

Forschungsbericht Nr. 2/02 / B 012 i/e

Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Praxisversuch/Mischtechnik

M. Schneider, K. Schellenberg, H.-J. Ritter, H.-M. Schiffner

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

AIF-Nr **12542 N**

Forschungsstelle 1: Forschungsinstitut der
Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.
 Annastr.67-71
 50968 Köln

Forschungsstelle 2: Institut für Materialprüfung
 Dr.-Ing. Schellenberg
 Rottweiler Str. 13
 78628 Rottweil

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichungen und Vervielfältigungen - auch auszugsweise - nur mit Genehmigung der
Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.

Diese Forschungsarbeit wurde mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft (BMWi) im Rahmen eines von der
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AIF) durchgeführten Forschungsvorhabens gefördert.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	4
TABELLENVERZEICHNIS	4
KURZFASSUNG.....	6
0 EINFÜHRUNG	9
0.1 PROBLEMSTELLUNG	9
0.2 ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS	10
0.3 BESCHREIBUNG DER BEOBACHTUNGSSTRECKEN.....	10
0.4 ADMINISTRATIVES.....	11
1 METHODIK DES VORGEHENS	12
2 BEOBACHTUNGSSTRECKEN.....	15
2.1 BEOBACHTUNGSSTRECKE SMA 0/8 S BEI DUBLINGEN (B 27)	15
2.1.1 <i>Durchführung der Eignungsprüfungen.....</i>	<i>15</i>
2.1.1.1 Verwendete Ausgangsstoffe	15
2.1.1.2 Durchführung und Ergebnisse der Eignungsprüfungen	16
2.1.1.3 Bewertung der Eignungsprüfungen	22
2.1.1.4 Zusätzliche Untersuchungen und Ergebnisse der Eignungsprüfungen	22
2.1.2 <i>Großtechnische Herstellung des SMA-Asphalts</i>	<i>26</i>
2.1.2.1 Mischanlage.....	26
2.1.2.2 Herstellung der Deckschicht.....	26
2.1.3 <i>Durchführung und Ergebnisse der Kontrollprüfung</i>	<i>28</i>
2.1.4 <i>Aufnahme IST-Zustand der Beobachtungsstrecke nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer</i>	<i>30</i>
2.1.4.1 Bewertung der einzelnen Felder	31
2.1.4.2 Gesamtbewertung der Beobachtungsstrecke	31
2.1.5 <i>Durchführung und Ergebnisse der 1. Nachuntersuchung 2002</i>	<i>31</i>
2.1.6 <i>Eigenschaften des SMA 0/8 S nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer (Zusammenfassung)</i>	<i>34</i>

2.2	VERSUCHSSTRECKE BEI BRÄUNLINGEN (L 181) AUS AB 0/11	35
2.2.1	<i>Durchführung der Eignungsprüfungen</i>	35
2.2.1.1	Verwendete Ausgangsstoffe	35
2.2.1.2	Durchführung und Ergebnisse der Eignungsprüfungen	35
2.2.1.3	Bewertung der Eignungsprüfung	40
2.2.1.4	Zusätzliche Untersuchung und Ergebnisse der Eignungsprüfungen	40
2.2.2	<i>Großtechnische Herstellung</i>	44
2.2.2.1	Aufnahme der Mischtechnik	44
2.2.2.2	Herstellung der Deckschicht	45
2.2.3	<i>Durchführung und Ergebnisse der Kontrollprüfung</i>	46
2.2.4	<i>Aufnahme IST-Zustand der Beobachtungsstrecke nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer</i>	49
2.2.4.1	Bewertung der einzelnen Felder	49
2.2.4.2	Gesamtbewertung der Beobachtungsstrecke	49
2.2.5	<i>Durchführung und Ergebnisse der 1. Nachuntersuchung 2002</i>	49
2.2.6	<i>Die Eigenschaften des AB 0/11 nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer (Zusammenfassung)</i>	52
3	NACHWEIS VON KALKHYDRAT IM ASPHALTMISCHGUT	53
3.1	EINFÜHRUNG	53
3.2	BESCHREIBUNG DER FÜLLER UND DES KALKHYDRATES	53
3.3	NACHWEISVERFAHREN	55
3.3.1	<i>Beschreibung der Verfahren</i>	55
3.3.2	<i>Überprüfung der Eignung der Verfahren an Kalkhydraten und Füllermischungen</i>	56
3.3.3	<i>Überprüfung der Eignung der Verfahren an extrahierten Asphaltmischungen</i> ..	58
3.3.4	<i>Leitfähigkeitsmessungen</i>	67
3.4	ANALYSEN DER ASPHALTE DER BEOBACHTUNGSSTRECKEN – EINBAUMISCHGUT UND BOHRKERNE	69
3.5	BEWERTUNG DER ANALYSENVERFAHREN	70
3.6	ZUSAMMENFASSUNG	71
4	ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNG	74

5	AUSBLICK.....	81
	LITERATURVERZEICHNIS	82
	ANHANG	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sieblinie SMA 0/8 S ohne Kalkhydrat.....	16
Abbildung 2: Sieblinie SMA 0/8 S mit Kalkhydrat	20
Abbildung 3: Sieblinie AB 0/11 ohne Kalkhydrat	36
Abbildung 4: Sieblinie AB 0/11 mit Kalkhydrat	38
Abbildung 5: Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern bei der Titrationsmethode	62
Abbildung 6: Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern bei der Zuckermethode	63
Abbildung 7: Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern bei der Esterextraktionsmethode	63
Abbildung 8: gemittelte Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennwerte der Eignungsprüfung der Mischung SMA 0/8 S ohne Kalkhydrat	18
Tabelle 2: Kennwerte der Eignungsprüfung des SMA-Asphalts mit Kalkhydrat.....	21
Tabelle 3: Vergleich der Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt des SMA 0/8 S.....	22
Tabelle 4: Verdichtbarkeit anhand des Hohlraumgehalts der Mischung SMA 0/8 S	23
Tabelle 5: Volumetrische Kennwerte der Mischung SMA 0/8 S bei Normverdichtung	23
Tabelle 6: Quellung der Mischung SMA 0/8 S.....	24
Tabelle 7: Abkühlversuch der Mischung SMA 0/8 S	24
Tabelle 8: Zugviskosität der Mischung SMA 0/8 S.....	25
Tabelle 9: Zugfestigkeit vor und nach Wasserlagerung der Mischung SMA 0/8 S.....	26
Tabelle 10: Temperaturen Asphaltmischgut SMA 0/8 S im Mischwerk und beim Einbau.....	27
Tabelle 11: Raumdichten beim Einbau von SMA 0/8 S mittels Isotopensonde	28
Tabelle 12: Vergleich der Sollwerte mit den Istwerten der Mischung SMA 0/8 S	28
Tabelle 13: EP RuK des Mischgutes SMA 0/8 S.....	29
Tabelle 14: Hohlraumgehalt am MPK, am Bohrkern und Verdichtungsgrad des SMA 0/8 S Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert:.....	29
Tabelle 15: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK des SMA 0/8 S.....	30
Tabelle 16: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch des SMA 0/8 S.....	30
Tabelle 17: Vergleich der Sollwerte mit den Istwerten der Mischung SMA 0/8 S (1.Nachuntersuchung 2002)	32
Tabelle 18: EP RuK des Mischgutes SMA 0/8 S (1. Nachuntersuchung 2002).....	32
Tabelle 19: Hohlraumgehalt am MPK und Bohrkern der Mischung SMA 0/8 S (1.Nachuntersuchung 2002)	33
Tabelle 20: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK der Mischung SMA 0/8 S (1.Nachuntersuchung 2002)	33
Tabelle 21: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch der Mischung SMA 0/8 S (1. Nachuntersuchung 2002)	34
Tabelle 22: Zugviskosität der Mischung SMA 0/8 S (1. Nachuntersuchung 2002).....	34
Tabelle 23: Kennwerte der Eignungsprüfung der Mischung AB 0/11 ohne Kalkhydrat.....	37
Tabelle 24: Kennwerte der Eignungsprüfung der Mischung AB 0/11 mit Kalkhydrat	39
Tabelle 25: Vergleich der Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt des AB 0/11	40
Tabelle 26: Verdichtbarkeit anhand des Hohlraumgehalts der Mischung AB 0/11	41
Tabelle 27: Volumetrische Kennwerte der Mischung AB 0/11 bei Normverdichtung	41
Tabelle 28: Quellung der Mischung AB 0/11	42

Tabelle 29: Abkühlversuch der Mischung AB 0/11	42
Tabelle 30: Zugviskosität der Mischung AB 0/11	43
Tabelle 31: Zugfestig vor und nach Wasserlagerung der Mischung AB 0/11	44
Tabelle 32: Temperaturen Asphaltmischgut AB 0/11 im Mischwerk und beim Einbau	45
Tabelle 33: Raumdichten gemessen beim Einbau von AB 0/11 mit der Isotopsonde	46
Tabelle 34: Vergleich der Sollwerte zu den Istwerten beim AB 0/11	46
Tabelle 35: EP RuK des Mischgutes AB 0/11	47
Tabelle 36: Hohlraumgehalt am MPK und Bohrkern beim AB 0/11	47
Tabelle 37: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK beim AB 0/11.....	48
Tabelle 38: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch beim AB 0/11	48
Tabelle 39: Vergleich der Sollwerte mit den Istwerten beim AB 0/11	49
Tabelle 40: EP RuK des Mischgutes AB 0/11	50
Tabelle 41: Hohlraumgehalt am MPK und Bohrkern beim AB 0/11	50
Tabelle 42: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK beim AB 0/11.....	51
Tabelle 43: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch beim AB 0/11	51
Tabelle 44: Zugviskosität beim AB 0/11	52
Tabelle 45: Charakteristische Daten der Füller.....	54
Tabelle 46: Ausgewählte Daten der chemischen Vollanalyse der Füller	55
Tabelle 47: Bestimmungen von Calciumhydroxid an Kalkhydraten	57
Tabelle 48: Analysen von Mischfüllern mit Titrations- und Esterextraktionsmethode.....	58
Tabelle 49: Zusammensetzung der im Labor hergestellten Asphaltmischungen.....	59
Tabelle 50: Messwerte an extrahierten Füllerproben mit der Titrationsmethode	61
Tabelle 51: Messwerte an extrahierten Füllerproben mit der Zuckermethode	61
Tabelle 52: Messwerte an extrahierten Füllerproben mit der Esterextraktionsmethode	61
Tabelle 53: Analysen aus dem Glührückstand – extrahierte Füller	65
Tabelle 54: Analysen aus dem Glührückstand – reine Füller	66
Tabelle 55: Wiederfindungsraten bei den drei Analysenverfahren im Vergleich mit den CaO- Werten aus Vollanalysen.....	66
Tabelle 56: Leitfähigkeitsmessungen an Kalkhydraten	68
Tabelle 57: Analyse der Einbaugemische der B 27	69
Tabelle 58: Analyse der Bohrkern der B 27 nach 1,5 Jahren.....	69
Tabelle 59: Analyse der Einbaugemische der L 181	70
Tabelle 60: Analyse der Bohrkern der L 181 nach 1,5 Jahren	70
Tabelle 61: Vergleich der Ergebnisse des Zugfestigkeitsabfalls	75
Tabelle 62: Vergleich der Ergebnisse des EP RuK.....	76
Tabelle 63: Vergleich der Ergebnisse der Dehnungsrate im einaxialen Druckschwellversuch Kontrollprüfung und 1. Nachuntersuchung 2002.....	77
Tabelle 64: Vergleich der Ergebnisse der Zugviskosität Eignungsprüfung und 1. Nachuntersuchung 2002	78

Kurzfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) geförderten Forschungsvorhabens wurde der Einfluss von Kalkhydrat auf die Asphalteigenschaften in Praxis- und Laborversuchen überprüft und die Nachweisanalytik entwickelt.

In Zusammenarbeit mit den Straßenbauverwaltungen Reutlingen und Donaueschingen wurden 2 Beobachtungsstrecken ausgewählt. Nach der Vergabe der Baumaßnahmen durch die Straßenbauverwaltungen konnte die Möglichkeit der großtechnischen Herstellung des Mischgutes und der anforderungskonforme Einbau bei den Asphaltproduzenten und den Einbaufirmen beurteilt werden. Die Beobachtungsstrecken wurden jeweils in 4 Felder unterteilt, an denen die Auswirkung des Kalkhydrates auf die Eigenschaften von Asphalt bei zwei verschiedenen Bindemittelmengen untersucht werden konnte. Es wurde festgestellt, dass kein Umbau der Mischanlagen zur Dosierung von Kalkhydrat vorgenommen werden muss, wenn ein Mischfüller (vorgemischter Füller), der aus 50 M.-% Kalksteinmehl und aus 50 M.-% Kalkhydrat besteht, verwendet wird. Hierfür ist nur ein gesondertes Fremdfüllersilo vorzuhalten.

In der ersten Phase wurden Eignungsprüfungen für die beiden Mischgutarten aufgestellt, Splittmastixasphalt (SMA 0/8 S) zum Einbau auf der Bundesstraße B 27 bei Dußlingen und Asphaltbeton (AB 0/11) zum Einbau auf der Umgehungsstraße L 181 bei Bräunlingen. Bei den zusätzlichen Versuchen im Anschluß an die Eignungsprüfung zeigte sich, dass beim einaxialen Zugversuch vor und nach Wassereinwirkung der SMA 0/8 S mit Kalkhydrat nur einen Zugfestigkeitsabfall von 2,4 % aufwies im Gegensatz zu einem Festigkeitsabfall von 8,5 % ohne Zugabe von Kalkhydrat. Deutlicher ist die Wirkung von Kalkhydrat bei AB 0/11 zu erkennen. Einem Festigkeitsabfall von 9,4 % bei Verwendung von Kalkhydrat steht ein Abfall von 47,5 % ohne Kalkhydrat gegenüber. Daraus kann gefolgert werden, dass die Verbesserung des Haftverhaltens zwischen der Gesteinskörnung und dem Bitumen durch Kalkhydrat bei Wassereinwirkung beim Asphaltbeton wegen der geringeren Bindemittelmengen bzw. geringeren Bindemittelfilmdicke stärker ausgeprägt ist wie beim SMA mit den hohen Bindemittelfilmdicken.

Die Ergebnisse aus der Bestimmung des Erweichungspunktes am zurückgewonnenen Bindemittel zeigen, dass die bei der großtechnischen Herstellung des Mischgutes eintretende Bindemittelverhärtung bei Mischungen mit Kalkhydrat vermindert wird und auch nach längerer Liegezeit der Deckschicht keine weitere Verhärtung auftritt.

Nach etwa 1,5 Jahren Liegezeit der eingebauten Asphaltdeckschichten wurden Nachuntersuchungen durchgeführt. Hier wurden die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften gegenüber der Kontrollprüfung und zusätzlich die Änderung der Viskosität gegenüber der Ausgangsmischung untersucht. Die dabei ermittelten Werte der Dehnungsraten im einaxialen Druckschwellversuch zeigen, dass eine deutliche Erhöhung der Stabilität durch den Einsatz von Kalkhydrat nur bei SMA 0/8 S festgestellt werden konnte. Die Unterschiede bei den Standfestigkeiten beim AB 0/11 liegen weitgehend im üblichen Toleranzbereich.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass sich durch die Zugabe von Kalkhydrat die Viskosität des Asphalts im Laufe der Liegezeit erhöht. Dies zeigte sich am deutlichsten bei SMA 0/8 S, wobei derselbe Trend auch bei AB 0/11 zu beobachten ist.

Erstaunlich ist, dass auch bei geringeren Bindemittelzugaben die Eigenschaften Standfestigkeit, Viskosität und EP RuK durch Kalkhydrat derart verbessert werden, dass davon auszugehen ist, dass Schwankungen im Bindemittelgehalt, die gleichzeitig Auswirkungen auf die volumetrischen Eigenschaften haben, durch die Zugabe von Kalkhydrat kompensiert werden können. Da die Liegezeit der Asphaltdeckschichten von 1,5 Jahren nicht ausreicht, sollten weitere Prüfungen angeschlossen werden, um die positiven Auswirkungen der Kalkhydratzugabe auf der Zeitachse noch weiter verfolgen zu können.

Das Nachweisverfahren zur Bestimmung des Kalkhydratgehaltes in Mischfüllern und extrahierten Füllern wurden auf der Basis der in der Kalkanalytik gebräuchlichen Verfahren der Titration mit Salzsäure entwickelt.

Mischungen aus Kalkhydrat und den einzelnen Füllern mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Fülleranteils wurden hergestellt und den Titrationsverfahren unterworfen. Die Ergebnisse belegen, dass diese Verfahren für die Bestimmung von Kalkhydrat in Mischfüllern bei einer Wiederfindungsrate von annähernd 100% geeignet sind.

Im Labor hergestellte Asphaltmischungen mit variierten Fülleranteilen wurden extrahiert und die aufbereiteten Füllerfraktionen wurden mit der Titrationsmethode, der Zuckermethode und der Esterextraktionsmethode analysiert. Eine Modifizierung der Verfahren erfolgte, da die Matrix, in der Kalkhydrat eingebunden ist, Änderungen bei der Probenbehandlung erzwingt. Die drei Prüfverfahren sind auch als Nachweisverfahren für Kalkhydrat in Asphaltmischgut geeignet.

Die Nachweisverfahren wurden nach Verifizierung auf die extrahierten Füller (< 0,09 mm) aus dem Einbaumischgut und den Bohrkernen der Beobachtungsstrecken angewendet. Die Messwerte weisen aus, dass die drei Nachweisverfahren auch auf großtechnisch hergestelltes Asphaltmischgut anzuwenden sind.

Die Analyseergebnisse, der geringere gerätetechnische Aufwand für ein Straßenbaulabor und die Handhabbarkeit zeigen, dass die Titrationsmethode als Referenzverfahren und die Zuckermethode als Alternativverfahren für die erforderlichen Prüfungen im Asphaltstraßenbau festgelegt werden sollten.

Das Vorhaben schafft mit den Ergebnissen der Praxisversuche und der Nachweisanalytik die Voraussetzungen für die Anwendung des Kalkhydrates im Asphalt. Die Ergebnisse sollten durch eine Fortführung der Prüfung der Beobachtungsstrecken längerfristig verifiziert werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Köln, den 26.09.2002

FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT
KALK UND MÖRTEL E.V.

Dr. S.-O. Schmidt

0 Einführung

0.1 Problemstellung

Der Gebrauchswert einer Asphaltbefestigung ist hinsichtlich ihres Widerstandes gegenüber bleibender Verformung, Rissbildung und Verschleiß, verursacht durch zunehmende Verkehrslasten und Witterung, in starkem Maße von den Eigenschaften der zur Herstellung von Asphalt verwendeten Komponenten abhängig. So kann beispielsweise bei Einwirkung von Wasser auf Asphalt der Haftverbund - abhängig von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der verwendeten Mineralstoffe und des eingesetzten Bindemittels - derart geschwächt werden, dass es zu einer Trennung der organischen von der anorganischen Komponente (stripping) kommt. Dieser Vorgang führt zu einem Festigkeitsverlust und erhöhtem Verschleiß (Substanzverlust) und damit zu einer stark verkürzten Nutzungsdauer der Asphaltbefestigung.

Bereits in den sechziger und siebziger Jahren war die quellungshemmende Wirkung von freien Calciumionen an Asphalten festgestellt worden. Weitere Untersuchungen zeigten auf, dass auch das Haftvermögen zwischen Mineralstoff und Bindemittel und das Alterungsverhalten durch die Zugabe von Kalkhydrat verbessert werden kann [3]. Die gewählten Untersuchungsmethoden, auf die sich diese Erkenntnisse stützen, basieren im wesentlichen auf chemischen Analysen und einfachen Untersuchungen an Bindemitteln bzw. Bindemittel-Füllergemischen selbst.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen geförderten Forschungsvorhabens „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat“ AiF-Nr. 10565 N [2] konnte die quellungshemmende Wirkung von freien Calciumionen sowie eine Verbesserung des Haftvermögens zwischen Mineralstoff und Bindemittel und eine Verbesserung der Altersbeständigkeit des bituminösen Mörtels durch den Einsatz von Kalkhydrat im Laboratorium nachgewiesen werden. Langzeitversuche mit Erfahrungen aus der Praxis liegen derzeit nicht vor. In [1] wird eine Vorgehensweise beschrieben, die zu dem Schluss kommt, dass „Asphalte mit haftkritischen Mineralstoffen unter Mitverwendung von Kalkhydrat und Straßenbaubitumen vergleichbar mit einem Asphalt mit haftkritischen Mineralstoffen und einem PmB der Sorte A

sind“. Dabei werden jedoch keine Unterscheidungen getroffen, welche Eigenschaften vom Bindemittel oder vom Kalkhydrat positiv verändert werden.

0.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Mit diesem Forschungsvorhaben sollen die im Laboratorium gefundenen Zusammenhänge unter Praxisbedingungen im Rahmen von zwei Beobachtungsstrecken untersucht und bestätigt werden. Darüber hinaus ist ein Verfahren zu entwickeln, welches geeignet ist, Kalkhydrat im Asphalt nachzuweisen, da nur so wirtschaftliche und qualitative Interessen vereinigt werden können. Bei Lösung dieser Aufgabenstellung kann eine Qualitätsverbesserung des Baustoffs Asphalt und eine längere Nutzungsdauer der Straßen erreicht werden. Durch den Einsatz von Kalkhydrat können auch regional vorhandene, natürlich vorkommende oder als industrielle Nebenprodukte anfallende Mineralstoffe, die bisher nicht für die Asphaltherstellung verwendet werden konnten, eingesetzt werden.

0.3 Beschreibung der Beobachtungsstrecken

Aus technischen Gründen war es nicht möglich, die ursprüngliche Idee zu verwirklichen, die beiden Beobachtungsstrecken im Rahmen einer Baumaßnahme zu realisieren. Deshalb war es notwendig zwei Beobachtungsstrecken anzulegen. Die Straßenbauämter Reutlingen und Donaueschingen waren bereit im Rahmen entsprechender Baumaßnahmen jeweils eine Beobachtungsstrecke einzurichten.

