	9,83	9,50	9,66	4,76	5,75	5,26	—	—	—
S-09-2,0	10,27	12,87	11,57	5,81	7,05	6,43	—	—	—
S-10-2,0	7,79	7,26	7,53	4,28	4,00	4,14	—	—	—

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%
 *Nachweisgrenze

Tabelle E.10: PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper des Ausbaustoffes B

Mischgut	PAK _{T24} [$\mu\text{g/l}$]			PIT ₂₄ [mg/l]					
	MG 1	MG 2	Mittel	MG 1	MG 2	Mittel	PK 1	PK 2	Mittel
B-01-1,5	86,40	65,15	75,78	14,70	14,40	14,55	2,10	1,40	1,75
B-01-2,0	36,17	44,63	40,40	2,50	2,60	2,55	9,30	2,10	5,70
B-01-2,5	47,76	41,25	44,50	7,00	3,50	5,25	4,50	6,20	5,35
B-02-2,0	53,50	55,02	54,26	1,30	1,80	1,55	0,41	0,37	0,39
B-03-2,0	50,98	46,11	48,55	1,70	1,60	1,65	0,25	0,23	0,24
B-04-2,0	66,29	65,90	66,09	2,30	1,90	2,10	0,38	0,36	0,37
B-05-2,0	100,26	93,39	96,82	1,20	2,00	1,60	0,27	0,16	0,22
B-06-2,0	95,89	116,05	105,97	1,30	1,80	1,55	0,40	0,32	0,36
B-07-2,0	98,39	95,60	97,00	2,00	1,20	1,60	0,24	0,23	0,23
B-08-2,0	103,99	95,92	99,96	1,00	1,60	1,30	0,28	0,21	0,25
B-09-2,0	61,98	60,76	61,37	0,66	0,76	0,71	0,06	0,10	0,08
B-10-2,0	10,44	11,68	11,06	1,14	1,20	1,17	0,03	0,02	0,03

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

Tabella E.11: PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper des Ausbaustoffes C

Mischgut	PAK _{T24} [µg/l]				P _{T24} [mg/l]							
	MG 1	MG 2	Mittel	PK 1	PK 2	Mittel	MG 1	MG 2	Mittel	PK 1	PK 2	Mittel
C-01-1,5	15,39	12,53	13,96	5,50	11,59	8,54	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*	—	—	—
C-01-2,0	10,79	12,76	11,78	4,81	6,48	5,65	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*	—	—	—
C-01-2,5	5,95	8,16	7,05	8,16	3,69	5,93	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*	—	—	—
C-02-2,0	18,52	18,91	18,71	12,37	10,32	11,35	—	—	—	—	—	—
C-03-2,0	16,53	15,62	16,08	9,15	4,55	6,85	—	—	—	—	—	—
C-04-2,0	13,12	16,06	14,59	7,73	8,19	7,96	—	—	—	—	—	—
C-05-2,0	18,61	12,80	15,70	7,71	7,04	7,37	—	—	—	—	—	—
C-06-2,0	11,18	11,43	11,30	6,51	9,97	8,24	—	—	—	—	—	—
C-07-2,0	11,56	11,79	11,68	6,14	6,78	6,46	—	—	—	—	—	—
C-08-2,0	15,96	16,66	16,31	12,75	7,12	9,94	—	—	—	—	—	—
C-09-2,0	18,71	19,23	18,97	12,25	7,55	9,90	—	—	—	—	—	—
C-10-2,0	1,71	3,08	2,40	4,38	8,26	6,32	—	—	—	—	—	—

Schlüssel: Ausbaustoff – Emulsion – Bitumenzugabe in M.-%
 *Nachweisgrenze

Tabelle E.12: PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Mischgutvarianten und Probekörper des Ausbaustoffes T