Für diesen Forschungsauftrag wurden im Jahre 2000 zwei Beobachtungsstrecken angelegt. Hierbei handelt es sich um eine Strecke mit Splittmastixasphalt (SMA 0/8S) auf der B 27 und eine Strecke mit Asphaltbeton (AB 0/11) auf der L 181. Eine Beobachtungsstrecke besteht aus 4 Feldern, bezeichnet als Feld 1-4 auf der B 27 und Feld A-D auf der L 181. Dabei gilt folgende Vorgabe für die Zusammensetzung des Mischguts:

- Feld 1 bzw. Feld A: keine Zugabe von Kalkhydrat und ein aus der Eignungsprüfung abgeleiteter optimaler Bindemittelgehalt

- Feld 2 bzw. Feld B: keine Zugabe von Kalkhydrat und Zugabe eines um 0,3 M.-% reduzierten Bindemittelgehaltes im Vergleich zu Feld 1
- Feld 3 bzw. Feld C: Zugabe von Kalkhydrat und Zugabe eines um 0,3 M.-% reduzierten Bindemittelgehaltes
- Feld 4 bzw. Feld D: Zugabe von Kalkhydrat und Zugabe des aus der Eignungsprüfung abgeleiteten optimalen Bindemittelgehaltes

Die erste Beobachtungsstrecke wurde mit 4 Testfeldern in der Umgehungsstraße L 181 bei Bräunlingen angelegt. Dabei handelt es sich um eine Straße der Bauklasse III. Die Deckschicht besteht aus Asphaltbeton 0/11 (AB 0/11). Der Einbau erfolgte am 31.07.2000. Die Strecke befindet sich in einer sonnigen Lage auf freier Strecke mit einer Steigung von maximal 1 %. Die Querneigung wechselt zwischen 2,5 und 5,0 %, sie wird in der vorhandenen Linkskurve nicht verwunden.

Die zweite Beobachtungsstrecke mit ebenfalls 4 Testfeldern liegt in der Bundesstraße B 27 bei Dußlingen Fahrtrichtung Hechingen. Diese Strecke entspricht der Bauklasse II. Die Deckschicht wurde in Splittmastixasphalt 0/8 S (SMA 0/8 S) am 29.08.2000 ausgeführt. Die Steigung der Beobachtungsstrecke beträgt maximal 4,5 % bei einer geringen Querneigung zwischen 0,2 und 0,6 %. Die Entwässerungsrichtung wechselt in den Feldern 3 und 4.

0.4 Administratives

Das vorliegende Forschungsvorhaben „Verbesserung von Asphalteeigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Praxisversuch/Mischtechnik“ wurde von der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V. in Köln über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) in Köln dem Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) zur Förderung im Rahmen der Gemeinschaftsforschung eingereicht. Als ausführende Forschungsstellen wurden das Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V. und das Institut für Materialprüfung Dr. Schellenberg GbR benannt.

Bei diesem Forschungsvorhaben handelt es sich um die Weiterführung des 1998 abgeschlossenen Forschungsthemas „Verbesserung von Asphalteeigenschaften durch Zugabe von Kalk-

hydrat“ (AiF-Nr. 10656). Die in diesem Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse aus dem Laboratorium sollen daraufhin weiter untersucht werden, ob sie auch in der Praxis, im Langzeitverhalten der Asphaltdeckschichten, Gültigkeit haben.

1 Methodik des Vorgehens

Nach Festlegung der Beobachtungsstrecken wurden Eignungsprüfungen für diese Strecken erstellt. Hierfür wurden drei Bindemittelgehalte unter Verwendung von Eigenfüller und Mischfüller (Kalksteinmehl/Kalkhydrat-Mischung – KStM/KH)) untersucht und der optimale Bindemittelgehalt festgelegt. Zum Einsatz kamen für den SMA 0/8 S ein Bitumen 50/70 (B 65) und für den AB 0/11 ein Bitumen 70/100 (B 80).

Die Zugabe kleiner Mengen an Kalkhydrat in den Mischanlagen wäre nur bei großen Veränderungen an den Anlagen möglich gewesen, deshalb wurde Mischfüller (KStM/KH) eingesetzt. Dieser Mischfüller, der vorgefertigt von einem Kalksteinmehl- und Kalkproduzenten geliefert wurde, enthält 50 M.-% Kalksteinmehl und 50 M.-% Kalkhydrat. Die Gesamtzugabemenge des Kalkhydrates sollte 2,0 M.-%, bezogen auf das Mineralstoffgemisch, betragen. Als Mineralstoffe wurden werkseigene, güteüberwachte Kiessplitt (Moräne), Kiesbrechsande und ein Natursand (nur im AB 0/11) verwendet. Zur Reduzierung des Eigenfülleranteils wurde beim AB 0/11 anteilig zum ungewaschenen Kiesbrechsand ein gewaschener Kiesbrechsand dosiert. Cellulosefasern wurden nur im SMA 0/8 S verwendet. Die Zugabe erfolgte in Pelletform in einer Menge von 0,3 M.-%. Die Ausgangsstoffe entsprechen den Anforderungen der RG Min-StB 93 [4] und der DIN 1995.

Die Bindemittelmenge war so einzustellen, dass ein Hohlraumgehalt von 3,5 V.-% erreicht wird. Daraus ergeben sich acht Mischgutvarianten in vier Testfeldern in zwei Beobachtungsstrecken.

Die erweiterten Eignungsprüfungen hatten folgenden Umfang:

- Probemischungen mit Variation des Bindemittelgehaltes und Variation der Füllerart
- Bestimmung von Rohdichte und Raumdichte nach Marshall, Marshall-Stabilität und Fließwert

- Ermittlung des Verformungswiderstandes bei hohen Temperaturen mittels einaxialem Druckschwellversuch
- Untersuchung des Erweichungspunkts Ring und Kugel des Ausgangsbindemittels

Anhand dieser Untersuchungen ist die „Nullmischung“ – optimaler Bindemittelgehalt ohne Zugabe von Kalkhydrat festgelegt worden. Analog dazu ergab sich die „Mischung – optimaler Bindemittelgehalt mit Zugabe von Kalkhydrat“. Die Mischungen mit reduziertem Bindemittelgehalt wurden berechnet.

An den Mischungen folgte die Durchführung folgender auf die Lösung der Aufgabenstellung zielgerichteter zusätzlicher Prüfungen:

- Verdichtbarkeit durch Variation der Schlagzahlen
- Quellverhalten an Marshall-Probekörpern (MPK)
- Untersuchung des Viskositäts-Temperaturverhaltens an eigens dafür hergestellten Probekörpern
- Durchführung von Abkühlversuchen
- Bestimmung der einaxialen Zugfestigkeit vor und nach Wasserlagerung

Vor der Herstellung des Mischgutes wurden Mischanlagen ausgesucht, die für die Herstellung des Mischgutes geeignet sind. Während der Anlage der Beobachtungsstrecken wurden die Mischanlagen und die Einbaufirmen bei der ordnungsgemäßen Herstellung der Strecken betreut. Um eine schnelle Alterung des Bindemittels zu erreichen, war die Mischguttemperatur an der oberen zulässigen Grenze zu halten. Die Verdichtung beim Einbau wurde mittels Isotopsonde überwacht. Die Mischguttemperaturen wurden ständig an der Mischanlage und während des Einbaus kontrolliert.

Unmittelbar nach dem Einbau der Deckschichten erfolgte die erste Beprobung. Dabei wurden Mischgutproben und Bohrkern entnommen. Erweiterte Kontrollprüfungen waren in folgendem Umfang vorgesehen:

- Bestimmung von Rohdichte und Raumdichte am MPK und am Bohrkern, Marshall-Stabilität und Fließwert

- Ermittlung des Verformungswiderstandes bei hohen Temperaturen mittels dynamischer Druck-Schwell-Versuche
- Erweichungspunkt Ring und Kugel am rückgewonnenen Bindemittel
- Nachweis der Verwendung des Kalkhydrates

Nach etwa 1,5 Jahren Liegezeit wurde der IST-Zustand der Beobachtungsstrecken anhand von augenscheinlichen Begutachtungen und Aufnahme von Querprofilen bewertet, sowie Bohrkerne entnommen. An diesen Proben sollen Kennwerte ermittelt werden, um die Veränderungen der Asphalteigenschaften in der längeren Liegezeit darstellen zu können.

Hierfür waren folgende Untersuchungen vorgesehen:

- Bestimmung von Rohdichte und Raumdichte am MPK und am Bohrkern, Marshall-Stabilität und Fließwert
- Ermittlung des Verformungswiderstandes bei hohen Temperaturen mittels einaxialem Druckschwellversuch
- Untersuchung des Viskositäts-Temperaturverhaltens an aus Bohrkernen hergestellten Probekörpern
- Erweichungspunkt Ring und Kugel am rückgewonnenen Bindemittel
- Nachweis der Verwendung des Kalkhydrates

Die aus diesen Ergebnissen gewonnenen Erkenntnisse führen zu einer Aussage über die Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat im Langzeitverhalten der Asphaltbefestigung und zum Nachweis der Verwendung des Kalkhydrates.

Sämtliche Messergebnisse wurden ausgewertet und in einen Schlussbericht zusammengefasst.

2 Beobachtungsstrecken

2.1 Beobachtungsstrecke SMA 0/8 S bei Dußlingen (B 27)

2.1.1 Durchführung der Eignungsprüfungen

2.1.1.1 Verwendete Ausgangsstoffe

Aus dem beteiligten Asphaltmischwerk, welches zur Herstellung des SMA 0/8 S vorgesehen war, erhielt das Institut für Materialprüfung Dr. Schellenberg die erforderlichen Ausgangsstoffe zur Durchführung der Eignungsprüfung. Es handelte sich dabei um Moränesplitt und -brechsande sowie Eigenfüller. Die Edelsplitt entsprechen hinsichtlich der Kornzusammensetzung, der Kornform, der Bruchflächigkeit und der Sauberkeit den Anforderungen der geltenden Richtlinien. Der Edelbrechsand ist frei von organischen Verunreinigungen. Beim scharfen Trocknen sind keine Krusten- oder Klumpenbildungen aufgetreten. Seine Überkornanteile liegen unter dem zulässigen Höchstwert. Der Durchgang des Eigenfüllers durch das 0,09 mm-Sieb entspricht den Anforderungen der TL Min-StB 94 [7] an Füller. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Eignungsprüfung sind nach den Angaben des Asphaltmischwerkes die eingesetzten Mineralstoffe im Sinne der RG Min-StB 93 [4] güteüberwacht und für den Straßenbau zugelassen. Die Herstellung der Probemischungen erfolgte mit einem Bitumen 50/70 (B 65) aus den Beständen der Mischanlage. Gemäß ZTV Asphalt-StB 94/98 [9] ist bei Splittmastixasphalt die Zugabe von stabilisierenden Zusätzen erforderlich, um eine Entmischung bei Herstellung, Transport, Einbau und Verdichtung zu verhindern. Im vorgesehenen Mischgut werden die Cellulosefaser als bindemittelfreie Pellets zugegeben. Der Mischfüller aus 50 % Kalksteinmehl und 50 % Kalkhydrat wurde von einem geeigneten Lieferanten bereitgestellt.

2.1.1.2 Durchführung und Ergebnisse der Eignungsprüfungen

In den nach den ZTV Asphalt-StB 94/98 [9] zulässige Sieblinienbereich wurde bei der Mischung ohne Zugabe des Mischfüllers eine Sieblinie festgelegt, die zu folgender Mineralstoffzusammensetzung führte:

Kiesedelsplitt 5/8 (ESP 5/8)	63,0 M.-%
Kiesedelsplitt 2/5 (ESP 2/5)	11,0 M.-%
Kieselbrechsand (EBS 0/2)	16,0 M.-%
Eigenfüller 0/0,09 (EF 0/0,09)	10,0 M.-%

Die Korngrößenverteilung der einzelnen Fraktionen sind im Anhang B.1.1 zusammengestellt.

Die Dosierung ergibt bei der vorliegenden Zusammensetzung der Gesteinskörnungen einen Splittgehalt von 75,1 M.-%, einen Sandanteil von 13,3 M.-% und eine Füllermenge von 11,6 M.-%.

Die Sieblinie des gewählten Mineralstoffgemisches ist in Abbildung 1 eingezeichnet.

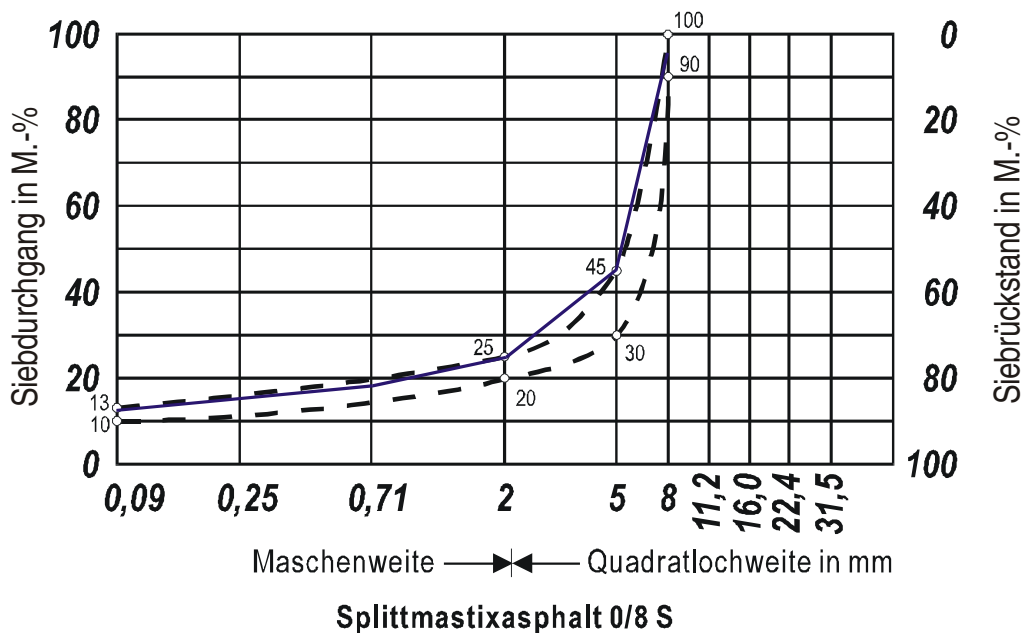


Abbildung 1: Sieblinie SMA 0/8 S ohne Kalkhydrat

Die stabilisierenden Zusätze wurden den Probemischungen zu 0,3 M.-% zugegeben. Variiert wurde der Bindemittelgehalt in 0,3 M.-%-Schritten. Gemäß den ZTV Asphalt-StB 94/98 [9] ist ein Bindemittelgehalt $\geq 7,0$ M.-% anzustreben, wodurch ein Hohlraumgehalt von 3,5 V.-% erreicht werden kann. Die Ergebnisse der Probemischungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Mischung Nr.	1	2	3								
Bindemittelmenge, gesamt in M.-%	7,0	7,3	7,6								
EP RuK in °C	53,0										
Rohdichte, Mineralstoffgemisch in g/cm ³	2,268										
Raumdichte ρ_A in g/cm ³	2,316	2,319	2,329								
Rohdichte ρ_R in g/cm ³	2,411	2,401	2,391								
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	3,9	3,4	2,6								
	<p style="text-align: center;">Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Hohlraumgehalt in V.-%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,0</td> <td>3,9</td> </tr> <tr> <td>7,3</td> <td>3,4</td> </tr> <tr> <td>7,6</td> <td>2,6</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%	7,0	3,9	7,3	3,4	7,6	2,6
Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%										
7,0	3,9										
7,3	3,4										
7,6	2,6										
Ausfüllungsgrad in %	80,1	82,9	86,9								
Bindemittelvolumen B_V in V.-%	15,7	16,4	17,2								
Hohlraumgehalt H_{Mbit} in V.-%	19,6	19,8	19,8								
Marshall-Stabilität in kN	6,8	6,4	6,4								
Marshall-Fließwert in mm	2,8	3,0	3,4								
Ablauftest, Rückstand in M.-%	0,1	0,1	0,1								
Dehnungsrate ϵ_w^* in ‰ / n im einaxialen Druckschwellversuch	$138,1 \cdot 10^{-4}$	$36,29 \cdot 10^{-4}$	$69,03 \cdot 10^{-4}$								
	<p style="text-align: center;">Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Dehnungsrate ϵ_w^* in ‰ / n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,0</td> <td>$138,1 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>7,3</td> <td>$36,29 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>7,6</td> <td>$69,03 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ϵ_w^* in ‰ / n	7,0	$138,1 \cdot 10^{-4}$	7,3	$36,29 \cdot 10^{-4}$	7,6	$69,03 \cdot 10^{-4}$
Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ϵ_w^* in ‰ / n										
7,0	$138,1 \cdot 10^{-4}$										
7,3	$36,29 \cdot 10^{-4}$										
7,6	$69,03 \cdot 10^{-4}$										

Tabelle 1: Kennwerte der Eignungsprüfung der Mischung SMA 0/8 S ohne Kalkhydrat

Für den vorliegenden Kornaufbau wurde aufgrund der in Tabelle 1 zusammengefassten Werte eine Bindemittelmenge 7,3 M.-% Bitumen 50/70 (B 65) festgelegt.

Die Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches mit Zugabe des Mischfüllers unterscheidet sich nur unwesentlich von den o.a. Werte und wird wie folgt fraktioniert.

Kiesedelsplitt 5/8 (ESP 5/8)	63,0 M.-%
Kiesedelsplitt 2/5 (ESP 2/5)	11,0 M.-%
Kieselbrechsand (EBS 0/2)	16,0 M.-%
Mischfüller 0/0,09 (MF 0/0,09)	6,6 M.-%
Eigenfüller 0/0,09 (EF 0/0,09)	3,4 M.-%

Die Korngrößenverteilung der einzelnen Fraktionen sind im Anhang B.1.1 zusammengestellt.

Die Dosierung ergibt bei der vorliegenden Zusammensetzung der Gesteinskörnungen einen Splittgehalt von 75,1 M.-%, einen Sandanteil von 12,9 M.-% und eine Füllermenge von 12,0 M.-%.

Die Sieblinie des gewählten Mineralstoffgemisches ist in Abbildung 2 eingezeichnet, sie ist nahezu identisch mit der Mischung ohne Kalkhydrat (Nullmischung).

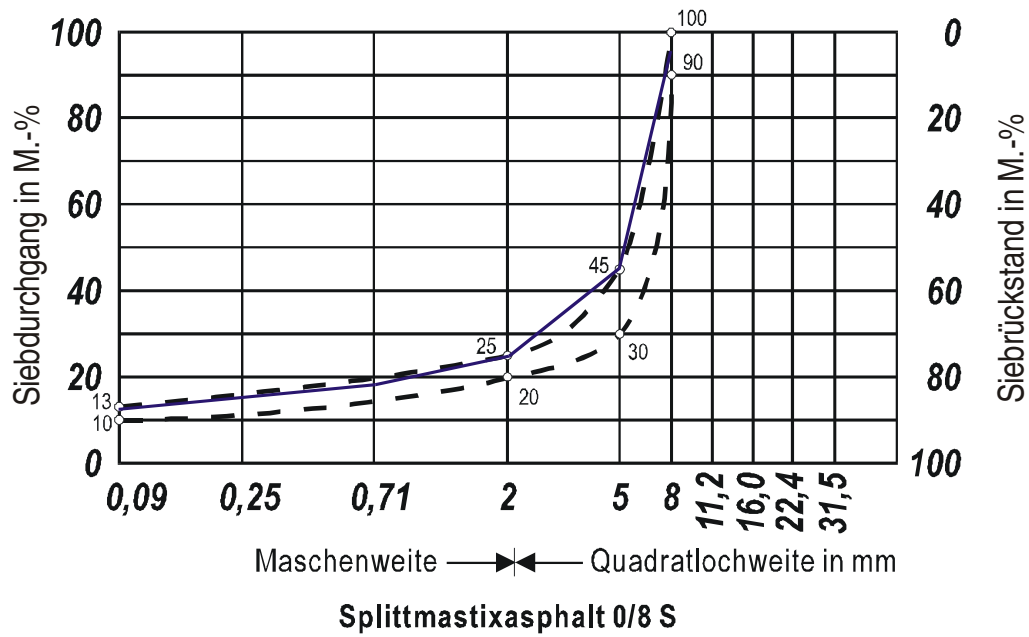


Abbildung 2: Sieblinie SMA 0/8 S mit Kalkhydrat

Die Vorgaben und Zielsetzungen der „Nullmischung“ sollten mit gleicher Variation des Bindemittelgehalts und gleicher Zugabemenge der Cellulosefasern erreicht werden.

Mischung Nr.	1	2	3								
Bindemittelmenge, gesamt in M.-%	7,0	7,3	7,6								
EP RuK in °C	53,0										
Rohdichte, Mineralstoffgemisch in g/cm ³	2,268										
Raumdichte ρ_A in g/cm ³	2,320	2,324	2,326								
Rohdichte ρ_R in g/cm ³	2,408	2,398	2,388								
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	3,7	3,1	2,6								
	<p style="text-align: center;">Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Hohlraumgehalt in V.-%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,0</td> <td>3,7</td> </tr> <tr> <td>7,3</td> <td>3,1</td> </tr> <tr> <td>7,6</td> <td>2,6</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%	7,0	3,7	7,3	3,1	7,6	2,6
Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%										
7,0	3,7										
7,3	3,1										
7,6	2,6										
Ausfüllungsgrad in %	81,0	84,2	86,8								
Bindemittelvolumen B_V in V.-%	15,8	16,5	17,2								
Hohlraumgehalt H_{Mbit} in V.-%	19,5	19,6	19,8								
Marshall-Stabilität in kN	6,8	6,6	6,6								
Marshall-Fließwert in mm	2,8	3,2	3,8								
Ablauftest, Rückstand in M.-%	0,2	0,2	0,2								
Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n im einaxialen Druckschwellversuch	$43,94 \cdot 10^{-4}$	$32,78 \cdot 10^{-4}$	$43,33 \cdot 10^{-4}$								
	<p style="text-align: center;">Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,0</td> <td>$43,94 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>7,3</td> <td>$32,78 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>7,6</td> <td>$43,33 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n	7,0	$43,94 \cdot 10^{-4}$	7,3	$32,78 \cdot 10^{-4}$	7,6	$43,33 \cdot 10^{-4}$
Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n										
7,0	$43,94 \cdot 10^{-4}$										
7,3	$32,78 \cdot 10^{-4}$										
7,6	$43,33 \cdot 10^{-4}$										

Tabelle 2: Kennwerte der Eignungsprüfung des SMA-Asphalts mit Kalkhydrat

Für den vorliegenden Kornaufbau wurde aufgrund der in Tabelle 2 zusammengefassten Werte eine Bindemittelmenge von 7,3 M.-% Bitumen 50/70 (B 65) gewählt.