Mischgut	PAK _{T24} [µg/l]			P _{T24} [mg/l]		
	MG 1	MG 2	Mittel	MG 1	MG 2	Mittel
T-01-2,5	56,83	43,12	49,98	20,88	7,27	14,07
T-01-3,0	28,76	38,34	33,55	24,91	20,50	22,71
T-01-3,5	28,42	30,84	29,63	13,69	5,94	9,82
T-02-3,5	21,78	20,98	21,38	21,60	18,96	20,28
T-03-3,5	16,31	16,86	16,59	16,84	15,92	16,38
T-04-3,5	25,14	20,39	22,77	22,32	17,55	19,94
T-05-3,5	7,33	20,95	14,14	14,67	16,74	15,70
T-06-3,5	36,99	33,13	35,06	8,40	8,43	8,42
T-07-3,5	39,53	38,70	39,12	19,16	13,79	16,47
T-08-3,5	53,57	52,30	52,93	13,18	22,45	17,82
T-09-3,5	45,85	46,29	46,07	13,33	12,41	12,87
T-10-3,5	16,29	15,63	15,96	9,06	11,64	10,35

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

*Nachweisgrenze

Tabelle E.13: PAK-Konzentrationen und Phenolindizes in den Eluaten der Probekörper der Ausbaustoffe So, Bo und To

Mischgut	PAK _{T24} [µg/l]			PI _{T24} [mg/l]		
	PK 1	PK 2	Mittel	PK 1	PK 2	Mittel
So-02-1,5	7,23	6,25	6,74	—	—	—
So-02-2,0	9,06	10,98	10,02	—	—	—
So-02-2,5	8,75	4,86	6,81	—	—	—
So-05-1,5	6,26	7,39	6,83	—	—	—
So-05-2,0	7,11	4,33	5,72	—	—	—
So-05-2,5	5,18	4,64	4,91	—	—	—
So-10-1,5	11,86	11,60	11,73	—	—	—
So-10-2,0	4,14	4,90	4,52	—	—	—
So-10-2,5	9,25	14,43	11,84	—	—	—
Bo-02-1,5	14,48	9,32	11,90	0,19	0,19	0,19
Bo-02-2,0	9,98	9,69	9,84	0,20	0,19	0,19
Bo-02-2,5	10,79	8,56	9,68	0,10	0,11	0,10
Bo-05-1,5	10,19	5,93	8,06	0,15	0,15	0,15
Bo-05-2,0	12,04	12,37	12,20	0,11	0,12	0,12
Bo-05-2,5	9,99	9,65	9,82	0,09	0,09	0,09
Bo-10-1,5	6,28	7,05	6,66	0,17	0,19	0,18
Bo-10-2,0	6,61	6,28	6,44	0,19	0,16	0,18
Bo-10-2,5	10,55	8,09	9,32	0,13	0,11	0,12
To-02-3,0	5,98	8,83	7,41	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*
To-02-3,5	6,80	9,83	8,31	≤ 0,02*	≤ 0,02*	≤ 0,02*
To-02-4,0	12,28	7,33	9,81	—	—	—
To-05-3,0	51,41	30,42	40,92	—	—	—
To-05-3,5	6,13	5,32	5,73	—	—	—
To-05-4,0	16,01	24,57	20,29	—	—	—
To-10-3,0	16,31	7,12	11,71	—	—	—
To-10-3,5	14,11	10,22	12,16	—	—	—
To-10-4,0	8,58	14,04	11,31	—	—	—

Schlüssel: Ausbaustoff - Emulsion - Bitumenzugabe in M.-%

*Nachweisgrenze

Tabelle E.14: PAK-Konzentrationen in den Eibuten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 1

Bezeichnung	Bz	M.-%	Serie 1			AM	Serie 2					
			AM	0,50	0,75		1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00
Naphthalin	µg/l		46,43	31,71	27,27	31,31	23,32	46,43	18,69	17,90	19,69	33,12
Acenaphthylen	µg/l		2,60	1,13	1,13	1,03	1,19	2,60	0,95	0,86	0,82	1,20
Acenaphthen	µg/l		459,98	287,02	232,66	227,53	168,82	459,98	216,88	163,67	162,53	253,87
Fluoren	µg/l		139,08	86,38	81,09	56,59	52,98	139,08	86,02	54,65	61,84	81,16
Phenanthren	µg/l		203,56	131,90	136,87	117,66	91,45	203,56	122,61	94,85	88,11	124,78
Anthracen	µg/l		25,52	134,26	124,65	11,15	10,15	25,52	10,79	9,53	8,64	128,74
Fluoranthren	µg/l		28,31	21,56	21,62	19,28	18,34	28,31	19,31	15,56	14,75	20,03
Pyren	µg/l		17,93	13,91	13,55	12,89	11,38	17,93	13,43	9,73	8,83	13,22
Benzo(a)anthracen	µg/l		2,20	3,51	3,75	3,95	3,62	2,20	3,57	2,81	2,49	3,56
Chrysen	µg/l		0,93	1,77	1,86	1,89	1,90	0,93	1,64	1,35	1,27	1,76
Benzo(b)fluoranthren	µg/l		0,53	2,76	2,93	3,45	3,59	0,53	4,39	2,83	3,96	2,53
Benzo(k)fluoranthren	µg/l		0,13	0,63	0,66	0,75	0,81	0,13	0,66	0,68	0,58	0,63
Benzo(a)pyren	µg/l		0,27	1,44	1,61	2,09	2,08	0,27	1,47	1,59	1,40	1,41
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l		0,15	0,27	0,16	0,30	0,30	0,15	0,29	0,15	0,14	0,14
Benzo(g,h,i)perylene	µg/l		0,05	0,65	0,72	0,80	1,05	0,05	0,67	0,61	0,56	0,71
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l		0,10	0,90	0,95	1,02	1,13	0,10	0,89	1,10	0,82	0,94
PAK _{T24}	µg/l		927,77	719,80	651,48	491,69	392,11	927,77	502,26	377,87	376,43	667,80
rel/PAK _{T24}	%		100,00	77,58	70,22	53,00	42,26	100,00	54,14	40,73	40,57	71,98

Tabelle E.15: PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 2

Bezeichnung	M.-%	Serie 1					Serie 2				
		AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
Naphthalin	µg/l	72,15	29,71	41,65	31,06	30,93	80,41	66,96	64,21	78,09	71,46
Acenaphthylen	µg/l	1,80	1,00	1,02	0,76	0,67	2,16	1,26	1,23	1,52	1,40
Acenaphthen	µg/l	513,80	167,29	253,88	210,57	184,65	562,16	391,03	298,42	434,55	385,07
Fluoren	µg/l	133,84	55,05	70,85	68,00	71,64	199,91	139,08	111,01	157,01	140,66
Phenanthren	µg/l	194,67	70,71	98,89	92,19	71,69	234,10	164,17	124,06	190,53	156,88
Anthracen	µg/l	17,57	8,37	9,14	8,85	7,16	18,73	14,73	11,87	15,62	14,76
Fluoranthren	µg/l	29,71	12,67	15,25	9,23	8,60	35,39	25,31	18,78	31,38	25,43
Pyren	µg/l	19,93	7,27	8,74	7,18	6,45	22,23	14,94	11,10	15,71	13,88
Benzo(a)anthracen	µg/l	2,75	1,42	1,46	1,37	2,04	2,86	2,33	1,54	5,15	3,73
Chrysen	µg/l	0,85	0,59	0,64	0,63	0,95	1,08	0,94	0,71	2,41	1,69
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,38	1,18	0,71	0,56	1,45	0,80	0,88	0,55	3,11	1,47
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,06	0,22	0,13	0,20	0,54	0,14	0,19	0,13	0,72	0,34
Benzo(a)pyren	µg/l	0,14	0,42	0,24	0,19	0,54	0,30	0,34	0,19	1,22	0,70
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	0,01	0,07	0,03	0,03	0,08	0,00	0,00	0,00	0,33	0,24
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	0,03	0,29	0,17	0,16	0,42	0,13	0,19	0,12	0,87	0,31
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	0,04	0,34	0,18	0,16	0,46	0,10	0,16	0,07	0,96	0,31
PAK ₇₂₄	µg/l	987,71	356,59	502,96	431,14	388,26	1160,48	822,52	643,99	939,17	818,33
relPAK ₇₂₄	%	100,00	36,10	50,92	43,65	39,31	100,00	70,88	55,49	80,93	70,52