2.1.1.3 Bewertung der Eignungsprüfungen

Der Vergleich der beiden Eignungsprüfungen zeigt, dass die Verwendung von Kalkhydrat nicht zu einer erhöhten Bindemittelzugabemenge führt. Wird Kalkhydrat zugegeben, so sind deutlich geringere Auswirkungen bei Bindemittelschwankungen im Bezug auf die Standfestigkeit zu erwarten (siehe Tabelle 3).

	Bindemittelgehalt in M.-%		
	7,0	7,3	7,6
	Dehnungsrate ϵ_w *		
	in ‰ / n im einaxialen Druckschwellversuch		
ohne Kalkhydrat	$138,1 \cdot 10^{-4}$	$36,3 \cdot 10^{-4}$	$69,0 \cdot 10^{-4}$
mit Kalkhydrat	$43,9 \cdot 10^{-4}$	$32,8 \cdot 10^{-4}$	$43,3 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 3: Vergleich der Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt des SMA 0/8 S

2.1.1.4 Zusätzliche Untersuchungen und Ergebnisse der Eignungsprüfungen

Verdichtbarkeit :

Die Untersuchung der Verdichtbarkeit erfolgte durch Variation der Schlagzahl während der Verdichtung. Sie dient der Einschätzung der Verdichtungswilligkeit des Mischguts. Aus Tabelle 4 ist an den niedrigeren Ergebnissen des Hohlraumgehaltes zu sehen, dass die Mischung ohne Kalkhydrat sich geringfügig besser verdichten lässt, als die Mischung mit Kalkhydrat. Die Unterschiede sind bei unterschiedlicher Verdichtungsarbeit jedoch relativ gering, wenn die Prüftoleranzen berücksichtigt werden.

	25 Schläge	50 Schläge	75 Schläge
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%			
ohne Kalkhydrat	4,2	2,1	1,4
mit Kalkhydrat	4,3	2,4	1,9

Verdichtbarkeit dargestellt am Hohlraumgehalt

Schlagzahlen je Probekörperseite	ohne Kalkhydrat (V.-%)	mit Kalkhydrat (V.-%)
25	4,2	4,3
50	2,1	2,4
75	1,4	1,9

Tabelle 4: Verdichtbarkeit anhand des Hohlraumgehalts der Mischung SMA 0/8 S

Bezogen auf die Normverdichtung (2 x 50 Schläge) ergibt sich ein Unterschied im Hohlraumgehalt (dargestellt in Tabelle 5) von 0,3 V.-%.

	Mischgut ohne Kalkhydrat	Mischgut mit Kalkhydrat
Bindemittelgehalt in M.-%	7,3	
Raumdichte ρ_A in g/cm ³	2,350	2,341
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	2,1	2,4

Tabelle 5: Volumetrische Kennwerte der Mischung SMA 0/8 S bei Normverdichtung

Quellung :

Die Quellungsprüfungen wurden nach DIN 1996, T9 an Probekörpern nach Marshall mit der jeweiligen Sollzusammensetzung durchgeführt. Die Ergebnisse aus Tabelle 6 zeigen, dass keine quellfähigen Bestandteile in den Mischungen vorhanden sind, auch Affinitätsmängel liegen nicht vor, so dass durch die Zugabe von Kalkhydrat keine Verbesserung zu verzeichnen ist.

	Quellung in V.-%					
	ohne Kalkhydrat			mit Kalkhydrat		
Einzelwert	0,2	0,1	0	0,2	0	0,1
μ	0,1			0,1		

Tabelle 6: Quellung der Mischung SMA 0/8 S

Abkühlversuch :

Die Abkühlversuche (siehe Anhang A.3) geben Aufschluss darüber, inwiefern das Kälteverhalten des SMA-Asphalts, durch die Zugabe von Kalkhydrat beeinflusst werden kann. Die Werte in Tabelle 7 zeigen, dass der Einsatz von Kalkhydrat das Kälteverhalten des Asphalts nicht beeinflusst. Die Unterschiede der Messergebnisse liegen unterhalb des Wiederholstreuungsbereiches.

	Starttemperatur in °C	Temperaturgradient in K/h	max. th. ind. Spannung in N/mm ²	Bruchtemperatur in °C
ohne Kalkhydrat	20,0	-10,0	4,296	-24,1
			4,238	-24,5
mit Kalkhydrat			4,279	-24,3
			4,339	-24,6

Tabelle 7: Abkühlversuch der Mischung SMA 0/8 S

Zugviskosität :

Für die Bestimmung der Zugviskosität wurde der in [2] beschriebene Versuch an Probekörpern in den Abmessungen 32 x 40 x 160 mm durchgeführt (siehe Anhang A.1). Die Ergebnisse aus Tabelle 8 der Viskositätsmessung mit Hilfe von Zugretardationsversuchen belegen, dass mit der Zugabe von Kalkhydrat eine etwa 40 %-ige Erhöhung der Viskosität zu erzielen ist. Der Mörtel wird damit deutlich steifer.

	Abmaße in mm			θ in °C	σ in N/mm ²	t in min		ν in Ns/mm ²
	H	B	L			Belastung	Entlastung	
ohne Kalkhydrat	32	40	100	30,0	0,025	60,0	10,0	1,55*10 ⁴
mit Kalkhydrat								1,48*10 ⁴
								2,13*10 ⁴
								2,22*10 ⁴

Tabelle 8: Zugviskosität der Mischung SMA 0/8 S

Wasserempfindlichkeit :

Durch zentrische Zugversuche (Versuchsbeschreibung im Anhang A.1) vor und nach Wasserlagerung wurde der Zugfestigkeitsabfall untersucht. Die Wasserlagerung wurde wie folgt durchgeführt:

- 8h unter Wasser einer Temperatur von 25°C mit Vakuum bei maximal 25 mbar
- unmittelbar danach 6d Wasserbad bei 25 °C
- im Anschluss 1d Luft bei Raumtemperatur bis zur Prüfung

Aus Tabelle 9 ist eine Erhöhung der Zugfestigkeit bei Verwendung von Kalkhydrat zu erkennen. Weiterhin ist der Abfall der Zugfestigkeit nach Wasserlagerung geringer, als dies ohne Zugabe von Kalkhydrat der Fall ist. Mit Kalkhydrat wird die Wasserempfindlichkeit des SMA-Asphalts deutlich verbessert.

ohne Kalkhydrat	mit Kalkhydrat
-----------------	----------------

Zugfestigkeit	vor Wasserlagerung	nach Wasserlagerung	vor Wasserlagerung	nach Wasserlagerung
σ_{zx} in N/mm ²	5,000 4,954 4,958	4,696 4,352 4,599	5,207 5,268 5,264	5,161 5,069 5,137
$\sigma_{z\mu}$ in N/mm ²	4,971	4,549	5,246	5,122
Standard- abweichung	0,03	0,18	0,03	0,05
$\Delta\sigma_{z\mu}$ in N/mm ²	0,422		0,124	
Verlust an Zugfes- tigkeit in %	8,5		2,4	

Tabelle 9: Zugfestigkeit vor und nach Wasserlagerung der Mischung SMA 0/8 S

2.1.2 Großtechnische Herstellung des SMA-Asphalts

2.1.2.1 Mischanlage

Für die großtechnische Mischung ist eine moderne Mischanlage ausgewählt worden, die über Eigenfüller-, Fremdfüller- und Sonderfüllersilo verfügt. Die Ausgangsstoffe wurden in einem Doppelwellen-Chargenmischer gemischt. Die Gesteinskörnungen gelangen über ein Abzugsband und eine Bandwaage in die Trockentrommel und werden mittels Heißelevator in die Turmsiebung befördert. Hier werden die Gesteinskörnungen zur Herstellung von Splittmastixasphalt 0/8 S in mehrere Fraktionen (0/2, 2/5 und 5/8) aufgeteilt. Über eine Mineralstoffwaage werden diese dann dem Mischer zugeführt. Die Füllerzugabe erfolgt über eine Füllerwaage aus dem jeweiligen Silo. Das Bitumen wird über einen Durchflussmesser dem Mischvorgang zugegeben. Unmittelbar nach dem Mischen wird das Mischgut über eine Kübelbahn in ein Verladesilo transportiert und dort bis zur Verladung auf den LKW zwischengelagert.

2.1.2.2 Herstellung der Deckschicht

Während dem Verladen wurden die Temperaturen des Asphalts auf dem LKW ebenso wie die Temperaturen beim Einbau (Mischgut im Fertiger) bestimmt. Die Messwerte sind als Mittelwerte in Tabelle 10 angegeben.

	θ in °C	
	Mischwerk	Einbau
Feld 1	193	169
Feld 2	190	167
Feld 3	194	180
Feld 4	193	175

Tabelle 10: Temperaturen Asphaltmischgut SMA 0/8 S im Mischwerk und beim Einbau

Es zeigte sich, dass geringe Temperaturschwankungen im Mischgut zwischen den einzelnen LKW-Ladungen vorlagen. Die ermittelten Einbautemperaturen entsprechen den Forderungen der ZTV Asphalt-StB 94/98 [9].

Während des Einbaus der Deckschichten mit dem Fertiger sind kontinuierlich Messungen mit der Isotopsonde durchgeführt worden. Durch ständige Rückkopplung mit dem Walzenteam konnte hierdurch die Gleichmäßigkeit der Verdichtungsarbeit und eine Abschätzung des angestrebten Verdichtungsgrades erreicht werden. Die Messwerte sind in Tabelle 11 angegeben.

	ρ_A in g/cm ³
Feld 1	2,335 2,357 2,341
Feld 2	2,389 2,370 2,393
Feld 3	2,319 2,332 2,327
Feld 4	2,250 2,265 2,255

Tabelle 11: Raumdichten beim Einbau von SMA 0/8 S mittels Isotopsonde

2.1.3 Durchführung und Ergebnisse der Kontrollprüfung

Mischgutzusammensetzung :

In Tabelle 12 sind die Istwerte den Sollwerten aus der Eignungsprüfung (Klammerausdruck) gegenübergestellt. Die Abweichungen liegen im zulässigen Bereich der ZTV Asphalt-StB 94/98 [9]. Die Vorgaben für die Füllermenge im Feld 1 und für die Bindemittelmenge in Feld 4 wurden nicht eingehalten.

Material	Einheit	Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4
Splitt > 2 mm	M.-%	70,1 (75,1)	74,5 (75,1)	73,7 (75,0)	74,2 (75,0)
Sand	M.-%	12,8 (13,3)	12,6 (13,3)	12,6 (12,9)	11,3 (12,9)
Füller	M.-%	17,1 (11,6)	12,9 (11,6)	13,7 (12,0)	14,5 (12,0)
Bitumen	M.-%	7,2 (7,3)	7,0 (7,0)	7,1 (7,0)	6,8 (7,3)

Tabelle 12: Vergleich der Sollwerte mit den Istwerten der Mischung SMA 0/8 S

Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) :

Die Ergebnisse des EP RuK in Tabelle 13 liefern deutliche Hinweise darauf, dass der Einsatz von Kalkhydrat zu einer geringeren Erhöhung des EP RuK bzw. zu einer verringerten Bindemittelalterung führt. Grund hierfür kann das Entgegenwirken der Bildung von Asphaltene (A 7) im Bitumen durch Vorhandensein freier Ca^{2+} -Ionen sein [8]. Der EP RuK des zurückgewonnenen Bindemittels aus dem SMA-Asphalt ohne Kalkhydrat ist deshalb um 2°C erhöht.

	EP RuK in $^\circ\text{C}$
Feld 1	57,5
Feld 2	
Feld 3	55,5
Feld 4	

Tabelle 13: EP RuK des Mischgutes SMA 0/8 S

Volumetrische Kennwerte :

Nach Herstellung von Marshall-Probekörpern (MPK) aus den Mischgutproben, folgte die Bestimmung der Raumdichte und des Hohlraumgehalts. In Tabelle 14 werden die Werte am MPK mit den Werten am Bohrkern verglichen. Der Verdichtungsgrad wurde aus den vorliegenden Werten bestimmt.

	MPK		Bohrkern		Verdichtungsgrad in %
	Raumdichte ρ_A in g/cm^3	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	Raumdichte ρ_A in g/cm^3	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	
Feld 1	2,370	2,1	2,373	2,0	100,1
Feld 2	2,343	3,5	2,355	3,0	100,5
Feld 3	2,317	3,7	2,323	3,5	100,3
Feld 4	2,302	4,4	2,286	5,1	99,3

Tabelle 14: Hohlraumgehalt am MPK, am Bohrkern und Verdichtungsgrad des SMA 0/8 S
Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert

Die Marshall-Stabilität und der Marshall-Fließwert sind Untersuchungen am MPK und dienen zur Abschätzung der Standfestigkeit. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengefasst und deuten darauf hin, dass direkt nach der Herstellung des Mischgutes kein Einfluss von Kalkhydrat bei diesem Prüfverfahren erkennbar ist.

	Marshall-Stabilität in kN	Marshall-Fließwert in mm
Feld 1	7,5	3,6
Feld 2	7,5	3,4
Feld 3	7,5	3,7
Feld 4	8,0	3,5

Tabelle 15: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK des SMA 0/8 S

Dehnungsraten im einaxialen Druckschwellversuch:

In Tabelle 16 sind die Dehnungsraten des einaxialen Druckschwellversuches gemäß TP A-StB [6] zusammengefasst. Das Mischgut aus den Bohrkernen wurde zu Probekörpern nach Marshall geformt. Die gemessenen Werte liegen in der Größenordnung der Eignungsprüfung, sie werden durch die jeweils vorliegende Zusammensetzung bestimmt (bei Feld 1 führt der zu hohe Fülleranteil zu einer Erhöhung der Dehnungsrate). Zur Abschätzung der Wirkung des Kalkhydrates im SMA-Asphalt sollten die Dehnungsraten nach längerer Liegezeit erneut ermittelt werden.

	Dehnungsrate ϵ_w * in $\text{‰} / \text{n}$ im einaxialen Druckschwellversuch
Feld 1	$43,49 \cdot 10^{-4}$
Feld 2	$26,59 \cdot 10^{-4}$
Feld 3	$30,80 \cdot 10^{-4}$
Feld 4	$28,33 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 16: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch des SMA 0/8 S

2.1.4 Aufnahme IST-Zustand der Beobachtungsstrecke nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer

2.1.4.1 Bewertung der einzelnen Felder

An den 4 Versuchsfeldern wurde jeweils ein Querprofil an der Stationierung der Bohrkernentnahme bestimmt. Dadurch ist eine Aussage über die Auswirkung der vorhandenen Verkehrsbelastung möglich. Durch dieses Vorgehen ist die konzeptionell richtige Zusammensetzung der Asphaltmischung je Feld nachvollziehbar. Da grundsätzlich alle eingebauten Mischungen den Stand der Technik darstellen, ist nach so kurzer Liegezeit keine bzw. nur eine geringe Verformung in Form von Spurrinnen zu erwarten gewesen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Anhang C dargestellt.

2.1.4.2 Gesamtbewertung der Beobachtungsstrecke

Der Gesamteindruck der Oberfläche der Beobachtungsstrecke bei Dußlingen ist gut, beobachtbar waren allerdings Bitumenanreicherungen im Bereich der Radrollspuren.

2.1.5 Durchführung und Ergebnisse der 1. Nachuntersuchung 2002

Während der 1. Nachuntersuchung 2002 wurden aus der Deckschicht 12 Bohrkernentnommen, um den Materialbedarf für die Laboruntersuchungen zu decken. Die Probekörper wurden entweder direkt aus dem Bohrkern durch Sägen gewonnen oder indem Marshallprobekörper aus dem aus dem Bohrkernen aufbereiteten Mischgut hergestellt wurden.

Mischgutzusammensetzung :

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse aus der Siebanalyse und der Extraktion den Werten aus der Kontrollprüfung [Klammerausdruck] gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass im Laufe der 1,5 jährigen Liegezeit keine Veränderungen eingetreten sind, wenn die zulässigen Toleranzen zugrunde gelegt werden.

Material	Einheit	Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4
Splitt > 2 mm	M.-%	68,9 [70,1]	72,8 [74,5]	71,4 [73,7]	72,5 [74,2]

Sand	M.-%	14,3 [12,8]	13,7 [12,6]	13,8 [12,6]	12,6 [11,3]
Füller	M.-%	16,8 [17,1]	13,5 [12,9]	14,8 [13,7]	14,9 [14,5]
Bitumen	M.-%	6,8 [7,2]	7,0 [7,0]	7,2 [7,1]	6,9 [6,8]

Tabelle 17: Vergleich der Sollwerte mit den Istwerten der Mischung SMA 0/8 S
(1.Nachuntersuchung 2002)

Erweichungspunkt Ring und Kugel :

Nach einer Liegezeit von 1,5 Jahren verdeutlichen die Ergebnisse des EP RuK (Tabelle 18), dass der Einsatz von Kalkhydrat die in der Kontrollprüfung ermittelten Tendenzen längerfristig belegt. Die Erweichungspunkte sind tendenziell geringer bei Zugabe von Kalkhydrat.

	EP RuK in °C
Feld 1	56,0
Feld 2	
Feld 3	54,5
Feld 4	

Tabelle 18: EP RuK des Mischgutes SMA 0/8 S (1. Nachuntersuchung 2002)

Volumetrische Kennwerte :

An den MPK wurden die Raumdichte und der Hohlraumgehalt ermittelt, mit den Werten am Bohrkern verglichen und der Verdichtungsgrad berechnet (Tabelle 19).

	MPK		Bohrkern		Grad der Verdichtung in %
	Raumdichte ρ_A in g/cm ³	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	Raumdichte ρ_A in g/cm ³	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	
Feld 1	2,375	2,3	2,381	2,1	100,3
Feld 2	2,375	2,6	2,377	2,5	100,1
Feld 3	2,334	2,8	2,338	2,6	100,2
Feld 4	2,325	3,9	2,310	4,5	99,4

Tabelle 19: Hohlraumgehalt am MPK und Bohrkern der Mischung SMA 0/8 S (1.Nachuntersuchung 2002)

Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert:

Nachstehend sind die Werte der Marshall-Stabilität und des Marshall-Fließwertes der aus den Bohrkernen hergestellten MPK in Tabelle 20 dargestellt. Die Verwendung von Kalkhydrat führt zu einer geringen Erhöhung der Marshall-Stabilität. Die Marshall-Fließwerte bleiben dabei ziemlich konstant.

	Marshall-Stabilität in kN	Marshall-Fließwert in mm
Feld 1	8,0	4,5
Feld 2	8,5	4,0
Feld 3	9,5	4,0
Feld 4	10,0	4,0

Tabelle 20: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK der Mischung SMA 0/8 S (1.Nachuntersuchung 2002)

Dehnungsraten im einaxialen Druckschwellversuch:

Bei der Prüfung der Dehnungsraten im einaxialen Druckschwellversuch an den MPK, ist wie in Tabelle 21 zusammengefasst, eine Standfestigkeitserhöhung mit Kalkhydrat gegenüber den Proben ohne Kalkhydrat zu erkennen.

	Dehnungsrate ε_w * in ‰ / n
Feld 1	$30,49 \cdot 10^{-4}$
Feld 2	$22,64 \cdot 10^{-4}$
Feld 3	$12,29 \cdot 10^{-4}$
Feld 4	$14,81 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 21: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch der Mischung SMA 0/8 S (1. Nachuntersuchung 2002)

Zugviskosität :

Die Zugviskosität mit Hilfe von Zugretardationsversuchen an aus Bohrkernen durch Sägen hergestellten Probekörpern, ist nach einer Liegezeit von 1,5 Jahren erneut untersucht worden. Die dabei ermittelten Werte (Tabelle 22) zeigen, dass die Viskosität des Asphalts mit und ohne Zugabe von Kalkhydrat gegenüber der Eignungsprüfung gestiegen ist. Die Ergebnisse belegen, dass mit der Zugabe von Kalkhydrat die Viskosität, auch nach längerer Gebrauchsdauer, höher ist als ohne Zugabe von Kalkhydrat. Aus dem steiferen Mörtel können höhere Wärmestandfestigkeiten abgeleitet werden.

	Abmaße in mm			ϑ in °C	σ in N/mm ²	t in min		ν in Ns/mm ²
	H	B	L			Belastung	Entlastung	
ohne Kalkhydrat								$6,73 \cdot 10^4$ $6,46 \cdot 10^4$
mit Kalkhydrat	32	40	100	30,0	0,025	60,0	10,0	$8,08 \cdot 10^4$ $7,78 \cdot 10^4$

Tabelle 22: Zugviskosität der Mischung SMA 0/8 S (1. Nachuntersuchung 2002)

2.1.6 Eigenschaften des SMA 0/8 S nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer (Zusammenfassung)

In der ersten Nachuntersuchung 2002 sind deutliche Tendenzen zu erkennen, wie Kalkhydrat die Asphalteeigenschaften auf längere Zeit beeinflussen wird. Beim SMA 0/8 S ist der EP RuK nicht weiter gestiegen, eine Alterung des Bitumens ist noch nicht ermittelbar. Die Standfes-

tigkeit und die Viskosität ist hingegen gestiegen, so dass derzeit davon ausgegangen werden kann, dass die Zugabe von Kalkhydrat das Bindemittel vor Alterung schützt, d.h. die Rissanfälligkeit des SMA herabsetzt, bei gleichzeitiger Erhöhung der Standfestigkeit.