Tabelle E.16: PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 3

Bezeichnung	Serie 1				Serie 2					
	AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
<i>Bz</i>	M.-%									
Naphthalin	µg/l	54,92	39,07	40,05	35,77	31,72	69,53	63,83	46,39	45,92
Acenaphthylen	µg/l	2,55	1,49	1,39	1,23	0,69	1,54	1,47	1,30	1,18
Acenaphthen	µg/l	514,71	303,58	291,74	219,65	205,23	423,20	388,17	299,59	259,71
Fluoren	µg/l	145,34	78,92	87,79	74,61	62,46	145,69	146,08	93,96	86,71
Phenanthren	µg/l	202,58	104,18	102,33	81,36	74,63	192,57	176,23	129,42	102,45
Anthracen	µg/l	21,53	13,00	12,19	11,26	8,29	17,59	14,43	11,42	9,47
Fluoranthren	µg/l	31,52	16,04	15,31	12,07	10,37	29,09	22,92	17,60	15,00
Pyren	µg/l	20,82	10,60	9,69	7,54	5,73	14,15	10,97	10,91	8,89
Benzo(a)anthracen	µg/l	2,75	1,30	1,32	0,96	1,05	2,86	2,58	1,94	1,55
Chrysen	µg/l	1,03	0,72	0,76	0,59	0,49	1,08	0,90	0,83	0,98
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,30	0,15	0,15	0,08	0,54	0,80	0,55	0,46	0,61
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,05	0,02	0,02	0,01	0,09	0,14	0,12	0,10	0,13
Benzo(a)pyren	µg/l	0,13	0,10	0,12	0,06	0,16	0,30	0,26	0,19	0,47
Dibenz(a,h)anthracen	µg/l	0,01	0,04	0,04	0,00	0,02	0,00	0,20	0,03	0,02
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	0,04	0,02	0,01	0,02	0,12	0,13	0,13	0,09	0,15
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	0,05	0,04	0,06	0,03	0,15	0,10	0,09	0,18	0,11
<i>PAK_{T24}</i>	µg/l	998,33	569,23	562,92	445,21	401,75	1160,48	898,21	615,56	533,19
<i>relPAK_{T24}</i>	%	100,00	57,02	56,39	44,60	40,24	100,00	77,40	53,04	45,95

Tabelle E.17: PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 4

Bezeichnung	M.-%	Serie 1					Serie 2				
		AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
Naphthalin	µg/l	72,15	60,02	48,76	46,71	49,69	84,88	50,68	49,50	34,36	36,87
Acenaphthylen	µg/l	1,80	1,63	1,11	0,95	0,98	4,58	1,57	1,49	1,42	1,24
Acenaphthen	µg/l	513,80	331,51	299,91	234,40	237,27	568,94	402,51	385,79	298,85	242,42
Fluoren	µg/l	133,84	91,61	85,12	75,09	72,59	174,83	113,07	115,30	97,80	90,01
Phenanthren	µg/l	194,67	130,37	136,77	103,75	103,70	234,72	170,33	155,47	118,25	99,99
Anthracen	µg/l	17,57	11,70	13,30	12,05	11,65	19,26	15,13	16,32	15,33	12,44
Fluoranthren	µg/l	29,71	18,02	20,87	15,29	15,76	31,93	23,48	23,51	18,44	15,48
Pyren	µg/l	19,93	11,69	11,49	8,60	9,08	19,40	15,06	13,77	11,00	9,31
Benzo(a)anthracen	µg/l	2,75	1,89	1,54	1,20	1,33	2,30	2,22	2,13	1,87	1,53
Chrysen	µg/l	0,85	0,70	0,78	0,65	0,74	0,88	1,17	1,24	1,14	0,95
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,38	0,33	0,33	0,39	0,51	0,19	0,97	0,95	1,00	0,79
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,06	0,05	0,08	0,09	0,13	0,02	0,08	0,10	0,15	0,06
Benzo(a)pyren	µg/l	0,14	0,13	0,13	0,15	0,20	0,10	0,46	0,44	0,44	0,33
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,73	0,73	0,72	0,74
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	0,03	0,05	0,04	0,05	0,09	0,00	0,22	0,22	0,22	0,23
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	0,04	0,06	0,04	0,06	0,11	0,00	0,38	0,38	0,37	0,38
PAK ₇₊₄	µg/l	987,71	659,75	620,27	499,44	503,83	1142,02	798,04	767,33	601,33	512,76
relPAK ₇₊₄	%	100,00	66,80	62,80	50,57	51,01	100,00	69,88	67,19	52,65	44,90

Tabelle E.18: PAK-Konzentrationen in den Eluatn des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 5

Bezeichnung	Bz	M.-%	Serie 1				Serie 2					
			AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
Naphthalin	µg/l		62,45	38,71	41,60	40,13	33,95	58,16	50,46	43,09	38,91	36,72
Acenaphthylen	µg/l		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,57	0,97	0,81	0,69	0,71
Acenaphthen	µg/l		492,38	282,10	287,97	258,99	209,20	405,57	308,23	241,96	208,46	200,62
Fluoren	µg/l		156,92	79,90	88,32	78,16	72,04	114,80	99,47	78,67	72,18	75,79
Phenanthren	µg/l		199,73	103,45	100,80	94,96	77,93	168,15	131,62	114,37	90,38	91,85
Anthracen	µg/l		23,50	13,32	14,35	13,45	10,34	14,46	12,83	11,47	10,31	10,58
Fluoranthren	µg/l		30,61	16,74	17,57	16,64	14,46	24,66	22,91	23,06	17,88	13,71
Pyren	µg/l		19,78	9,30	10,45	10,05	8,55	16,44	15,47	15,70	12,08	8,80
Benzo(a)anthracen	µg/l		2,70	1,68	2,79	2,95	2,79	2,12	3,02	4,45	3,97	1,71
Chrysen	µg/l		1,14	0,98	2,01	2,17	2,08	0,94	1,79	2,89	2,82	1,21
Benzo(b)fluoranthren	µg/l		0,29	0,47	2,69	2,53	2,30	0,64	1,74	3,50	3,63	1,15
Benzo(k)fluoranthren	µg/l		0,05	0,08	0,66	0,59	0,59	0,12	0,50	1,07	1,09	0,28
Benzo(a)pyren	µg/l		0,16	0,38	1,60	1,57	1,50	0,25	1,08	2,16	2,29	0,56
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l		0,06	0,07	0,25	0,20	0,15	0,02	0,12	0,19	0,27	0,06
Benzo(g,h,i)perylene	µg/l		0,04	0,16	0,88	0,76	0,56	0,10	0,58	0,89	1,26	0,34
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l		0,06	0,17	1,17	1,02	0,64	0,13	0,60	1,01	1,55	0,38
PAK _{T24}	µg/l		989,85	547,49	573,08	524,14	437,04	808,14	651,39	545,28	467,74	444,48
rel/PAK _{T24}	%		100,00	55,31	57,90	52,95	44,15	100,00	80,60	67,47	57,88	55,00