2.2 Versuchsstrecke bei Bräunlingen (L 181) aus AB 0/11

2.2.1 Durchführung der Eignungsprüfungen

2.2.1.1 Verwendete Ausgangsstoffe

Die erforderlichen Ausgangsstoffe für die zur Herstellung des AB 0/11 erhielt das Institut für Materialprüfung Dr. Schellenberg von dem beteiligten Mischwerk. Verwendet werden Moränesplitt und –brechsande (Kies, gewaschen und ungewaschen) sowie Natursand und Eigenfüller. Die Edelsplitt entsprechen hinsichtlich der Kornzusammensetzung, der Kornform, der Bruchflächigkeit und der Sauberkeit den Anforderungen der geltenden Richtlinien. Der Edelbrechsand ist frei von organischen Verunreinigungen. Beim scharfen Trocknen sind keine Krusten- oder Klumpenbildungen aufgetreten. Seine Überkornanteile liegen unter dem zulässigen Höchstwert. Der Durchgang des Eigenfüllers durch das 0,09 mm-Sieb entspricht den Anforderungen der TL Min–StB 94 [7] an Füller. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Eignungsprüfung sind nach den Angaben des Asphaltmischwerkes die eingesetzten Mineralstoffe im Sinne der RG Min–StB 93 [4] güteüberwacht und für den Straßenbau zugelassen. Die Herstellung der Probemischungen erfolgte mit einem Bitumen 70/100 (B 80) aus den Beständen der Mischanlage. Es wurde der gleiche Mischfüller wie in der Strecke B 27 verwendet.

2.2.1.2 Durchführung und Ergebnisse der Eignungsprüfungen

Die Sieblinie in dem nach den ZTV Asphalt–StB 94/98 [9] zulässigen Sieblinienbereich konnte bei der Mischung ohne Zugabe des Mischfüllers („Nullmischung“) mit folgender Mineralstoffzusammensetzung erzielt werden:

Kiesedelsplitt 8/11 (ESP 8/11)	23,0 M.-%
Kiesedelsplitt 5/8 (ESP 5/8)	15,0 M.-%
Kiesedelsplitt 2/5 (ESP 2/5)	10,0 M.-%
Kiesedelbrechsand gew. (EBS 0/2 I)	24,0 M.-%

Kieselbrechsand ungew. (EBS 0/2 I)	11,0 M.-%
Natursand (NS 0/2)	12,0 M.-%
Eigenfüller 0/0,09 (EF 0/0,09)	5,0 M.-%

Die o.a. Mineralstoffzusammensetzung ist im Anhang B.1.2 dargestellt.

Die Gesteinsdosierung ergibt bei der vorliegenden Zusammensetzung der Gesteinskörnungen einen Splittgehalt von 52,0 M.-%, einen Sandanteil von 38,5 M.-% und eine Füllermenge von 9,5 M.-%.

Die Sieblinie des gewählten Mineralstoffgemisches ist in Abbildung 3 eingezeichnet.

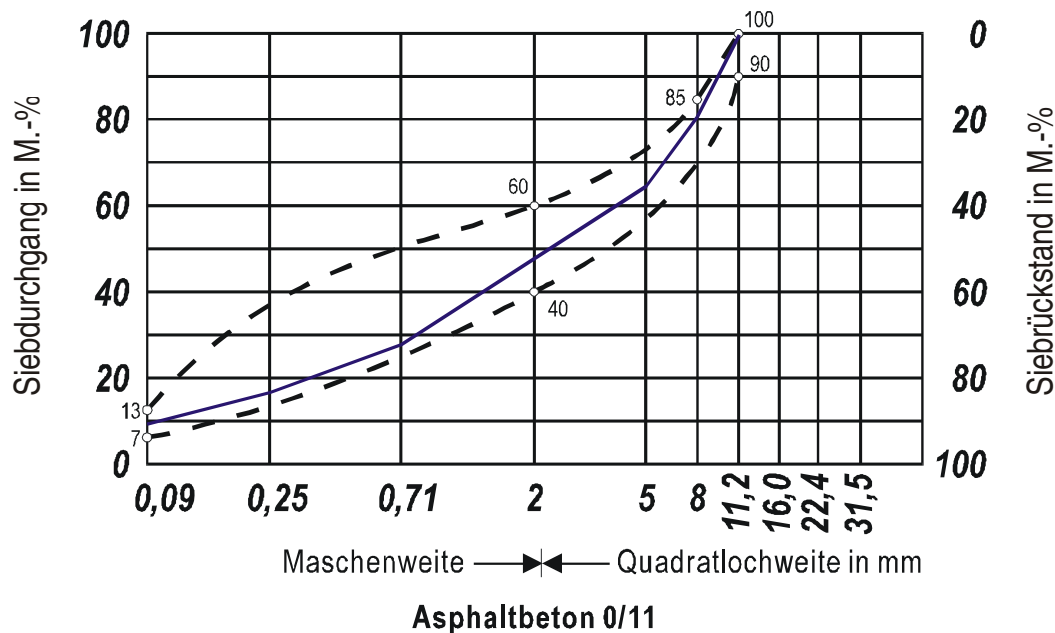


Abbildung 3: Sieblinie AB 0/11 ohne Kalkhydrat

Variiert wurde der Bindemittelgehalt in 0,4 M.-%-Schritten. Gemäß ZTV Asphalt StB 94/98 [9] ist ein Bindemittelgehalt zwischen 6,2 bis 7,5 M.-% anzustreben, wodurch ein Hohlraumgehalt aus der Vorgabe von 3,5 V.-% erreicht werden kann. Die Ergebnisse der Probenmischungen sind in Tabelle 23 dargestellt.

Mischung Nr.	1	2	3								
Bindemittelmenge, gesamt in M.-%	6,1	6,5	6,9								
EP RuK in °C	47,0										
Rohdichte, Mineralstoffgemisch in g/cm ³	2,706										
Raumdichte ρ_A in g/cm ³	2,384	2,396	2,395								
Rohdichte ρ_R in g/cm ³	2,462	2,447	2,433								
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	3,2	2,1	1,6								
	<p style="text-align: center;">Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Hohlraumgehalt in V.-%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6,1</td> <td>3,2</td> </tr> <tr> <td>6,5</td> <td>2,1</td> </tr> <tr> <td>6,9</td> <td>1,6</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%	6,1	3,2	6,5	2,1	6,9	1,6
Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%										
6,1	3,2										
6,5	2,1										
6,9	1,6										
Ausfüllungsgrad in %	81,5	87,8	90,9								
Bindemittelvolumen B_V in V.-%	14,1	15,1	16,0								
Hohlraumgehalt H_{Mbit} in V.-%	17,3	17,2	17,6								
Marshall-Stabilität in kN	10,5	10,0	9,8								
Marshall-Fließwert in mm	3,0	3,4	4,0								
Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n im einaxialen Druckschwellversuch	$18,92 \cdot 10^{-4}$	$10,54 \cdot 10^{-4}$	$14,35 \cdot 10^{-4}$								
	<p style="text-align: center;">Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6,1</td> <td>$18,92 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>6,5</td> <td>$10,54 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>6,9</td> <td>$14,35 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n	6,1	$18,92 \cdot 10^{-4}$	6,5	$10,54 \cdot 10^{-4}$	6,9	$14,35 \cdot 10^{-4}$
Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n										
6,1	$18,92 \cdot 10^{-4}$										
6,5	$10,54 \cdot 10^{-4}$										
6,9	$14,35 \cdot 10^{-4}$										

Tabelle 23: Kennwerte der Eignungsprüfung der Mischung AB 0/11 ohne Kalkhydrat

Für den vorliegenden Kornaufbau wurde aufgrund der in Tabelle 23 zusammengefassten Werte eine Bindemittelmenge 6,2 M.-% Bitumen 70/100 (B 80) gewählt.

Die Zusammensetzung des Mineralstoffgemisches mit Zugabe des Mischfüllers unterscheidet sich nur unwesentlich von den Werten aus der Eignungsprüfung ohne Kalkhydrat.

Kiesel Splitt 8/11 (ESP 8/11)	23,0 M.-%
Kiesel Splitt 5/8 (ESP 5/8)	15,0 M.-%
Kiesel Splitt 2/5 (ESP 2/5)	10,0 M.-%
Kieselbrechsand gewaschen (EBS 0/2I)	24,0 M.-%
Kieselbrechsand ungewaschen (EBS 0/2II)	10,0 M.-%
Natursand 0/2(NS 0/2)	12,0 M.-%
Mischfüller (MF 0/0,09)	5,2 M.-%

Die Zusammensetzung der einzelnen Korngruppen ist im Anhang B.1.2 angegeben.

Die Dosierung ergibt bei der vorliegenden Zusammensetzung der Gesteinskörnungen einen Splittgehalt von 52,0 M.-%, einen Sandanteil von 38,6 M.-% und eine Füllermenge von 9,4 M.-%.

Die Sieblinie des gewählten Mineralstoffgemisches in Abbildung 4, ist nahezu gleich der „Nullmischung“, in den zulässigen Sieblinienbereich der ZTV Asphalt-StB 94/98 [9] eingezeichnet.

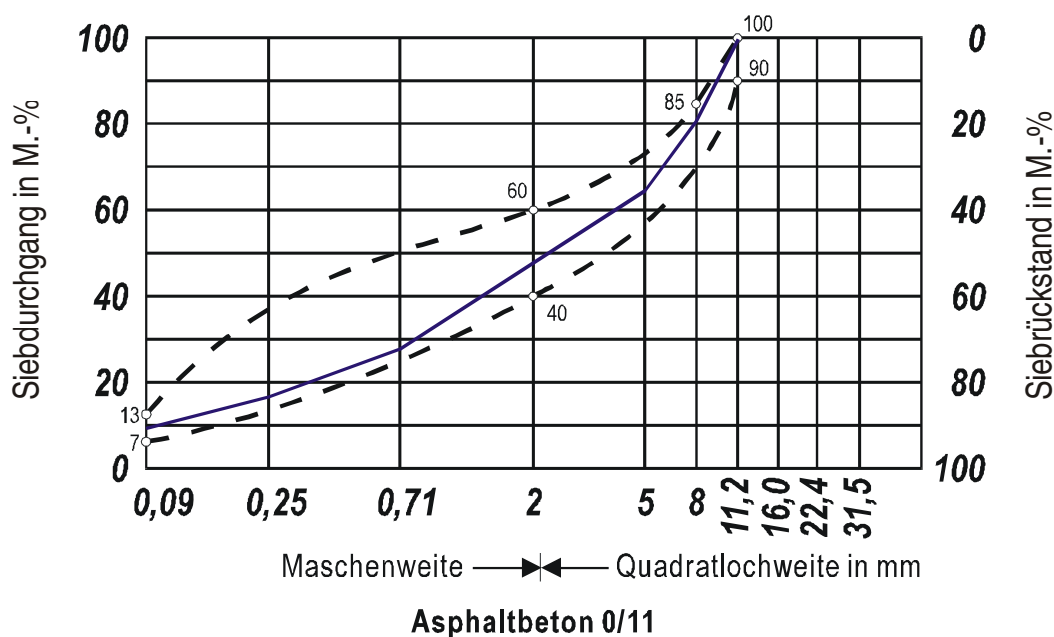


Abbildung 4: Sieblinie AB 0/11 mit Kalkhydrat

Mischung Nr.	1	2	3								
Bindemittelmenge, gesamt in M.-%	6,1	6,5	6,9								
EP RuK in °C	47,0										
Rohdichte, Mineralstoffgemisch in g/cm ³	2,695										
Raumdichte ρ_A in g/cm ³	2,380	2,389	2,381								
Rohdichte ρ_R in g/cm ³	2,453	2,439	2,425								
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	2,0	2,1	1,8								
	<p style="text-align: center;">Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Hohlraumgehalt in V.-%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6,1</td> <td>3,0</td> </tr> <tr> <td>6,5</td> <td>2,1</td> </tr> <tr> <td>6,9</td> <td>1,8</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%	6,1	3,0	6,5	2,1	6,9	1,8
Bindemittelgehalt in M.-%	Hohlraumgehalt in V.-%										
6,1	3,0										
6,5	2,1										
6,9	1,8										
Ausfüllungsgrad in %	82,5	87,8	89,9								
Bindemittelvolumen B_V in V.-%	14,1	15,1	16,0								
Hohlraumgehalt H_{Mbit} in V.-%	17,1	17,2	17,8								
Marshall-Stabilität in kN	10,0	9,6	9,0								
Marshall-Fließwert in mm	3,6	4,0	4,4								
Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n im einaxialen Druckschwellversuch	$5,05 \cdot 10^{-4}$	$6,70 \cdot 10^{-4}$	$9,12 \cdot 10^{-4}$								
	<p style="text-align: center;">Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</p> <table border="1"> <caption>Data for Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt</caption> <thead> <tr> <th>Bindemittelgehalt in M.-%</th> <th>Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6,1</td> <td>$5,05 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>6,5</td> <td>$6,70 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> <tr> <td>6,9</td> <td>$9,12 \cdot 10^{-4}$</td> </tr> </tbody> </table>			Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n	6,1	$5,05 \cdot 10^{-4}$	6,5	$6,70 \cdot 10^{-4}$	6,9	$9,12 \cdot 10^{-4}$
Bindemittelgehalt in M.-%	Dehnungsrate ε_w^* in ‰ / n										
6,1	$5,05 \cdot 10^{-4}$										
6,5	$6,70 \cdot 10^{-4}$										
6,9	$9,12 \cdot 10^{-4}$										

Tabelle 24: Kennwerte der Eignungsprüfung der Mischung AB 0/11 mit Kalkhydrat

Für den vorliegenden Kornaufbau wurde aufgrund der in Tabelle 24 zusammengefassten Werte eine Bindemittelmenge von 6,2 M.-% Bitumen 70/100 (B 80) gewählt.

2.2.1.3 Bewertung der Eignungsprüfung

Der Vergleich der beiden Eignungsprüfungen zeigt deutlich, dass die Verwendung von Kalkhydrat nicht zu einer erhöhten Bindemittelzugabemenge führt. Wird Kalkhydrat zugegeben, so ist gerade im Bereich geringerer Bindemittelmengen eine Erhöhung der Standfestigkeit zu erwarten (siehe Tabelle 25).

	Bindemittelgehalt in M.-%		
	6,1	6,5	6,9
	Dehnungsrate ε_w *		
	in ‰ / n im einaxialen Druckschwellversuch		
ohne Kalkhydrat	$18,92 \cdot 10^{-4}$	$10,54 \cdot 10^{-4}$	$14,35 \cdot 10^{-4}$
mit Kalkhydrat	$5,05 \cdot 10^{-4}$	$6,70 \cdot 10^{-4}$	$9,12 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 25: Vergleich der Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt des AB 0/11

2.2.1.4 Zusätzliche Untersuchung und Ergebnisse der Eignungsprüfungen

Verdichtbarkeit :

Die Untersuchung der Verdichtbarkeit durch Variation der Schlagzahl während der Verdichtung dient der Einschätzung der Verdichtungswilligkeit des Mischguts. Aus Tabelle 26 ist aus dem Vergleich über den Hohlraumgehalt der Mischungen zu erkennen, dass nur geringfügige Unterschiede vorhanden sind, die mit zunehmender Schlagzahl kompensiert werden. In Anbetracht der dem Verfahren eigenen Prüftoleranz sind diese Unterschiede jedoch bedeutungslos.

	25 Schläge	50 Schläge	75 Schläge
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%			
ohne Kalkhydrat	4,1	2,2	1,8
mit Kalkhydrat	3,5	2,0	1,8

Verdichtbarkeit dargestellt am Hohlraumgehalt

Schlagzahlen je Probekörperseite	ohne Kalkhydrat (V.-%)	mit Kalkhydrat (V.-%)
25	4,1	3,5
50	2,2	2,0
75	1,8	1,8

Tabelle 26: Verdichtbarkeit anhand des Hohlraumgehalts der Mischung AB 0/11

Bezogen auf die Normverdichtung (2 x 50 Schläge) ergibt sich ein Unterschied im Hohlraumgehalt (dargestellt in Tabelle 27) von 0,2 V.-%.

	Mischgut ohne Kalkhydrat	Mischgut mit Kalkhydrat
Bindemittelgehalt in M.-%	6,2	
Raumdichte ρ_A in g/cm ³	2,404	2,401
Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	2,1	1,9

Tabelle 27: Volumetrische Kennwerte der Mischung AB 0/11 bei Normverdichtung

Quellung :

Die Quellungsprüfungen wurden nach DIN 1996, T9 an Probekörpern nach Marshall mit der jeweiligen Sollzusammensetzung durchgeführt. Die Ergebnisse aus Tabelle 28 belegen, wie auch schon bei SMA-Asphalt, dass keine quellfähigen Bestandteile in den Mischungen vorhanden sind, auch Affinitätsmängel liegen nicht vor, so dass durch die Zugabe von Kalkhydrat keine Verbesserung zu erkennen ist.

	Quellung in Vol.-%					
	ohne Kalkhydrat			mit Kalkhydrat		
Einzelwert	0,1	0,2	0	0,1	0	0,1
μ	0,1			0,1		

Tabelle 28: Quellung der Mischung AB 0/11

Abkühlversuch:

Der Abkühlversuch wurde anhand der im Anhang A.3 beschriebenen Arbeitsanleitung durchgeführt. Die Werte in Tabelle 29 zeigen, dass durch die Zugabe von Kalkhydrat das Kälteverhalten nicht verändert wird. Die Ergebnisse liegen innerhalb der Wiederholstrebereiche.

	Starttemperatur in °C	Temperaturgradient in K/h	max. thermisch induzierte Spannung in N/mm ²	Bruchtemperatur in °C
ohne Kalkhydrat	20,0	-10,0	4,558	-26,3
			4,523	-26,0
mit Kalkhydrat			4,761	-26,6
			4,573	-26,2

Tabelle 29: Abkühlversuch der Mischung AB 0/11

Zugviskosität :

Aufgrund der ausreichenden Schichtdicke des AB 0/11 konnten die Versuche gemäß Arbeitsanleitung [2] an Probekörpern der Abmessung 40 x 40 x 160 mm durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Zugviskosität ermittelt mit Hilfe von Zugretardationsversuchen zeigen in Tabelle 30, dass durch die Zugabe von Kalkhydrat in Asphaltbeton eine circa 50 %-ige Erhöhung der Viskosität zu erreichen ist. Daraus kann eine höhere Wärmestandfestigkeit abgeleitet werden.

	Abmaße in mm			ϑ in °C	σ in N/mm ²	t in min		ν in Ns/mm ²
	H	B	L			Belastung	Entlastung	
ohne Kalkhydrat	40	40	100	30,0	0,025	60,0	10,0	2,67*10 ⁴ 2,84*10 ⁴
mit Kalkhydrat								4,15*10 ⁴ 3,95*10 ⁴

Tabelle 30: Zugviskosität der Mischung AB 0/11

Wasserempfindlichkeit :

Durch zentrische Zugversuche (siehe Anhang A.1) vor und nach Wasserlagerung wurde der durch den Einfluss des Wassers bedingte Zugfestigkeitsabfall ermittelt.

Aus Tabelle 31 ist zu erkennen, dass sich die Zugfestigkeit selbst bei Verwendung von Kalkhydrat nicht verändert. Auffällig ist aber die Reaktion auf die Wasserlagerung. Die Zugabe von Kalkhydrat führt nur zu einem Festigkeitsverlust von 9,4 % im Gegensatz zu den vergleichbaren Proben ohne Zugabe von Kalkhydrat mit einem Festigkeitsverlust durch Wassereinfluss von 47,5 % (!).

Zugfestigkeit	ohne Kalkhydrat		mit Kalkhydrat	
	vor Wasserlagerung	nach Wasserlagerung	vor Wasserlagerung	nach Wasserlagerung
σ_{zx} in N/mm ²	4,703 4,423 4,536	2,374 2,418 2,384	4,292 4,569 4,405	4,100 3,932 3,990
$\sigma_{z\mu}$ in N/mm ²	4,554	2,392	4,422	4,007
Standardabweichung	0,14	0,02	0,14	0,09
$\Delta\sigma_{z\mu}$ in N/mm ²	2,162		0,415	
Verlust an Zugfestigkeit in %	47,5		9,4	

Tabelle 31: Zugfestig vor und nach Wasserlagerung der Mischung AB 0/11

2.2.2 Großtechnische Herstellung

2.2.2.1 Aufnahme der Mischtechnik

Für die großtechnische Mischung ist eine moderne Mischanlage ausgewählt worden, die über Eigenfüller, Fremdfüller und Sonderfüllersilo verfügt. Die Ausgangsstoffe wurden in einem Doppelwellen-Chargenmischer gemischt. Die Gesteinskörnungen gelangen über ein Abzugsband und eine Bandwaage in die Trockentrommel und werden mittels Heißelevator in die Turmsiebung befördert. Hier werden die Gesteinskörnungen zur Herstellung von Asphaltbeton 0/11 in mehrere Fraktionen (0/2, 2/5, 5/8, 8/11) aufgeteilt. Über eine Mineralstoffwaage werden diese dann dem Mischer zugeführt. Die Füllerzugabe erfolgt über eine Füllerwaage aus dem jeweiligen Silo. Das Bitumen wird über einen Durchflussmesser dem Mischvorgang zugegeben. Unmittelbar nach dem Mischen wird das Mischgut über eine Kübelbahn in ein Verladesilo transportiert und dort zwischengelagert bis zur Verladung auf den LKW.

2.2.2.2 Herstellung der Deckschicht

Während dem Verladen wurden die Temperaturen des Asphalts auf dem LKW und beim Einbau im Straßenfertiger bestimmt. Die Messwerte sind als Mittelwert in Tabelle 32 dargestellt.