Tabelle E.19: PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 6

Bezeichnung	Serie 1					Serie 2				
	AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
Naphthalin	57,71	40,94	31,63	27,50	26,45	79,28	57,84	53,52	42,54	31,30
Acenaphthylen	0,82	2,30	1,64	1,36	1,36	2,42	1,62	1,35	1,41	1,15
Acenaphthen	409,14	315,13	257,16	199,87	217,28	478,47	354,41	304,93	242,87	215,76
Fluoren	145,24	101,73	73,44	63,28	67,92	160,01	125,70	105,00	72,95	55,96
Phenanthren	184,55	112,47	95,12	74,53	81,83	204,45	135,95	140,53	100,54	100,27
Anthracen	16,18	14,01	12,02	10,15	10,52	15,56	13,99	12,80	11,08	10,70
Fluoranthren	26,55	18,52	16,44	13,18	13,26	31,11	21,39	26,07	15,25	13,86
Pyren	16,48	11,40	10,13	8,32	8,29	20,70	13,62	17,45	11,20	8,45
Benzo(a)anthracen	4,08	2,15	2,84	2,49	2,43	2,65	1,83	5,70	3,34	1,58
Chrysen	0,91	1,36	2,07	1,92	1,91	1,17	0,82	3,67	2,28	0,70
Benzo(b)fluoranthren	0,86	1,11	2,27	2,01	1,88	0,63	0,33	5,42	3,10	0,60
Benzo(k)fluoranthren	0,22	0,34	0,71	0,69	0,55	0,11	0,04	1,24	0,68	0,17
Benzo(a)pyren	0,35	0,80	1,81	1,59	1,37	0,26	0,12	3,04	1,67	0,32
Dibenzo(a,h)anthracen	0,04	0,17	0,33	0,34	0,28	0,02	0,01	0,42	0,21	0,15
Benzo(g,h,i)perylene	0,17	0,47	0,43	0,94	0,80	0,09	0,04	2,06	0,59	0,11
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,26	0,54	0,54	1,13	0,91	0,11	0,04	2,00	1,18	0,17
PAK _{T24}	863,55	623,38	508,54	409,26	436,98	997,02	727,76	685,21	510,87	441,22
relPAK _{T24}	100,00	72,19	58,89	47,39	50,60	100,00	72,99	68,73	51,24	44,25

Tabella E.20: PAK-Konzentrationen in den Eibuten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 7

Bezeichnung	Serie 1				Serie 2					
	AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
Naphthalin	57,71	50,66	48,17	46,10	39,11	79,28	61,16	43,35	48,19	28,49
Acenaphthylen	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	2,42	0,98	0,77	0,85	1,49
Acenaphthen	409,14	278,49	253,91	229,58	201,97	478,47	253,06	190,62	192,36	177,83
Fluoren	145,24	96,30	78,05	87,30	75,10	160,01	93,26	70,05	73,97	46,85
Phenanthren	184,55	136,20	111,35	113,60	90,28	204,45	106,08	80,49	83,20	78,65
Anthracen	16,18	11,15	9,15	9,40	9,50	15,56	12,32	9,52	9,46	8,35
Fluoranthren	26,55	17,12	13,69	13,17	11,18	31,11	14,65	10,55	10,37	11,09
Pyren	16,48	8,33	6,60	6,43	6,49	20,70	9,30	6,73	6,42	6,82
Benzo(a)anthracen	4,08	2,45	1,91	1,91	1,31	2,65	1,24	0,99	1,00	1,13
Chrysen	0,91	0,49	0,44	0,47	0,53	1,17	0,65	0,51	0,56	0,58
Benzo(b)fluoranthren	0,86	0,21	0,14	0,14	0,24	0,63	0,31	0,22	0,33	0,46
Benzo(k)fluoranthren	0,22	0,05	0,04	0,05	0,06	0,11	0,06	0,05	0,06	0,15
Benzo(a)pyren	0,35	0,08	0,07	0,06	0,10	0,26	0,09	0,08	0,11	0,27
Dibenzo(a,h)anthracen	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,14
Benzo(g,h,i)perylene	0,17	0,04	0,04	0,04	0,06	0,09	0,04	0,02	0,05	0,08
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,26	0,08	0,08	0,09	0,07	0,11	0,06	0,03	0,08	0,14
PAK _{T24}	863,55	601,65	523,66	508,35	436,03	997,02	553,24	413,98	427,03	362,49
rel/PAK _{T24}	100,00	69,67	60,64	58,87	50,49	100,00	55,49	41,52	42,83	36,36

Tabelle E.21: PAK-Konzentrationen in den Eluaten des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 9