	ϑ in °C	
	Mischwerk	Einbau
Feld A	173	161
Feld B	176	160
Feld C	176	171
Feld D	175	170

Tabelle 32: Temperaturen Asphaltmischgut AB 0/11 im Mischwerk und beim Einbau

Es zeigte sich, dass nur geringe Temperaturschwankungen zwischen den einzelnen Feldern vorlagen. Die ermittelten Einbautemperaturen sind entsprechen den Forderungen der ZTV Asphalt-StB 94/98 [9].

Während des Einbaus der Deckschichten mit dem Fertiger sind kontinuierlich Messungen mit der Isotopsonde durchgeführt worden. Durch ständige Rückkopplung mit dem Walzenteam konnte hierdurch die Gleichmäßigkeit der Verdichtungsarbeit und eine Abschätzung des angestrebten Verdichtungsgrades erzielt werden. Die Messwerte sind in Tabelle 33 zusammengefasst.

	ρ_A in g/cm ³
Feld A	2,294 2,295 2,292
Feld B	2,311 2,324 2,318
Feld C	2,285 2,303 2,301
Feld D	2,310 2,302 2,302

Tabelle 33: Raumdichten gemessen beim Einbau von AB 0/11 mit der Isotopsonde

2.2.3 Durchführung und Ergebnisse der Kontrollprüfung

Mischgutzusammensetzung :

In Tabelle 34 sind die Istwerte den Sollwerten aus der Eignungsprüfung (Klammerausdruck) gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Mischgutzusammensetzung gemäß ZTV Asphalt-StB 94/98 [9] im zulässigen Streubereich liegt. Die Vorgaben der Eignungsprüfung im Bezug auf den Bindemittelgehalt konnten, ausgenommen Feld B, in dieser Versuchsreihe weitestgehend erfüllt werden.

Material	Einheit	Feld A	Feld B	Feld C	Feld D
Splitt > 2 mm	M.-%	53,5 (52,0)	54,3 (52,0)	57,1 (52,0)	55,3 (52,0)
Sand	M.-%	38,3 (38,5)	36,8 (38,5)	33,5 (38,6)	35,6 (38,6)
Füller	M.-%	8,2 (9,5)	8,9 (9,5)	9,4 (9,4)	9,1 (9,4)
Bitumen	M.-%	6,3 (6,2)	6,2 (5,9)	5,8 (5,9)	6,1 (6,2)

Tabelle 34: Vergleich der Sollwerte zu den Istwerten beim AB 0/11

Erweichungspunkt Ring und Kugel :

Die Erweichungspunkte Ring und Kugel in Tabelle 35 zeigen deutlich, dass durch den Einsatz von Kalkhydrat die Werte entscheidend beeinflusst werden können. Dies bedeutet, dass die Alterung des Bindemittels verringert wird. Die ermittelten Werte liegen im zulässigen Bereich bei Berücksichtigung der Toleranz von 8°C gemäß Ziffer 1433 ZTV-Asphalt-StB 94/98 [9].

	EP RuK in °C
Feld A	55,5
Feld B	
Feld C	49,5
Feld D	

Tabelle 35: EP RuK des Mischgutes AB 0/11

Volumetrische Kennwerte :

Nach Herstellung von Marshall-Probekörpern (MPK) aus den Mischgutproben, folgte die Bestimmung der Raumdichte und des Hohlraumgehalts. In Tabelle 36 werden die Werte am MPK mit den Werten am Bohrkern verglichen. Aus den ermittelten Werten wurde der Verdichtungsgrad berechnet.

	MPK		Bohrkern		Verdichtungsgrad in %
	Raumdichte ρ_A in g/cm ³	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	Raumdichte ρ_A in g/cm ³	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	
Feld A	2,391	2,4	2,313	5,6	96,7
Feld B	2,405	2,2	2,372	3,6	98,6
Feld C	2,403	2,6	2,367	4,0	98,5
Feld D	2,401	1,8	2,361	3,5	98,3

Tabelle 36: Hohlraumgehalt am MPK und Bohrkern beim AB 0/11

Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert :

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Marshall Stabilität und des Marshall-Fließwertes sind in Tabelle 37 zusammengefasst und zeigen, dass direkt nach der Herstellung des Mischguts bei diesem Prüfverfahren kein Einfluss von Kalkhydrat erkennbar ist.

	Marshall-Stabilität in kN	Marshall-Fließwert in mm
Feld A	10,5	3,4
Feld B	11,0	3,4
Feld C	10,5	3,8
Feld D	10,0	4,2

Tabelle 37: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK beim AB 0/11

Dehnungsraten im einaxialen Druckschwellversuch:

In Tabelle 38 sind die Dehnungsraten aus den einaxialen Druckschwellversuchen nach TP AStB [6] dargestellt. Eine Auswirkung der Zugabe des Kalkhydrates ist nicht ablesbar.

	Dehnungsrate ϵ_w * in ‰ / n
Feld A	$7,20 \cdot 10^{-4}$
Feld B	$4,73 \cdot 10^{-4}$
Feld C	$4,98 \cdot 10^{-4}$
Feld D	$5,26 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 38: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch beim AB 0/11

2.2.4 Aufnahme IST-Zustand der Beobachtungsstrecke nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer

2.2.4.1 Bewertung der einzelnen Felder

In den 4 Versuchsfeldern wurde jeweils ein Querprofil an der Stationierung der Bohrkernentnahme aufgenommen.

2.2.4.2 Gesamtbewertung der Beobachtungsstrecke

Der Gesamteindruck der Oberfläche der Strecke erwies sich als gut.

2.2.5 Durchführung und Ergebnisse der 1. Nachuntersuchung 2002

Um den Materialbedarf für den Umfang der Untersuchungen zu decken, wurden während der 1. Nachuntersuchung 2002 insgesamt 12 Bohrkern aus jedem Versuchsfeld entnommen. Die Probekörper wurden entweder direkt aus dem Bohrkern durch Sägen gewonnen oder indem Marshallprobekörper aus dem aus dem Bohrkernen aufbereiteten Mischgut hergestellt wurden.

Mischgutzusammensetzung :

In Tabelle 39 sind die Ergebnisse der Siebanalysen und der Extraktionen den Werten aus der Kontrollprüfung [Klammerausdruck] gegenübergestellt.

Material	Einheit	Feld A	Feld B	Feld C	Feld D
Splitt > 2 mm	M.-%	54,5 [53,5]	54,3 [54,3]	54,4 [57,1]	56,2 [55,3]
Sand	M.-%	36,4 [38,3]	35,6 [36,8]	35,6 [33,5]	34,2 [35,6]
Füller	M.-%	9,1 [8,2]	10,1 [8,9]	10,0 [9,4]	9,6 [9,1]
Bitumen	M.-%	6,2 [6,3]	5,8 [6,2]	5,8 [5,8]	6,0 [6,1]

Tabelle 39: Vergleich der Sollwerte mit den Istwerten beim AB 0/11

Erweichungspunkt Ring und Kugel :

Die Ergebnisse des EP RuK aus Tabelle 40 verdeutlichen die bereits in der Kontrollprüfung erkennbaren Tendenzen. Das Bitumen in den Feldern mit Kalkhydrat hat keine Bindemittelverhärtung erfahren. Die EP RuK sind bei Zugabe von Kalkhydrat signifikant niedriger.

	EP RuK in °C
Feld A	56,0
Feld B	
Feld C	49,0
Feld D	

Tabelle 40: EP RuK des Mischgutes AB 0/11

Volumetrische Kennwerte:

An hergestellten Marshall-Probekörpern (MPK) wurden die Raumdichte und der Hohlraumgehalt bestimmt. Diese Werte und die Werte am Bohrkern sowie die daraus berechneten Verdichtungsgrade sind in Tabelle 41 angegeben.

	MPK		Bohrkern		Verdichtungsgrad in %
	Raumdichte ρ_A in g/cm ³	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	Raumdichte ρ_A in g/cm ³	Hohlraumgehalt H_{bit} in V.-%	
Feld A	2,399	2,0	2,348	4,1	97,9
Feld B	2,407	2,5	2,389	3,2	99,3
Feld C	2,408	2,2	2,375	3,5	98,6
Feld D	2,413	2,1	2,370	3,9	98,2

Tabelle 41: Hohlraumgehalt am MPK und Bohrkern beim AB 0/11

Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert :

Nachstehend sind die Werte der Marshall-Stabilität und des Marshall-Fließwertes der aus dem Material der Bohrkerne hergestellten MPK in Tabelle 42 zusammengestellt. Die Verwendung von Kalkhydrat führt zu einer Erhöhung der Marshall-Stabilität, der Marshall-Fließwert bleibt dabei konstant.

	Marshall-Stabilität in kN	Marshall-Fließwert in mm
Feld A	12,0	3,6
Feld B	12,0	3,6
Feld C	13,5	3,5
Feld D	13,5	3,5

Tabelle 42: Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert am MPK beim AB 0/11

Dehnungsraten im einaxialen Druckschwellversuch :

Bei der Untersuchung der Dehnungsraten des einaxialen Druckschwellversuches gemäß TP A-StB [6] ist, wie in Tabelle 43 zusammengefasst, keine Veränderung gegenüber der Kontrollprüfung zu erkennen.

	Dehnungsrate ϵ_w * in ‰ / n
Feld A	$5,38 \cdot 10^{-4}$
Feld B	$3,28 \cdot 10^{-4}$
Feld C	$5,65 \cdot 10^{-4}$
Feld D	$5,68 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 43: Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch beim AB 0/11

Zugviskosität :

Auch bei Asphaltbeton ist nach einer Liegezeit von 1,5 Jahren die Zugviskosität anhand von Zugretadationsversuchen erneut untersucht worden. Die dabei ermittelten Werte zeigen, dass die Viskosität des Asphalts mit und ohne Zugabe von Kalkhydrat gegenüber der Eignungs-

prüfung angestiegen ist. Die Ergebnisse aus Tabelle 44 belegen, dass mit der Zugabe von Kalkhydrat die Viskosität höher liegt. Der Mörtel wird durch Zugabe von Kalkhydrat steifer. Dies deutet auf eine höhere Wärmestandfestigkeit hin.

	Abmaße in mm			ϑ in °C	σ in N/mm ²	t in min		ν in Ns/mm ²
	H	B	L			Belastung	Entlastung	
ohne Kalk- hydrat	32	40	100	30,0	0,025	60,0	10,0	4,04*10 ⁴
								3,69*10 ⁴
mit Kalkhydrat								4,59*10 ⁴
								4,70*10 ⁴

Tabelle 44: Zugviskosität beim AB 0/11

2.2.6 Die Eigenschaften des AB 0/11 nach 1,5 jähriger Gebrauchsdauer (Zusammenfassung)

In der ersten Nachuntersuchung 2002 sind deutliche Tendenzen zu erkennen, wie Kalkhydrat die Asphalteigenschaften mit der Zeit beeinflussen wird. Bei AB 0/11 ist zu erkennen, dass der EP RuK nicht weiter steigt, so dass davon auszugehen ist, dass das Bitumen nicht verhärtet. Trotzdem ist die Viskosität gestiegen. Eine interessante Feststellung, weil nach aller Erfahrung, ohne Kalkhydratzusatz, ein Anstieg des EP RuK immer mit einer Erhöhung der Standfestigkeit (Viskosität) einhergeht.

3 Nachweis von Kalkhydrat im Asphaltmischgut

3.1 Einführung

Die homogene Verteilung des Kalkhydrates und der Nachweis des Einsatzes im Asphalt sind für die Verwendung entscheidend. Ohne diesen Nachweis ist eine Akzeptanz von Kalkhydrat in Asphalt durch die Auftraggeber in Deutschland nicht zu erreichen. Zur Nachweisführung des Kalkhydratgehaltes im Asphalt (nach Extraktion des Asphaltes) wird ein analytisches Verfahren auf der Basis bereits bekannter und genormter Prüfverfahren entwickelt.

Das im Asphalt verwendete Kalkhydrat wird aufgrund seiner Granulometrie dem Füller zugeordnet. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde aufgrund der Anlagenkonfiguration bei den Mischgutherstellern ein Mischfüller mit einem Mischungsverhältnis Kalksteinmehl/Kalkhydrat von 50/50 Massenanteilen verwendet. Dieser Mischfüller wurde entsprechend den Festlegungen der Eignungsprüfung für die Asphalte als Ergänzung zu dem einzusetzenden Eigenfüller der Mischanlagen verwendet (s. Kapitel 2.1.1.2).

Für die Entwicklung des Nachweisverfahrens wurden die in der Eignungsprüfung festgelegten und bei der Mischgutherstellung eingesetzten Füllerkomponenten verwendet.

Um bei der Entwicklung des Nachweisverfahrens die Einflüsse aus den in den Beobachtungsstrecken verwendeten calciumcarbonathaltigen Gesteinskörnungen (Moräne) auszuschalten, wurde als carbonatfreie Gesteinskörnung in der Füllerkomponente und auch in der Gesteinskomponente ein Basalt aus dem Westerwald bei den nachfolgenden Labormischungen verwendet. Mit dem Basalt wurden sowohl reine Füller-Bitumen-Mischungen als auch Asphaltmischungen hergestellt, die der Entwicklung und Überprüfung des Nachweisverfahrens dienten. Für die Herstellung der Labormischungen wurde ein Bitumen B°160/220 (B 1) verwendet. Dieses Bitumen wird als Standardbitumen im Rahmen der Füllerprüfungen nach TL Min-StB 94 [7] verwendet.

Die Nachweisverfahren wurden nach Verifizierung auf die extrahierten Füller ($< 0,09$ mm) aus dem Einbaumischgut und den Bohrkernen der Beobachtungsstrecken angewendet.

3.2 Beschreibung der Füller und des Kalkhydrates

Der für die Entwicklung der Nachweisverfahren eingesetzte Eigenfüller der Beobachtungsstrecken (B 27 und L 181), das Kalksteinmehl, der Mischfüller und der Basaltfüller wurden gemäß den Anforderungen der TL Min-StB 94 [7] und entsprechend den Festlegungen der RG Min-StB 93 [4], Anlage 2.2, geprüft. Die Tabelle 45 zeigt ausgewählte charakteristische Daten dieser Füller. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang B.4 dargestellt. Die in den Beobachtungsstrecken eingesetzten Füller, Eigenfüller und Mischfüller und der nur für die Laboruntersuchungen verwendete Basaltfüller erfüllen die Anforderungen der TL Min-StB 94 [7].

Geprüfte Eigenschaft	Prüfvorschrift	Prüfverfahren	Prüfergebnisse				
			Kalksteinmehl	Mischfüller	Moräne-Füller B 27	Moräne-Füller L 181	Basalt-Füller
Korngrößenverteilung	DIN 52 098	Überkorn > 0,09 mm	19,1 M.-%	10,4 M.-%	11,4 M.-%	9,5 M.-%	7,8 M.-%
Rohdichte $\rho_{R,F}$	DIN 52102-FM	Trockenroh-dichte	2,721 g/cm ³	2,434 g/cm ³	2,731 g/cm ³	2,711 g/cm ³	2,966 g/cm ³
Hohlraumgehalt RIGDEN H_t	TP Min-StB Teil 3.8.3	--	35,0 Vol.-%	50,7 V.-%	36,2 V.-%	36,1 V.-%	44,4 V.-%
Versteifende Eigenschaften	DIN 52096	Stabilisierungsindex	2,40 : 1	1,15 : 1	2,10 : 1	2,10 : 1	1,90 : 1
		Erweichungspunkterhöhung 65/35	13,8 °	40,5 °	17,5 °	18,3 °	22,3 °
Organische Bestandteile	DIN 52099	--	keine vorhanden.	keine vorhanden.	keine vorhanden.	keine vorhanden.	keine vorhanden.
Wasserlösliche Anteile W_L	TP Min-StB Teil 4.6.3.1	Ausgabe 1999	0,08 M.-%	1,80 M.-%	0,49 M.-%	0,49 M.-%	0,21 M.-%
Wasserempfindlichkeit	TP Min-StB Teil 4.6.3.2	Stufe I	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden

Tabelle 45: Charakteristische Daten der Füller

Für die Analyse im Rahmen der Nachweisverfahren des Kalkhydrates wurden alle auf den Beobachtungsstrecken und im Rahmen dieser Laboruntersuchung eingesetzten Füller und das Kalkhydrat einer chemischen Vollanalyse unterzogen. Tabelle 46 zeigt einige ausgewählte Ergebnisse. Die vollständigen Daten der Vollanalysen sind im Anhang B.4 Tabelle A 18 dargestellt. Die Ergebnisse in Tabelle 46 für den Glühverlust und den Anteil an CaO belegen, dass es sich bei den auf den Beobachtungsstrecken eingesetzten Eigenfüllern um calciumcarbonathaltige Füller handelt. Die Forderung nach einem calciumcarbonatfreiem Gestein wird, wie Tabelle 46 zeigt, durch den verwendeten Basalt-Füller bzw. Basalt-Edelsplitt erfüllt. Zwar enthält der Basalt Calcium- und Magnesiumoxid, allerdings nicht in einer carbonatisch gebundenen Form wie der äußerst geringe Anteil an CO₂ belegt.

Das Kalkhydrat wurde in einer eigens für dieses Vorhaben entwickelten Apparatur unter Schutzgasatmosphäre aus Argon gelagert, um eine Aufnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft im Laufe der Arbeiten zu verhindern.

Gehalt an	Kalkstein-	Kalkhydrat	Moräne	Moräne	Basalt
	mehl		B 27	L 181	
	M. - %				
Glühverlust	42,67	25,07	25,73	21,76	1,61
davon CO ₂	42,39	0,40	23,31	20,48	0,24
CaO	53,70	73,73	29,00	27,47	10,05

Tabelle 46: Ausgewählte Daten der chemischen Vollanalyse der Füller

3.3 Nachweisverfahren

3.3.1 Beschreibung der Verfahren

Die Bestimmung von Calciumhydroxid in Kalkhydrat kann prinzipiell durch Titration mit Salzsäure

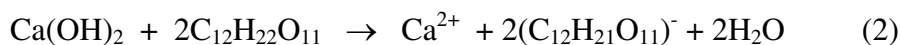
- a) nach Extraktion mit Ethylacetoacetat entsprechend der EN 459-2,
- b) nach Extraktion mit Saccharose entsprechend der EN 459-2 sowie
- c) nach Dispergierung in einer wässrigen Vorlage entsprechend der EN 12485

vorgenommen werden.

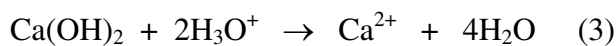
Bei Verfahren a) wird die Probe nach Dispergierung in Ethylacetoacetat/Isobutanol erhitzt und nach Abkühlung filtriert. Das Filtrat wird mit Salzsäure gegen Bromphenolblau als Indikator titriert. Die Gleichgewichtsreaktion (Gleichung 1) ist von den Mengen an den Ausgangsstoffen abhängig [10].



Das Verfahren b) zur Bestimmung von Calciumhydroxid ist in allen Konzentrationsbereichen anwendbar. Die Probe wird nach Dispergieren in Wasser mit Saccharose versetzt (Gleichung 2), bei Raumtemperatur gerührt und nach Filtration gegen Phenolphthalein als Indikator mit Salzsäure titriert .



Am einfachsten in der Handhabung ist das Verfahren c), bei dem nach Dispergieren der Probe in Wasser mit Salzsäure gegen Phenolphthalein (End-pH-Wert bei 9,8) titriert wird (Gleichung 3).



Für spezielle Anwendungsfälle steht noch die Leitfähigkeitsmessung zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.3.4).

3.3.2 Überprüfung der Eignung der Verfahren an Kalkhydraten und Füllermischungen

Die drei Verfahren wurden im ersten Schritt an Kalkhydraten und Mischungen aus Kalkhydrat und Gesteinsmehlen angewendet, um ihre Eignung für den speziellen Anwendungsfall festzustellen. Die Verfahren b) und c) sind unter den Bezeichnungen „Zuckermethode“ und „Titrationmethode“ jahrelang Gegenstand der europäischen Normung von Kalkprodukten in verschiedenen Bereichen gewesen und von daher in ihren Qualitätsmerkmalen bestätigt. Mit

der Esterextraktionsmethode a) konnten bislang an reinen Kalkhydraten keine den anderen Verfahren gleichwertige Ergebnisse erzielt werden.

Da das Prüfverfahren sowohl für Kalkhydrate als auch für Mischfüller und extrahierte Füller aus den Asphaltproben gültig sein soll, ist es unabdingbar, die Anwendbarkeit auf die drei Stoffe und Stoffgemische zu überprüfen. Die Analyse am eingesetzten Kalkhydrat ist erforderlich, um die Wiederfindungsraten bei den Mineralstoffgemischen berechnen zu können. Verschiedene Kalkhydrate wurden daher mit der Titrationsmethode und der Esterextraktionsmethode analysiert.

Dabei zeigt sich, dass die Esterextraktionsmethode nicht wie in der DIN EN 459-2 beschrieben angewendet werden kann, sondern die Einwaage verringert und die Mengen an Isobutanol und Ester erhöht werden müssen, da die Gleichgewichtsreaktion stark von den Mengen der Ausgangsstoffe abhängig ist. Verantwortlich hierfür ist das Tautomerenverhältnis der Keto-/Enolform von ca. (93/7) % und die Tatsache, dass die Reaktion mit Calciumhydroxid aus der Enolform stattfindet. Versuche zur katalytischen Beeinflussung des Verhältnisses mittels Natriumhydroxid oder Natriumsulfit [11] und damit zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit blieben erfolglos. Die aus verschiedenen Versuchsreihen mit Kalkhydraten gefundenen Ergebnisse sind nachfolgend (Tabelle 47) zusammengefasst.