Bezeichnung	M-%	Serie 1					Serie 2				
		AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
Naphthalin	µg/l	54,92	38,70	48,48	32,29	36,11	84,88	45,73	39,57	33,82	37,73
Acenaphthylen	µg/l	2,55	1,55	1,49	1,21	1,18	4,58	1,29	1,27	1,16	1,08
Acenaphthen	µg/l	514,71	275,05	314,99	246,18	246,15	568,94	371,29	348,92	301,79	275,36
Fluoren	µg/l	145,34	78,91	97,73	76,30	82,13	174,83	109,30	121,85	98,64	83,04
Phenanthren	µg/l	202,58	95,01	99,02	75,26	93,79	234,72	174,66	151,26	146,61	115,75
Anthracen	µg/l	21,53	12,53	14,30	11,65	12,60	19,26	14,29	15,08	13,21	12,44
Fluoranthren	µg/l	31,52	14,65	19,96	12,85	18,88	31,93	32,86	30,36	27,33	22,21
Pyren	µg/l	20,82	8,97	10,23	7,75	13,83	19,40	20,15	19,88	18,71	10,65
Benzo(a)anthracen	µg/l	2,75	1,25	1,59	1,29	3,32	2,30	5,02	5,55	4,34	2,07
Chrysen	µg/l	1,03	0,71	1,02	0,88	2,19	0,88	3,35	3,86	2,91	1,16
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,30	0,20	0,50	0,51	2,03	0,19	4,04	4,64	2,99	1,04
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,05	0,02	0,07	0,09	0,38	0,02	0,71	0,96	0,54	0,06
Benzo(a)pyren	µg/l	0,13	0,12	0,31	0,32	1,14	0,10	2,37	2,70	1,76	0,57
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	0,01	0,01	0,01	0,02	0,09	0,00	0,89	0,89	0,87	0,80
Benzo(g,h,i)perylen	µg/l	0,04	0,05	0,16	0,11	0,42	0,00	1,00	0,95	0,75	0,22
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	0,05	0,06	0,18	0,19	0,53	0,00	1,26	1,20	0,97	0,41
PAK ₇₊₄	µg/l	998,33	527,79	610,01	466,91	514,74	1142,02	788,20	748,91	656,39	564,59
relPAK ₇₊₄	%	100,00	52,87	61,10	46,77	51,56	100,00	69,02	65,58	57,48	49,44

Table E.22: PAK-Konzentrationen in den Eluatn des pechhaltigen Labormischgutes umhüllt mit Emulsion Nr. 10

Bezeichnung	Serie 1				Serie 2					
	AM	0,50	0,75	1,00	1,25	AM	0,50	0,75	1,00	1,25
Naphthalin	60,52	41,30	37,44	29,14	26,02	58,16	51,41	46,43	43,89	42,88
Acenaphthylen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,57	1,03	0,96	0,77	0,81
Acenaphthen	454,98	275,67	275,52	198,67	145,87	405,57	287,33	232,83	207,64	194,64
Fluoren	145,77	97,09	84,60	73,65	55,10	114,80	95,84	77,39	64,55	62,05
Phenanthren	203,05	118,40	97,96	83,55	60,39	168,15	116,88	98,21	89,17	77,24
Anthracen	22,18	12,47	12,80	10,11	8,27	14,46	12,92	11,60	11,05	8,93
Fluoranthren	36,78	16,38	15,43	10,69	8,17	24,66	16,63	14,12	18,86	10,83
Pyren	23,52	9,49	9,17	5,67	4,30	16,44	10,38	8,60	12,25	6,65
Benzo(a)anthracen	3,54	1,62	1,61	0,65	0,72	2,12	1,33	1,20	1,52	1,07
Chrysen	1,09	0,57	0,57	0,62	0,52	0,94	0,65	0,60	0,85	0,54
Benzo(b)fluoranthren	0,37	0,14	0,18	0,16	0,12	0,64	0,24	0,23	0,43	0,18
Benzo(k)fluoranthren	0,09	0,04	0,04	0,04	0,03	0,12	0,05	0,05	0,11	0,03
Benzo(a)pyren	0,14	0,07	0,08	0,09	0,09	0,25	0,08	0,09	0,15	0,06
Dibenzo(a,h)anthracen	0,03	0,02	0,02	0,06	0,06	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00
Benzo(g,h,i)perylene	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04	0,10	0,03	0,03	0,09	0,03
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,13	0,04	0,04	0,12	0,04
PAK _{T24}	952,17	573,33	535,51	413,17	309,73	808,14	594,83	492,37	451,48	405,97
rel/PAK _{T24}	100,00	60,21	56,24	43,39	32,53	100,00	73,60	60,93	55,87	50,24