Produkt	Calciumhydroxid (Ca(OH) ₂) ermittelt mit der		Wiederfindungsrate
	Titrationmethode	Esterextraktion	
	M. - %		%
Kalkhydrat CL 80	71	63	89
Kalkhydrat CL 80	75	72	96
Dolomithydrat DL 85	54	52	96
Kalkhydrat CL 90	92	92	100
Kalkhydrat CL 90	93	91	98
Kalkhydrat CL 90	95	95	100
Kalkhydrat CL 90	92	90	98
Kalkhydrat CL 90	96	92	95

Tabelle 47: Bestimmungen von Calciumhydroxid an Kalkhydraten

Im nächsten Schritt wurde das im gesamten Forschungsvorhaben verwendete Kalkhydrat in unterschiedlichen Massenverhältnissen mit den Füllern gemischt und mit der Titrations- und

der Esterextraktionsmethode analysiert. Die Ergebnisse sind auszugsweise in der Tabelle 48 enthalten und zeigen mit beiden Methoden Wiederfindungsraten zwischen 98 und 106 %. Die höheren Wiederfindungsraten mit der Titrationsmethode sind auf die schlechtere Endpunktsbestimmung durch die Eigenfärbung der Suspensionen zurückzuführen. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass beide Methoden für die Bestimmung von Kalkhydrat in Mischfüllern geeignet sind.

Füller/KH	Esterextraktionsmethode			Titrationsmethode	
	Ca(OH) ₂ berechnet	Ca(OH) ₂ gemessen	WFR	Ca(OH) ₂ gemessen	WFR
	M.- %		%	M.-%	%
Basalt/KH					
Blindwert Füller		0,5		0,1	
90/10	9,2	9,2	100	9,5	101
80/20	18,4	18,0	98	18,9	103
Moräne/KH					
Blindwert Füller		0,4		0,7	
90/10	9,2	8,9	97	9,5	103
80/20	18,4	18,5	100	19,0	103
Kalkstein/KH					
Blindwert Füller		0,2		0,2	
90/10	9,2	9,3	100	9,8	106
80/20	18,4	18,5	100	18,8	102

Anmerkung: Die berechneten Ca(OH)₂ -Werte basieren auf einem mit der Titrationsmethode gefundenen Wert von 95%. Die gemessenen Werte sind blindwertkorrigiert.

Tabelle 48: Analysen von Mischfüllern mit Titrations- und Esterextraktionsmethode

3.3.3 Überprüfung der Eignung der Verfahren an extrahierten Asphaltmischungen

Mit den Gesteinskörnungen Basalt und Moräne, von denen letztere auf den Beobachtungsstrecken zum Einsatz kam, wurden im Labor Asphaltmischungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Fülleranteils hergestellt. Die Mischungsreihen wurden durch Kalksteinkörnungen ergänzt, da die Analysenergebnisse aufgrund der langjährigen Erfahrungen mit diesem Stoff einfacher zu beurteilen sind. Als Bitumen kam ein B 160/220 (B 1) mit ei-

nem Massenanteil von 6,5 % bezogen auf die Gesteinskörnungen zum Einsatz. Die Fülleranteile in jedem Asphaltmischgut sind in der Tabelle 49 aufgeführt.

Zusammensetzung der Gesteinskörnungen		Kornklasse, mm	M.-%	Probe Nr.	Zusammensetzung des Fülleranteils (3), < 0,09 mm, M. - %	
1	Edelsplitt (Ba, Mo, KSt)	8/11	50	M 1	BaF	100
		5/8	18	M 2	BaF / KH	95 / 5
		2/5	10	M 3	BaF / KH	80 / 20
2	Edelbrechsand (Ba, Mo, KSt)	0,09/2	12	M 7	MoF	100
				M 8	MoF / KH	95 / 5
				M 9	MoF / KH	80 / 20
3	Fülleranteil	0/0,09	10	M 10	MoF / KStF / KH	50 / 25 / 25
				M 15	KStF	100
				M 16	KStF / KH	80 / 20

Ba = Basalt; Mo = Moräne; KSt = Kalkstein; F = Füller; KH = Kalkhydrat

Tabelle 49: Zusammensetzung der im Labor hergestellten Asphaltmischungen

Die hergestellten Asphaltmischungen wurden mittels Trichlorethylen extrahiert und in die Fraktionen getrennt. Der Fülleranteil < 0,09 mm wurde in einer Hülse aufgefangen. Der Hülseinhalt wurde in eine Glasschale überführt und bei 105°C im Trockenschrank getrocknet und danach in einem verschlossenen Gefäß aufbewahrt. Die extrahierten Füller wiesen Inhomogenitäten in Form von Klumpenbildung und sichtbarer Entmischung auf. Zur Gewährleistung einer homogenen Probe wurde das Material im Mörser durchmischt und anschließend auf 0,09 mm abgesiebt.

Die Analysen wurden mit den drei zu überprüfenden Bestimmungsmethoden, der Titrationsmethode, der Zuckermethode und der Esterextraktionsmethode durchgeführt. Dabei waren im ersten Schritt die Schwierigkeit der Dispergierung der Proben in der Vorlage zu überwinden. Dies gelang am einfachsten bei der Esterextraktionsmethode, bei der die Vorlage aus Butanol/Acetessigester besteht, durch Verlängerung der Rührzeit auf ca. 30 min bei Raumtemperatur, bevor die Probe in der Extraktionsapparatur erhitzt wurde.

Bei den beiden anderen Methoden mit einer wässrigen Vorlage ließen sich die Dispergierprobleme durch Zusatz einer Tensidlösung verringern, so dass nach einer Rührzeit von ca. 30 min homogene Mischungen zur Analyse vorlagen. Als Ursache für die höhere Oberflächenspannung kann bei extrahierten Füllern trotz Trocknung noch anhaftendes Lösungsmittel bzw. nicht abgelöste Bitumenkomponenten angenommen werden. Dies wird auch aus den Analysen der Glühverluste deutlich, auf die im Folgenden noch eingegangen wird.

Die Tabellen 50 bis 52 enthalten die mit den drei Verfahren gewonnenen Ergebnisse. Die Calciumhydroxidwerte sind um die Blindwerte der jeweiligen Füller (M1, M7, M15) korrigiert und als Mittelwerte aus einer Vielzahl von Einzelwerten zur Überprüfung der Homogenität der Proben sowie der Reproduzierbarkeit der Verfahren dargestellt. Die Messwerte wurden von Calciumhydroxid auf Kalkhydrat mit einem Massenanteil von 95 % an Calciumhydroxid umgerechnet. Die Wiederfindungsrate (WFR) stellt den Bezug zu den in Tabelle 49 aufgeführten Massenanteilen an Kalkhydrat in den eingesetzten Füllern her.

Eine erste Interpretation der Ergebnisse lässt den Schluss zu, dass die drei Prüfverfahren prinzipiell als Nachweisverfahren für Kalkhydrat in Asphaltmischgut geeignet sind, da sie Ergebnisse in der gleichen Größenordnung bei einer solch komplexen Matrix wie der vorliegenden liefern. Ein weiteres Augenmerk ist auf die Wiederfindungsraten zu richten, die eine Abhängigkeit von der eingesetzten Gesteinskörnung offenbaren.

Probe	Ca(OH) ₂ ,blindwertkorrigiert,	Kalkhydrat IST	Kalkhydrat SOLL	WFR
	M. - %			%
M 1	0,0	--	--	--
M 2	2,9	3,1	5,0	62
M 3	12,1	12,8	20,0	64
M 7	1,85	--	--	--
M 8	3,7	3,9	5,0	78
M 9	14,9	15,6	20,0	78
M 10	17,7	18,7	25,0	75
M15	0,1	--	--	--
M16	17,6	18,5	20,0	92

Tabelle 50: Messwerte an extrahierten Füllerproben mit der **Titrationmethode**

Probe	Ca(OH) ₂ ,blindwertkorrigiert,	Kalkhydrat IST	Kalkhydrat SOLL	WFR
	M. - %			%
M 1	0,0	--	--	--
M 2	2,9	3,0	5,0	60
M 3	12,1	12,7	20,0	63
M 7	1,7	--	--	--
M 8	3,3	3,5	5,0	72
M 9	15,1	15,9	20,0	80
M 10	18,7	19,7	25,0	79

Tabelle 51: Messwerte an extrahierten Füllerproben mit der **Zuckermethode**

Probe	Ca(OH) ₂ ,blindwertkorrigiert,	Kalkhydrat IST	Kalkhydrat SOLL	WFR
	M. - %			%
M 1	0,0	--	--	--
M 2	2,5	2,5	5,0	51
M 3	12,1	12,7	20,0	64
M 7	0,8	--	--	--
M 8	3,8	4,0	5,0	81
M 9	15,5	16,3	20,0	82
M 10	19,5	20,0	25,0	80

Tabelle 52: Messwerte an extrahierten Füllerproben mit der **Esterextraktionsmethode**

Die Grafiken in den nachstehenden Abbildungen 5 bis 7 zeigen die Wiederfindungsraten von Kalkhydrat in Asphaltmischungen mit den einzelnen Gesteinskörnungen und in unterschiedlichen Gehalten an Kalkhydrat. Die Wiederfindungsraten liegen bei Basalt zwischen 51 und 64 %, bei Moräne zwischen 75 und 82°% sowie bei Kalkstein bei 92 % bezogen auf einen geprüften Mischfüller.

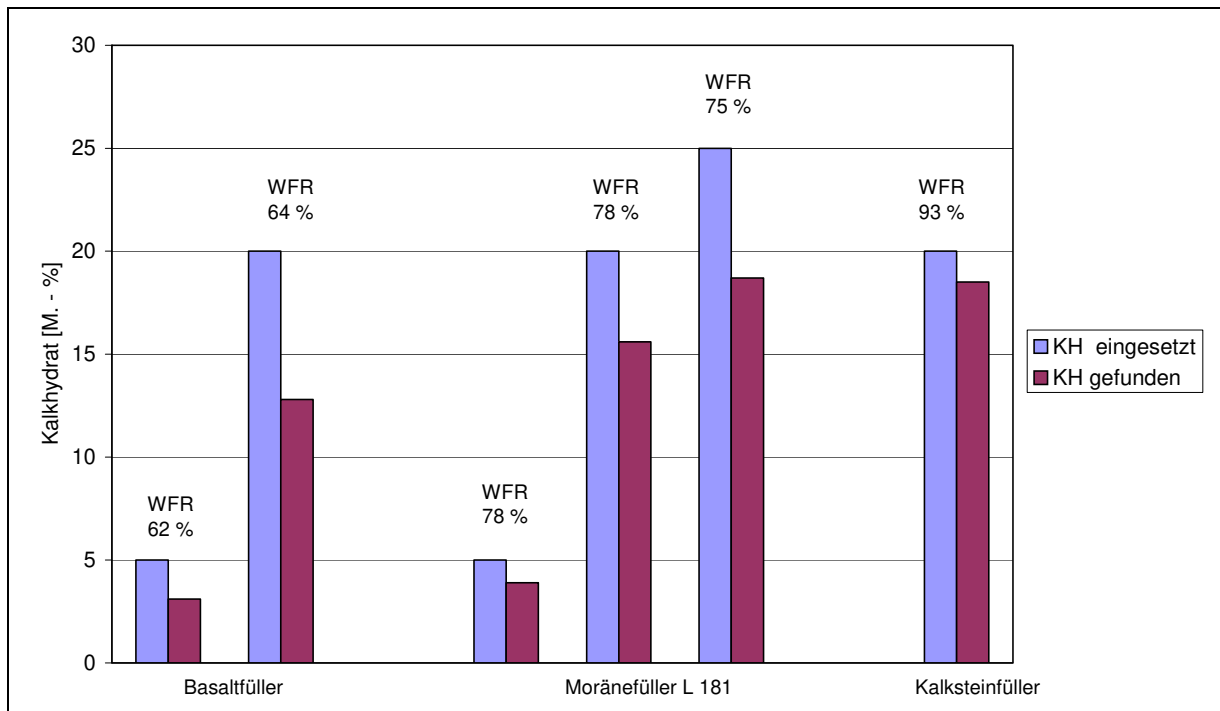


Abbildung 5: Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern bei der Titrationsmethode

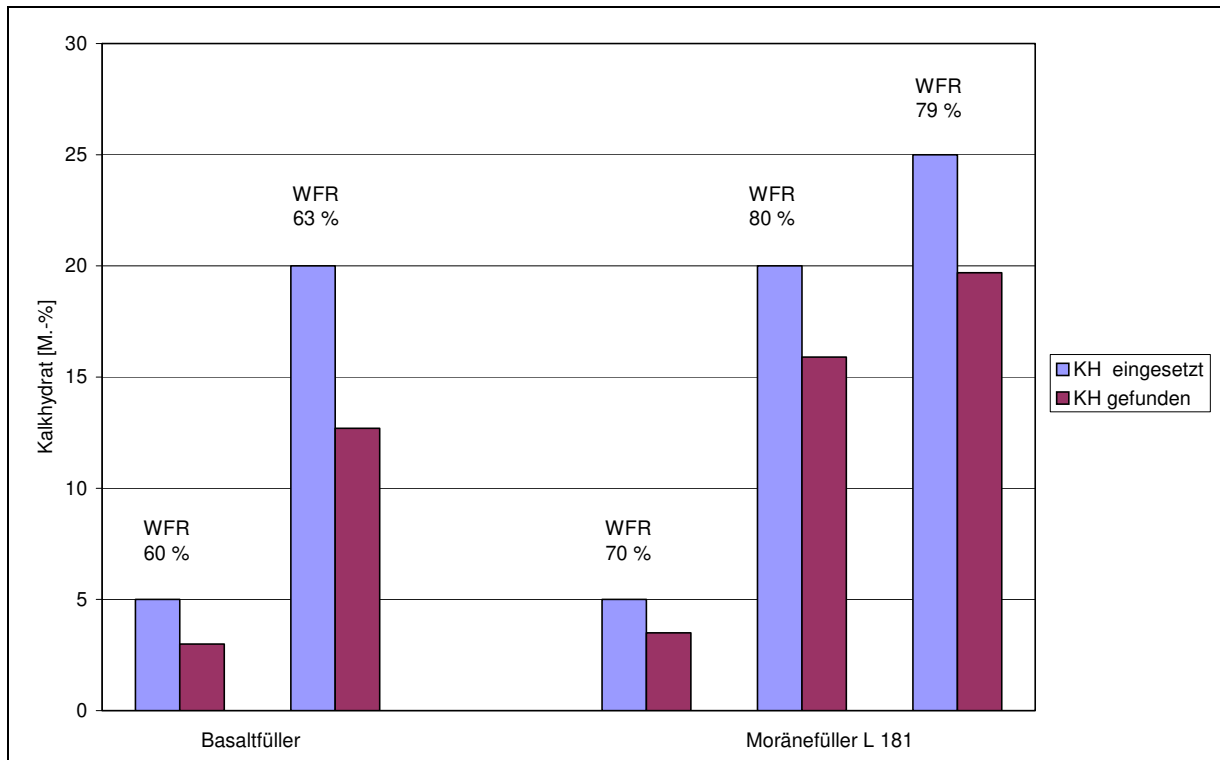


Abbildung 6: Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern bei der Zuckermethode

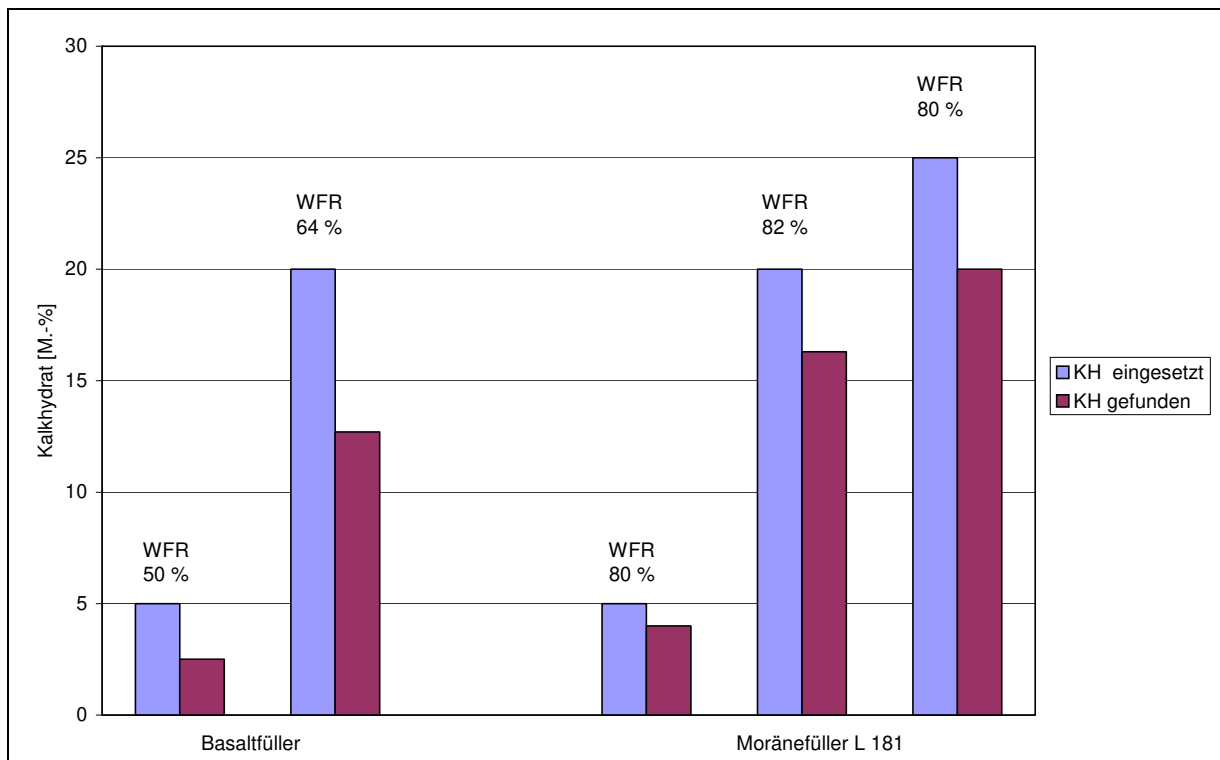


Abbildung 7: Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern bei der Esterextraktionsmethode

Als mögliche Ursache kann als Folge der mineralogischen Zusammensetzung eine unterschiedliche Oberflächenladung der Gesteine angenommen werden. Basalt weist nach der chemischen Analyse (siehe Anhang B.4) einen SiO₂-Gehalt von 48 M.-% auf, was auf eine negative Überschussladung auf der Oberfläche hindeutet. Die freien Calciumionen aus dem Kalkhydrat sollten diese „freien Valenzen“ absättigen können, so dass hieraus ein „Verbrauch“ an Calciumhydroxid resultiert. Diese an der Oberfläche gebundenen Calciumanteile sind demnach der Trennung der Asphaltkomponenten durch Extraktion nicht mehr zugänglich, so dass in den extrahierten Füllern ein geringerer Anteil an Calciumhydroxid bestimmt wird als im Mischgut zugesetzt wurde.

Ein ähnlicher Effekt kann auch für die Moräne postuliert werden, die verglichen mit dem Basalt zwar einen ähnlich hohen SiO₂-Gehalt von 38 M.-% aufweist, aber auch einen CaCO₃-Gehalt von ca. 45 M.-% enthält, der den Effekt der Oberflächenladung abschwächt. Als Beleg hierfür kann die Wiederfindungsrate bei Kalkstein (SiO₂-Gehalt von 2 M.-%, CaCO₃-Gehalt von 95 M.-%) herangezogen werden. Weitere Untersuchungen an im Straßenbau verwendeten Gesteinskörnungen unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzungen sollten hierüber Aufschluss geben.

Zur Überprüfung des Sachverhaltes, dass die Reaktion zwischen Kalkhydrat und dem Gestein stattfindet und nicht vornehmlich zwischen Kalkhydrat und Bitumen, wurden Füller-Bitumen-Mischungen mit Kalkhydrat labortechnisch hergestellt und extrahiert. Die Ergebnisse der Calciumhydroxidbestimmungen weisen aus, dass beim derzeitigen Sachstand keine nachweisbaren chemischen Reaktionen zwischen Bitumenbestandteilen und Kalkhydrat stattfinden.

Die einzelnen Ausgangsfüller, das Kalkhydrat sowie einige extrahierte Füller wurden mittels der Vollanalyse aus dem Glührückstand charakterisiert. In den Tabellen 53 und 54 sind die Werte aus den Analysen der Glührückstände (ermittelt durch Glühen bei 1000 °C) enthalten, die eine gute Übereinstimmung zwischen den extrahierten Füllern mit den Gesteinsmehlen ohne Kalkhydrat und den reinen Gesteinsmehlen zeigen. Hierbei ist zu beachten, dass nicht mehr Calciumhydroxid, sondern Calciumoxid angesprochen wird, da gemäß der Gleichung 4



das Calciumhydroxid beim Glühen sein Hydratwasser verliert.

Es sollte also möglich sein, den Kalkhydratanteil in den extrahierten Füllern rechnerisch zu ermitteln und mit den Ergebnissen aus den drei Analysenverfahren zu vergleichen. Die Berechnung wird gemäß der nachstehenden Gleichung 5

$$\omega (\text{KH}) = [\omega (\text{M X}) - \omega (\text{M Y}) \times 0,8] \times 5 \quad (5)$$

mit den Probennummern: X=1 und Y=3; X=7 und Y=9; X=15 und Y=16.

vorgenommen, in der ω den entsprechenden CaO-Wert aus Tabelle 53 darstellt und bei den Gesteinsmehl/Kalkhydrat - Füllern das Mischungsverhältnis von 80/20 beachtet wird. Da der Kalkhydratanteil in den Mischfüllern 20% beträgt, ist mit „5“ zu multiplizieren, damit der bei Kalkhydrat gefundene Wert (Tabelle 54) resultiert.

Parameter	Füllergemische					
	M 1 (BaF)	M 3 (BaF/KH)	M 7 (MoF)	M 9 (MoF/KH)	M 15 (KStF)	M 16 (KStF/KH)
	M. - %					
Glühverlust	3,2	6,5	21,4	23,0	42,7	39,3
SO ₃	0,03	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3
SiO ₂	48,5	45,2	49,4	41,3	4,5	4,4
Fe ₂ O ₃	13,9	12,7	3,5	2,7	0,7	0,8
Al ₂ O ₃	13,4	12,4	6,2	5,2	1,1	1,1
MgO	10,7	9,9	2,8	2,2	0,6	0,8
CaO	10,4	19,5	33,5	44,5	93,2	92,7
Summe	96,9	99,8	95,5	96,0	100,3	100,1

Tabelle 53: Analysen aus dem Glührückstand – extrahierte Füller

Parameter in %	Füller			
	BaF	MoF	KStF	KH
	M. - %			
Glühverlust	3,0	21,8	42,7	25,1
SO ₃	0,02	0,1	0,09	0,1
SiO ₂	50,2	49,0	4,4	0,6
Fe ₂ O ₃	13,8	2,9	0,6	0,2
Al ₂ O ₃	13,8	6,0	1,2	0,2
MgO	10,8	2,4	0,5	0,5
CaO	10,0	35,2	93,3	98,0
Summe	98,6	95,6	100,1	99,6

Tabelle 54: Analysen aus dem Glührückstand – reine Füller

In Tabelle 55 sind die nach Gleichung 5 berechneten CaO-Werte als Wiederfindungsraten im Vergleich mit den Wiederfindungsraten aus Tabellen 50-52 aufgeführt.

Proben	Wiederfindungsrate Tabellen 54-56	Wiederfindungsrate Tabellen 57-58
	%	
M 3	62	57
M 9	80	90
M 16	92	93

Tabelle 55: Wiederfindungsraten bei den drei Analysenverfahren im Vergleich mit den CaO-Werten aus Vollanalysen

Der Vergleich macht deutlich, dass bei den drei titrimetrischen Analysenverfahren keine höheren Wiederfindungsraten gemessen werden können, da kein „höheres Angebot“ an „freiem“ Calciumoxid vorlag. Die Berechnungen zeigen die Richtigkeit der Analyseergebnisse mit den drei titrimetrischen Verfahren.

3.3.4 Leitfähigkeitsmessungen

In einem früheren Forschungsvorhaben [12] war die Analyse von Kalkhydrat mittels Leitfähigkeitsmessung Gegenstand der Arbeiten. Dabei wurde ein Verfahren zur Messung der Auflösungsgeschwindigkeit entwickelt, mit dem Kalkhydratprodukte hinsichtlich ihrer Eignung für die Schnellentcarbonisierung bei der Trinkwasseraufbereitung klassifiziert werden können. Die Prüfapparatur besteht aus

- einem Leitfähigkeitsmessgerät mit RS 232 Schnittstelle zur schnellen Datenübertragung auf einen Computer sowie
- einer thermostatisierbaren Messzelle, die mit Stickstoff als Schutzgas gespült wird.

Es war also die Frage zu klären, ob die Messung der Leitfähigkeit zur Bestimmung der Calciumhydroxidgehalte in Kalkhydrat, Mischfüller und extrahiertem Füller geeignet ist. Zur Auswertung werden die sog. Ringquist-Tabellen [13] herangezogen, die gemessene Leitfähigkeitswerte für CaO in der Konzentrationseinheit g/l in Abhängigkeit von der Temperatur der Messlösung enthalten. Der gemessene Leitfähigkeitswert entspricht einem bestimmten Konzentrationswert, aus dem die in das Messgefäß eingebrachte Ca(OH)_2 - Konzentration ermittelt wird.

Im ersten Schritt wurden die Versuchsbedingungen für die Messungen an Kalkhydraten festgelegt, die im weiteren auf die Mischfüller und die extrahierten Füller zu übertragen waren. Die Probe wurde als Feststoff zu einer wässrigen Vorlage gegeben, die im geschlossenen Gefäß bei 22°C unter Aufzeichnung der Leitfähigkeitswerte gerührt wurde. Die Tabelle 56 zeigt einige ausgewählte Ergebnisse zu den Messungen an Kalkhydraten.

Probe	Probenmenge im Messgefäß	Messzeit	gemessene Leitfähigkeit	Ca(OH) ₂ n. Berechnung aus Ringqvist-Tabellen	WFR
	g/l	h	mS/cm	g/l	%
KH 1	1,001	1,5	5,106	0,96	98
	0,505	0,5	2,817	0,50	98
	1,077	0,5	5,329	1,02	99
	0,998	1,0	5,123	0,98	97
KH 2	1,018	1,5	5,384	0,95	98

Tabelle 56: Leitfähigkeitsmessungen an Kalkhydraten

Die Ergebnisse zeigen sehr gute Wiederfindungsraten bei der Leitfähigkeitsmessung. Die Messzeit bis zum Erreichen des maximalen Leitfähigkeitswertes ist aber mit bis zu 1,5 Stunden als zu lang anzusehen. Im nächsten Schritt wurden die Blindwerte der einzelnen Gesteinsmehle, mit denen die Mischfüller hergestellt wurden, analysiert. Dabei wurden keine nennenswerten Beiträge der Gesteinsmehle zur Leitfähigkeit gefunden, so dass die in verschiedenen Mischungsanteilen hergestellten Mischfüller die entsprechend den Konzentrationen an Kalkhydrat erwarteten Leitfähigkeitswerte zeigten.

Die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen an extrahierten Füllern spiegeln aber die schon in Abschnitt 3.3.3 dargestellten Dispergierprobleme in einer wässrigen Vorlage wider. In keinem Fall konnte eine der den drei schon vorgestellten Analysenverfahren äquivalente Calciumhydroxidkonzentration durch die Leitfähigkeitsmessung gefunden werden. Auch der Einsatz von Dispergiermitteln zeigt keine Erfolge, da jeder Zusatz von lösungsvermittelnden Stoffen die Beweglichkeit der OH⁻ - Ionen und damit deren Beitrag zur Leitfähigkeit einschränkt.

Bei den extrahierten Füllerproben entsprechen die gemessenen Leitfähigkeitswerte einer Wiederfindungsrate zwischen 70 und 80% der mit den drei titrimetrischen Verfahren gefundenen Werten. Da letztere Verfahren sich auch von der Handhabbarkeit her als wesentlich praktikabler im Hinblick auf die zu erwartenden Prüfungen in der Praxis erwiesen haben, wurde auf weitere Untersuchungen zum Leitfähigkeitsverfahren verzichtet.

3.4 Analysen der Asphalte der Beobachtungsstrecken – Einbaumischgut und Bohrkerne

An den aus den beiden Beobachtungsstrecken entnommenen Proben des Einbaumischgutes und der Bohrkerne wurde der Fülleranteil nach Extraktion mit den drei Nachweisverfahren analysiert. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 57 bis 60 dargestellt. Die Felder 1 und 2 bzw. A und B enthalten kein Kalkhydrat im Fülleranteil. Die Felder 3 und 4 bzw. C und D enthalten den Mischfüller mit Kalkhydrat.

Die Messwerte weisen aus, dass die drei Nachweisverfahren auch auf großtechnisch hergestelltes Asphaltmischgut anzuwenden sind.

SMA 0/8S; B 27 Einbaumischgute	Ca(OH) ₂ [M.-%]		
	Esterextraktions- methode	Titrationen-methode	Zucker-- methode
Feld 1	0,83	1,33	1,30
Feld 2	0,88	1,25	1,28
Feld 3	28,4	29,3	29,6
Feld 4	28,0	28,9	29,1

Tabelle 57: Analyse der Einbaumischgute der B 27

SMA 0/8S; B 27 Bohrkerne	Ca(OH) ₂ [M.-%]		
	Esterextraktions- methode	Titrationen-methode	Zucker-- methode
Feld 1	0,56	0,87	1,07
Feld 2	0,46	0,72	0,85
Feld 3	26,7	29,2	29,3
Feld 4	24,8	26,0	26,5

Tabelle 58: Analyse der Bohrkerne der B 27 nach 1,5 Jahren

AB 0/11; L 181 Einbaugemische	Ca(OH) ₂ [M.-%]		
	Esterextraktions- methode	Titrationen-methode	Zucker-- methode
Feld A	0,83	0,56	0,56
Feld B	0,65	0,65	0,83
Feld C	22,4	23,5	23,7
Feld D	23,5	24,6	24,8

Tabelle 59: Analyse der Einbaugemische der L 181

AB 0/11; L 181 Bohrkerne	Ca(OH) ₂ [M.-%]		
	Esterextraktions- methode	Titrationen-methode	Zucker-- methode
Feld A	0,56	0,56	0,72
Feld B	0,56	0,74	0,98
Feld C	18,8	19,8	19,6
Feld D	20,6	20,7	20,8

Tabelle 60: Analyse der Bohrkerne der L 181 nach 1,5 Jahren

3.5 Bewertung der Analysenverfahren

Die in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Prüfverfahren zur Bestimmung von Calciumhydroxid in Kalkprodukten sind in diesem Forschungsvorhaben hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf extrahierte Füller aus Asphaltmischgut getestet worden. Alle Verfahren wurden entsprechend modifiziert, da die Matrix, in der Kalkhydrat eingebunden ist, Änderungen bei der Probenbehandlung erzwingt. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse zu den drei Prüfverfahren zusammengestellt.

Titrationenmethode :

- Die Zugabe einer Tensidlösung zur Herabsetzung der Oberflächenspannung ist erforderlich,
- die Methode ist für alle Füllerkomponenten uneingeschränkt einsetzbar,
- die Methode ist schnell und mit geringem Geräteaufwand handhabbar,

- bei durch die Farbe der eingesetzten Füllerkomponenten gefärbten Suspensionen ist die Entfärbung des Indikators schwer zu erkennen.

Zuckermethode :

- die Zugabe einer Tensidlösung zur Herabsetzung der Oberflächenspannung ist erforderlich,
- die Methode ist für alle Füllerkomponenten uneingeschränkt einsetzbar,
- die Methode erfordert einen Filtrationsschritt, der aber mit geringem Geräteaufwand durchführbar ist,
- das Filtrat ist in der Regel farblos, so dass der Farbumschlag des Indikators leicht zu erkennen ist.

Esterextraktionsmethode :

- erfordert organische Lösungsmittel, daher sind sicherheitsrelevante Maßnahmen erforderlich,
- Spezialapparatur erforderlich, daher hoher Geräteaufwand,
- die Methode ist nur von geschultem Personal auszuführen,
- Rückstände sind einem Entsorgungssystem zuzuführen,
- die Methode ist bei reinen Kalkhydraten nur eingeschränkt verwendbar.

Die Analyseergebnisse bei den Mischfüllern und extrahierten Füllern weisen die drei Verfahren im Rahmen der erforderlichen Messgenauigkeit als vergleichbar aus. Die aufgelisteten Randparameter machen jedoch klar, dass die Titrations- und die Zuckermethode mit geringem gerätetechnischen Aufwand in jedem Labor durchgeführt werden können. Wegen der einfachen Handhabbarkeit im Hinblick auf die Anwendungen in der Praxis wird die Titrationsmethode als Referenzverfahren und die Zuckermethode als Alternativverfahren eingestuft.

3.6 Zusammenfassung

Für die Entwicklung der Nachweisverfahren wurden die in der Eignungsprüfung festgelegten und bei der Mischgutherstellung eingesetzten Füllerkomponenten und ein Basalt für die Laborversuche verwendet. Die Nachweisverfahren wurden nach Verifizierung auf die extrahier-

ten Füller (< 0,09 mm) aus dem Einbaumischgut und den Bohrkernen der Beobachtungsstrecken angewendet.

Grundlage für die Entwicklung der Nachweisverfahren bildeten die in der Kalkanalytik gebräuchlichen Verfahren der Titration mit Salzsäure. Hierzu wurden Mischungen aus Kalkhydrat und den einzelnen Füllern mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Fülleranteils hergestellt und dem Esterextraktions- und dem Titrationsverfahren unterworfen. Die Ergebnisse belegen, dass diese beiden Verfahren für die Bestimmung von Kalkhydrat in Mischfüllern bei einer Wiederfindungsrate von annähernd 100 % geeignet sind.

Im nächsten Schritt der Untersuchungen wurden mit den Gesteinskörnungen Basalt, Moräne und Kalkstein und einem Bitumen B 160/220 im Labor Asphaltmischungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Fülleranteils hergestellt. Nach Extraktion dieser Asphalte wurden die aufbereiteten Füllerfraktionen mit den drei Bestimmungsmethoden, Titrationsmethode, Zuckermethode und Esterextraktionsmethode analysiert. Dabei wurden die Dispergierprobleme in der wässrigen Vorlage durch Zugabe einer Tensidlösung beseitigt. Dieses Problem trat bei der Esterextraktionsmethode nicht auf, da die Vorlage aus organischen Lösungsmitteln besteht.

Die Interpretation dieser Ergebnisse lässt den Schluss zu, dass die drei Prüfverfahren (siehe Anhang A.4) als Nachweisverfahren für Kalkhydrat in Asphaltmischgut geeignet sind, da sie Ergebnisse in der gleichen Größenordnung bei einer solch komplexen Matrix wie der vorliegenden liefern. Die ermittelten Wiederfindungsraten offenbaren eine Abhängigkeit von der eingesetzten Gesteinskörnung.

Neben den titrimetrischen Verfahren wurde auch die Leitfähigkeitsmessung auf Kalkhydrate, Mischfüller und extrahierten Füller angewendet. Dabei zeigte sich, dass dieses Verfahren zwar bei Kalkhydrat und Mischfüller geeignet ist, aber bei extrahierten Füllern die Dispergierprobleme eine Anwendung ausschließen.

Die Füllerkomponente der während der Einbauphase entnommenen Mischgutproben und die der nach eineinhalbjähriger Liegedauer gezogenen Bohrkern wurden mit den drei Analyseverfahren untersucht. Die Messwerte weisen aus, dass die drei Nachweisverfahren auch auf großtechnisch hergestelltes Asphaltmischgut anzuwenden sind.

Die Analysenergebnisse, der geringere gerätetechnische Aufwand für ein Straßenbaulabor und die Handhabbarkeit zeigen, dass die Titrationsmethode als Referenzverfahren und die Zuckermethode als Alternativverfahren für die erforderlichen Prüfungen im Asphaltstraßenbau festgelegt werden sollten.

4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerung

Der Grundgedanke dieser Untersuchung die Asphalteigenschaften an in Straßen eingebauten Splittmastixasphalt- und Asphaltbeton-Deckschichten bestand darin, die im Labor festgestellten Ergebnisse (AiF-Nr. 10 656) mit der Praxis nach mehreren Jahren Liegezeit abzugleichen. Um den Einfluss der des Kalkhydrates auf die Eigenschaften der Asphalte zu prüfen wurden dazu zwei Beobachtungsstrecken eingerichtet. Die Ausgangsrezepturen der Eignungsprüfungen wurde modifiziert indem unterschiedliche Bindemittelgehalte und unterschiedliche Verhältnisse Eigenfüller/Mischfüller (Kalksteinmehl/Kalkhydrat) in jeweils 4 Feldern der Strecken angeordnet wurden.

Zunächst wurden die Beobachtungsstrecken zusammen mit der Straßenbauverwaltung ausgewählt und die Möglichkeit zur großtechnischen Herstellung im Mischwerk geprüft. Dabei wurde festgestellt, dass kein Umbau der Mischanlagen zur Dosierung von Kalkhydrat notwendig ist, wenn im Forschungsvorhaben ein Mischfüller, der zu 50 M.-% aus Kalksteinmehl und zu 50M.- % aus Kalkhydrat besteht, verwendet wird. Hierfür ist nur ein gesondertes Fremdfüllersilo vorzuhalten.

In der ersten Phase wurden Eignungsprüfungen für zwei Mischgutarten aufgestellt, Splittmastixasphalt SMA 0/8 S zum Einbau auf der Bundesstraße B 27 bei Dußlingen und Asphaltbeton AB 0/11 zum Einbau auf der Umgehungsstraße L 181 bei Bräunlingen. Die Beobachtungsstrecken weisen unterschiedliche Verkehrsbelastungen auf. Die Verkehrsbelastung auf der B 27 ist der Bauklasse II, die Verkehrsbelastung auf der L 181 ist der Bauklasse III zuzuordnen.

Auffällig war, dass beim einaxialen Zugversuch vor und nach Wassereinwirkung der SMA 0/8 S weit weniger Zugfestigkeitsabfall zeigte, als der AB 0/11 (siehe Tabelle 61).

	Verlust an Zugfestigkeit nach Wasserlagerung in %	
	ohne Kalkhydrat	mit Kalkhydrat
SMA 0/8 S	8,5	2,4
AB 0/11	47,5	9,4

Zugfestigkeitsabfall nach Wasserlagerung

Material	ohne Kalkhydrat (%)	mit Kalkhydrat (%)
SMA 0/8 S	8,5	2,4
AB 0/11	47,5	9,4

Tabelle 61: Vergleich der Ergebnisse des Zugfestigkeitsabfalls

Daraus kann gefolgert werden, dass die Reduzierung des Zugfestigkeitsabfalls bzw. die Verbesserung des Haftverhaltens durch Zugabe von Kalkhydrat umso deutlicher ausgeprägt ist, je geringer die Bindemittelfilmdicke ist, wie beispielsweise beim Vergleich Asphaltbeton zum SMA.

Parallel zum Einbau des Mischgutes in den jeweils 4 Feldern wurden regelmäßig Messungen mit der Isotopensonde durchgeführt. Hierdurch konnte eine gleichbleibende Qualität des Asphalts in den einzelnen Feldern sichergestellt werden. Nach dem Einbau wurden Kontrollprüfungen im Sinne der ZTV Asphalt-StB 94/98 [9] durchgeführt.

Die Ergebnisse aus der Bestimmung des Erweichungspunktes, dargestellt in Tabelle 62, am zurückgewonnenen Bindemittel zeigen, dass die bei der großtechnischen Mischgutherstellung eintretende Bindemittelverhärtung, durch Zugabe von Kalkhydrat vermindert werden kann und auch nach längerer Liegezeit (1,5 Jahre) keine weitere Verhärtung auftritt.

	Erweichungspunkt Ring und Kugel in °C		
	Ausgangsbindemittel	Kontrollprüfung	1. Nachuntersuchung 2002
SMA 0/8 S ohne Kalkhydrat	53,0	57,5	56,0
SMA 0/8 S mit Kalkhydrat		55,5	54,5
AB 0/11 ohne Kalkhydrat	47,0	55,5	56,0
AB 0/11 mit Kalkhydrat		49,5	49,0

Tabelle 62: Vergleich der Ergebnisse des EP RuK

Durch die Untersuchung der Dehnungsrate ist ein „Nullwert“ ermittelt worden, der für die Bewertung der Standfestigkeit dient. Eine Änderung der Dehnungsraten ist nur beim SMA 0/8 in den ersten 1,5 Jahren eingetreten. Die Unterschiede beim AB 0/11 sind nur marginal (Tabelle 63).

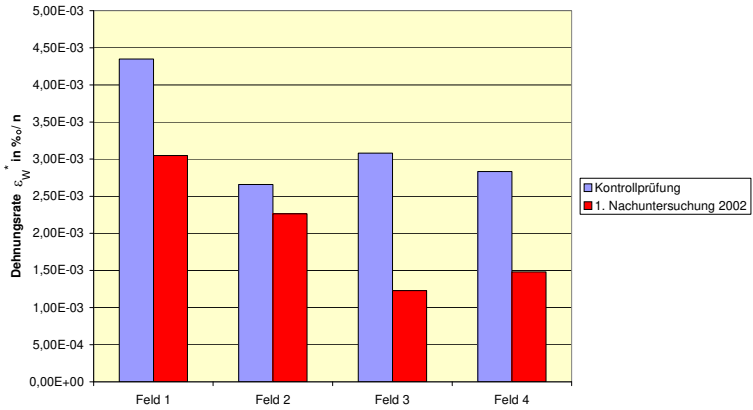
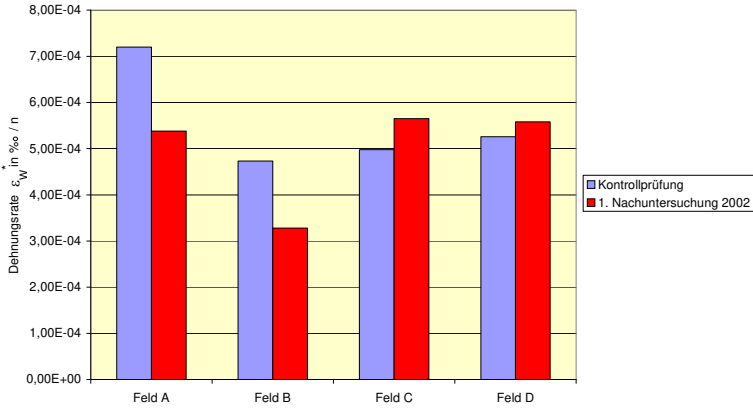
		Dehnungsrate ϵ_w^* in ‰ / n im einaxialen Druckschwellversuch	
		Kontrollprüfung	1. Nachuntersuchung 2002
SMA 0/8 S	Feld 1	$43,49 \cdot 10^{-4}$	$30,49 \cdot 10^{-4}$
	Feld 2	$26,59 \cdot 10^{-4}$	$22,64 \cdot 10^{-4}$
	Feld 3	$30,80 \cdot 10^{-4}$	$12,29 \cdot 10^{-4}$
	Feld 4	$28,33 \cdot 10^{-4}$	$14,81 \cdot 10^{-4}$
		<p style="text-align: center;">Dehnungsrate im einaxialen Druckschwellversuch bei SMA 0/8 S</p> 	
AB 0/11	Feld A	$7,20 \cdot 10^{-4}$	$5,38 \cdot 10^{-4}$
	Feld B	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$3,28 \cdot 10^{-4}$
	Feld C	$4,98 \cdot 10^{-4}$	$5,65 \cdot 10^{-4}$
	Feld D	$5,26 \cdot 10^{-4}$	$5,58 \cdot 10^{-4}$
		<p style="text-align: center;">Dehnungsrate im einaxialen Druckschwellversuch bei AB 0/11</p> 	

Tabelle 63: Vergleich der Ergebnisse der Dehnungsrate im einaxialen Druckschwellversuch
Kontrollprüfung und 1. Nachuntersuchung 2002

Durch die Zugabe von Kalkhydrat steigt die Viskosität im Laufe der Liegezeit in unterschiedlichem Maße an (siehe Tabelle 64).

		Zugviskosität ν in Ns/mm^2			
		Eignungsprüfung		1. Nachuntersuchung 2002	
		ν_i	ν_m	ν_i	ν_m
SMA 0/8 S	ohne Kalkhydrat	$1,55 \cdot 10^4$ $1,48 \cdot 10^4$	$1,52 \cdot 10^4$	$6,73 \cdot 10^4$ $6,46 \cdot 10^4$	$6,60 \cdot 10^4$
	mit Kalkhydrat	$2,13 \cdot 10^4$ $2,22 \cdot 10^4$	$2,18 \cdot 10^4$	$8,08 \cdot 10^4$ $7,78 \cdot 10^4$	$7,93 \cdot 10^4$
		<p style="text-align: center;">Zugviskosität des SMA 0/8 S</p>			
AB 0/11	ohne Kalkhydrat	$2,67 \cdot 10^4$ $2,84 \cdot 10^4$	$2,76 \cdot 10^4$	$4,04 \cdot 10^4$ $3,69 \cdot 10^4$	$3,87 \cdot 10^4$
	mit Kalkhydrat	$4,15 \cdot 10^4$ $3,95 \cdot 10^4$	$4,05 \cdot 10^4$	$4,59 \cdot 10^4$ $4,70 \cdot 10^4$	$4,65 \cdot 10^4$
		<p style="text-align: center;">Zugviskosität des AB 0/11</p>			

Tabelle 64: Vergleich der Ergebnisse der Zugviskosität Eignungsprüfung und 1. Nachuntersuchung 2002

Erstaunlich ist auch, dass bei geringeren Bindemittelmengen die Eigenschaften Standfestigkeit, Viskosität und EP RuK durch Zugabe von Kalkhydrat derart verbessert werden, dass davon auszugehen ist, dass Schwankungen im Bindemittelgehalt kompensiert werden können.

Das Nachweisverfahren zur Bestimmung des Kalkhydratgehaltes in Mischfüllern und extrahierten Füllern wurden auf der Basis der in der Kalkanalytik gebräuchlichen Verfahren der Titration mit Salzsäure entwickelt.

Mischungen aus Kalkhydrat und den einzelnen Füllern mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Fülleranteils wurden hergestellt und dem Esterextraktions- und dem Titrationsverfahren unterworfen. Die Ergebnisse belegen, dass diese beiden Verfahren für die Bestimmung von Kalkhydrat in Mischfüllern bei einer Wiederfindungsrate von annähernd 100 % geeignet sind.

Im Labor hergestellte Asphaltmischungen mit variierten Fülleranteilen wurden extrahiert und die aufbereiteten Füllerfraktionen wurden mit der Titrationsmethode, der Zuckermethode und der Esterextraktionsmethode analysiert. Die eingesetzten Verfahren wurden modifiziert, da die Matrix, in der Kalkhydrat eingebunden ist, Änderungen bei der Probenbehandlung erzwingt. Die drei Prüfverfahren sind auch als Nachweisverfahren für Kalkhydrat in Asphaltmischgut geeignet.

Die nachstehende Grafik zeigt die über die drei Analysenverfahren gemittelten Wiederfindungsraten von Kalkhydrat in Asphaltmischungen mit den einzelnen Gesteinskörnungen und in unterschiedlichen Gehalten an Kalkhydrat. Diese Mittelwertbildung wurde vorgenommen, da die Werte der einzelnen Verfahren in der gleichen Größenordnung liegen. Die Wiederfindungsraten sind bei Basalt zwischen 51 und 64 %, bei Moräne zwischen 76 und 82°% sowie bei Kalkstein bei 92 % bezogen auf einen geprüften Mischfüller.

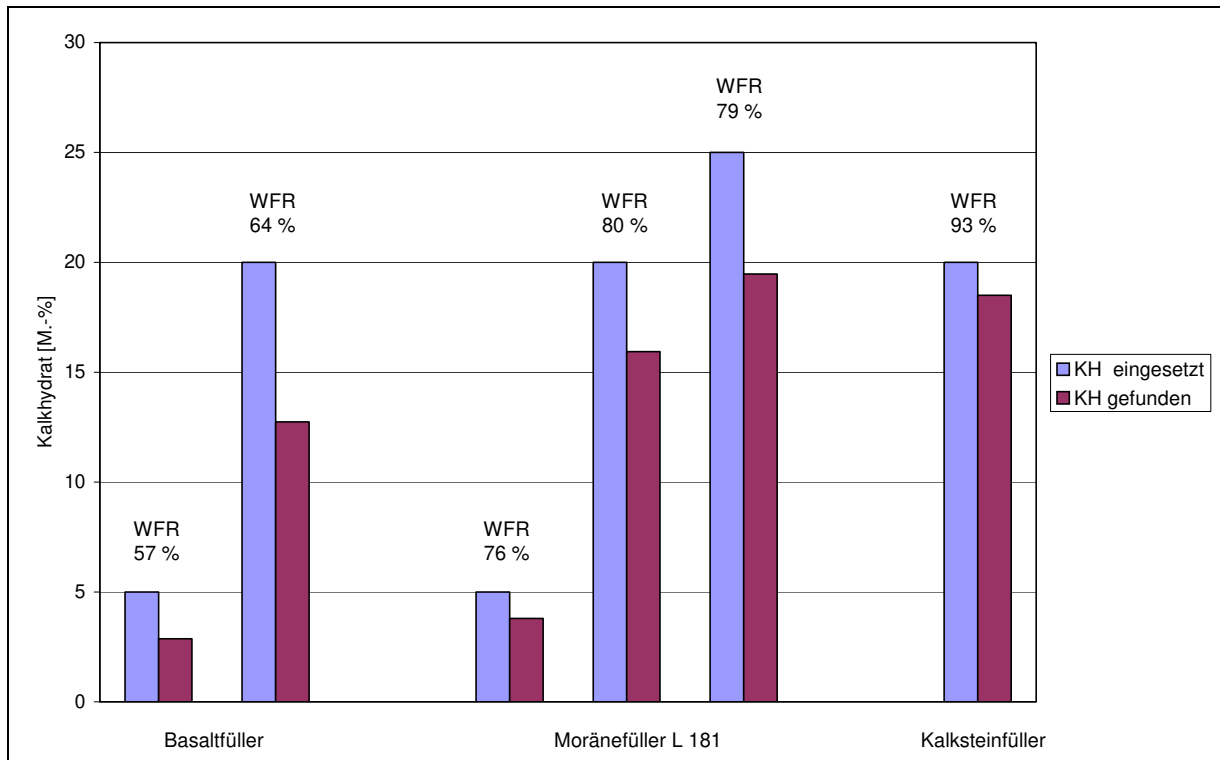


Abbildung 8: gemittelte Wiederfindungsraten an extrahierten Füllern

Die Nachweisverfahren wurden nach Verifizierung auf die extrahierten Füller (< 0,09 mm) aus dem Einbaumischgut und den Bohrkernen der Beobachtungsstrecken angewendet. Die Messwerte weisen aus, dass die drei Nachweisverfahren auch auf großtechnisch hergestelltes Asphaltmischgut anzuwenden sind.

Die Analyseergebnisse, der geringere gerätetechnische Aufwand für ein Straßenbaulabor und die Handhabbarkeit zeigen, dass die Titrationsmethode als Referenzverfahren und die Zuckermethode als Alternativverfahren für die erforderlichen Prüfungen im Asphaltstraßenbau festgelegt werden sollten.

Weitere Begutachtungen und Beprobungen der Beobachtungsstrecken werden Auskunft darüber geben wie sich die Eigenschaften der Asphalte verändern, da die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mögliche maximale Liegezeit von 1,5 Jahren nicht als ausreichend für die Bewertung des Langzeitverhaltens betrachtet werden kann. Die in dieser Liegezeit festgestellten Ergebnisse zeigen allerdings schon die Richtung der Veränderung der Asphalteeigenschaften für die Zukunft auf.

5 Ausblick

Die bisher vorliegenden Ergebnisse sind positiv zu bewerten. Der Einsatz von Kalkhydrat im Asphalt führt nachweislich zu einer Verbesserung der Asphalteigenschaften im Bezug auf ihr Langzeitverhalten. Die Lebensdauer der Asphaltbefestigungen auf den Beobachtungsstrecken wird sich durch Kalkhydrat verlängern. Das tatsächliche Ausmaß ist durch spätere Prüfungen an den Beobachtungsstrecken zu erbringen.

Für die Analysenverfahren zum Nachweis des Kalkhydrates im Asphalt sollten im Rahmen von Ringversuchen die Präzisionsdaten ermittelt werden. Von weiterem Interesse wäre es die vermuteten Abhängigkeiten zwischen Gesteinskörnung und Kalkhydrat im Hinblick auf Veränderungen der asphalttechnologischen Eigenschaften aufzuklären.

Literaturverzeichnis

1. Cramer, P.; Herz, G.; Radenberger, M.: Kalkhydrat - Eine Alternative zur Modifizierung des Bindemittels, in Asphalt Heft 6/2001.
2. Eulitz, H.-J.; Schellenberg, K.; Ritter, H.-J.; Schmidt, S.-O.: Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat, Hrsg. Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V., 1998.
3. Peterson, J. C.; Plancher, H.; Harnsberger, P. M.: Lime Treatment of Asphalt to Reduce Age Hardening Improve Flowproberties; Asphalt Paving Technology 1987 – Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Reno, Nevada, Feb. 23-25, 1987, Volume 56.
4. RG Min-StB 93: Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 1993.
5. Technische Prüfvorschrift - Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 1994.
6. TP A-StB: Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 1999.
7. TL Min-StB 94: Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 1994.
8. Vanelstraete, A.: Effects of Hydrated Lime on Rheological Properties of Mastics before and after Aging. Vortrag gehalten anlässlich einer Veranstaltung der Lhoist-Gruppe in Düsseldorf, 1998.

9. ZTV Asphalt-StB 94 / Ausgabe 98: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 1998.
10. Franke, B.: Bestimmung von Calciumoxid und Calciumhydroxid neben wasserfreiem und wasserhaltigem Calciumsilikat; Z. anorg. allgem. Chem. **247** (1941), 180.
11. Shebl, F.A.; Ludwig, U.: Untersuchungen zur Bestimmung des Calciumhydroxids nach der Franke-Methode; Zement-Kalk-Gips, **10** (1978), 510.
12. Schiffner, H.-M.; Mehling, C.; Peschen, N.: Untersuchungen zu Wechselwirkungen der Nebenbestandteile in Kalkprodukten im System Entcarbonisierung, Hrsg. Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V., 1997.
13. Ringquist, G.: Concentration of pure calcium hydroxide solutions as a function of electrolytic conductivity in the temperature range from 0 to 100°C tables; Swedish Cement and Concrete Research Institute of Technology, Stockholm, 1952.

mitverwendete DIN und Arbeitsanleitungen

Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt mit Hilfe des Marshall-Verfahrens, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 1987

Arbeitsanleitung für den Einsatz radiometrischer Geräte für zerstörungsfreie Dichtemessungen auf Asphaltsschichten, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 2001

Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt Teil 2: Prüfung des Bindemittelablaufs, Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 1999

DIN 1995, Teil 1: Anforderungen an die Bindemittel – Straßenbaubitumen, Beuth Verlag 1989

DIN 1996, Teil 6: Prüfung von Asphalt – Vorbereitung von Proben, Beuth Verlag 1990

DIN 1996, Teil 6: Prüfung von Asphalt – Herstellung von Probekörpern aus Mischgut, Beuth Verlag 1984

DIN 1996, Teil 6: Prüfung von Asphalt – Bestimmung des Bindemittelgehaltes und Rückgewinnung des Bindemittels, Beuth Verlag 1988

DIN 1996, Teil 7: Prüfung von Asphalt – Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad, Beuth Verlag 1992

DIN 1996, Teil 9: Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete - Quellversuch, Beuth Verlag 1981

DIN 1996, Teil 11: Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete – Bestimmung von Marshall-Stabilität und Marshall-Fließwert, Beuth Verlag 1981

DIN 1996, Teil 14: Prüfung von Asphalt – Bestimmung der Korngrößenverteilung von aus Asphalt extrahierten Mineralstoffen, Beuth Verlag 1990

DIN 1996, Teil 20: Prüfung von Asphalt – Herstellung von Asphaltmischgut im Laboratorium, Beuth Verlag 1992

DIN 52011: Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel, Beuth Verlag 1986

DIN 52098: Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebanalyse, Deutscher Norm Ausschuß, Berlin, Köln, 1990

DIN EN 459, Teil 2: Baukalk - Prüfverfahren, Beuth Verlag, Berlin, 2002

DIN EN 12485: Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Calciumcarbonat, Weißkalk und halbgebrannter Dolomit, Analytische Verfahren; Beuth Verlag, Berlin, 2001

Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V., Prüfverfahrensammlung, Köln, 1996

Inhaltsverzeichnis Anhang

INHALTSVERZEICHNIS ANHANG	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS ANHANG.....	II
TABELLENVERZEICHNIS ANHANG	III
A. BESONDERE PRÜFVERFAHREN	IV
A.1. PRÜFVERFAHREN ZUR ANSPRACHE DER ZUGFESTIGKEIT	IV
A.2. ANSPRACHE DER ZUGVISKOSITÄT.....	V
A.2.1. Prüfeinrichtung	V
A.2.2. Probekörper	VII
A.2.3. Auswerteverfahren (Verfahren I: lineare Auswertung).....	VIII
A.3. ANSPRACHE DER KÄLTFLEXIBILITÄT	IX
A.4. NACHWEISVERFAHREN FÜR KALKHYDRAT	XII
A.4.5 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE	XVI
B. ZUSAMMENSETZUNG UND VOLUMETRISCHE KENNWERTE DER MISCHUNGEN	XVIII
B.1. KORNGRÖßENVERTEILUNG DER MINERALSTOFFE	XVIII
B.1.1. Splittmastixasphalt 0/8 S.....	XVIII
B.1.2. Asphaltbeton 0/11	XX
B.2. ERMITTELTE BINDEMITELGEGHALTE.....	XXII
B.3. ERMITTELTE ROH- UND RAUMDICHTEN	XXIII
B.4. CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE.....	XXVIII
C. IST-AUFNAHME DER BEOBACHTUNGSSTRECKEN.....	XXX
C.1. B 27 - DUBLINGEN.....	XXX
C.2. L 181 - BRÄUNLINGEN.....	XXXVIII

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A 1: Probekörper vor und nach der Wasserlagerung	V
Abbildung A 2: Probekörper in die Adapter eingeklebt	VI
Abbildung A 3: Schematische Darstellung der Probekörperauflagerung und der Messanordnung	VII
Abbildung A 4: Dehnungskurve Mischgut SMA 0/8 S	IX
Abbildung A 5: Probekörper nach dem Abkühlversuch	XI
Abbildung A 6: Ansicht Feld 1, B 27	XXX
Abbildung A 7: Detail Feld 1, B 27	XXX
Abbildung A 8: Aufgenommenes Querprofil Feld 1, B 27	XXXI
Abbildung A 9: Ansicht Feld 2, B 27	XXXII
Abbildung A 10: Detail Feld 2, B 27	XXXII
Abbildung A 11: Aufgenommenes Querprofil Feld 2, B 27	XXXIII
Abbildung A 12: Ansicht Feld 3, B 27	XXXIV
Abbildung A 13: Detail Feld 3, B 27	XXXIV
Abbildung A 14: Aufgenommenes Querprofil Feld 3, B 27	XXXV
Abbildung A 15: Ansicht Feld 4, B 27	XXXVI
Abbildung A 16: Detail Feld 4, B 27	XXXVI
Abbildung A 17: Aufgenommenes Querprofil Feld 4, B 27	XXXVII
Abbildung A 18: Ansicht Feld A, L 181	XXXVIII
Abbildung A 19: Spurrinnen Feld A, L 181	XXXVIII
Abbildung A 20: Aufgenommenes Querprofil Feld A, L 181	XXXIX
Abbildung A 21: Ansicht Feld B, L 181	XL
Abbildung A 22: Querprofil Feld B, L 181	XL
Abbildung A 23: Aufgenommenes Querprofil Feld B, L 181	XLI
Abbildung A 24: Ansicht Feld C, L 181	XLII
Abbildung A 25: Querprofil Feld C, L 181	XLII
Abbildung A 26: Aufgenommenes Querprofil Feld C, L 181	XLIII
Abbildung A 27: Ansicht Feld D, L 181	XLIV
Abbildung A 28: Querprofil Feld D, L 181	XLIV
Abbildung A 29: Aufgenommenes Querprofil Feld D, L 181	XLV

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A 1: Konformitätsuntersuchung Zugviskosität	VIII
Tabelle A 2: Eignungsprüfung SMA 0/8 S ohne Kalkhydrat	XVIII
Tabelle A 3: Eignungsprüfung SMA 0/8 S mit Kalkhydrat.....	XVIII
Tabelle A 4: Kontrollprüfung SMA 0/8 S.....	XIX
Tabelle A 5: 1. Nachuntersuchung 2002 SMA 0/8 S.....	XIX
Tabelle A 6: Eignungsprüfung AB 0/11 ohne Kalkhydrat.....	XX
Tabelle A 7: Eignungsprüfung AB 0/11 mit Kalkhydrat	XX
Tabelle A 8: Kontrollprüfung AB 0/11	XXI
Tabelle A 9: 1. Nachuntersuchung 2002 AB 0/11	XXI
Tabelle A 10: Ermittelte Bindemittelgehalte während der Untersuchungen	XXII
Tabelle A 11: Ermittelte Rohdichten während der Untersuchungen	XXIII
Tabelle A 12: Ermittelte Raumdichten Eignungsprüfungen	XXIV
Tabelle A 13: Ermittelte Raumdichten Kontrollprüfung SMA 0/8 S	XXIV
Tabelle A 14: Ermittelte Raumdichten 1. Nachuntersuchung SMA 0/8 S	XXV
Tabelle A 15: Ermittelte Raumdichten Kontrollprüfung AB 0/11.....	XXVI
Tabelle A 16: Ermittelte Raumdichten 1. Nachuntersuchung AB 0/11	XXVII
Tabelle A 17: Charakteristische Daten der Füller.....	XXVIII
Tabelle A 18: Chemische Vollanalysen der Ausgangsstoffe.....	XXIX

A. Besondere Prüfverfahren

A.1. Prüfverfahren zur Ansprache der Zugfestigkeit

Festigkeitsverluste infolge nachlassender Adhäsions- und/oder Kohäsionskräfte werden durch Anwendung des einaxialen Zugversuchs bei nicht allzu tiefen Temperaturen (Zugbruch im bituminösen Mörtel) experimentell nachweisbar.

Im einaxialen Zugversuch werden prismatische Asphaltprobekörper bei isothermem Temperaturverlauf und konstanter Ziehgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet. Aus der während des Versuchs erfassten Spannungs-Dehnungs-Beziehung wird die Kenngröße Zugfestigkeit β_z ermittelt. Die Zugfestigkeit ist die auf die geometrische Querschnittsfläche bezogene maximal mobilisierte Zugkraft.

Im Zugversuch werden prismatische Probekörper mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm verwendet, die aus walzverdichteten Platten herausgesägt werden.

Im Versuch wurden folgende Prüfbedingungen eingehalten:

Prüftemperatur	:	+ 5,0 °C (\pm 0,3 K) Luftbad
Ziehgeschwindigkeit	:	5,0 mm/min
Probekörperabmessungen	:	40 x 40 x 160 mm
Lagerung der Proben:		8 h Wasserbad bei 25 °C mit Vakuum bei 25 mbar, anschließend 6 Tage im Wasserbad bei 25 °C und einen Tag Trockenlagerung bis zum Zugversuch

Nachfolgende Abbildung A1 zeigt einen Vergleich der Probekörper vor der Prüfung. Der nicht in Wasser gelagerte Probekörper im Hintergrund zeigt deutlich einen oberflächlichen Glanz. Beim Überfahren mit der Fingerspitze sind am unter Wasser gelagerten Probekörper, selbst nach der Trocknung, deutliche Unebenheiten zu spüren, die auf ein Diffundieren des Wassers durch die Bindemittelfilme schließen lassen.



Abbildung A 1: Probekörper vor und nach der Wasserlagerung

A.2. Ansprache der Zugviskosität

Im Zugretardationsversuch wird ein prismatischer Probekörper des zu untersuchenden Asphalts bei konstanter Versuchstemperatur durch eine sprungartig aufgebrachte und dann konstant zu haltende einaxiale Zugspannung statisch belastet. Während des Versuchs wird die sich dabei am Probekörper einstellende axiale Dehnung in Abhängigkeit von der Zeit erfasst. Aus der Zeit-Dehnungskurve wird unter Anwendung von Auswerteverfahren (linearer Ansatz, Ansatz nach Burgers) die das Fließverhalten beschreibende Materialkenngröße Zugviskosität bestimmt.

A.2.1. Prüfeinrichtung

Die zur Durchführung von Zugretardationsversuchen verwendete Versuchseinrichtung besteht im wesentlichen aus einer prozessgesteuerten Prüfmaschine, die bei der Prüfung von Bindemitteln liegend angeordnet und mit einer reibungsminimierten Einrichtung zur Probekörperauflagerung ausgestattet ist (siehe Abbildung A3). Die Messung von Längenänderungen am Probekörper erfolgt über selektierte Wegaufnehmer mit einer Auflösung von 10^{-5} mm. Über

eine Schrittmotor-Getriebeeinheit lassen sich Längenänderungen mit einer Auflösung von 10^{-5} mm gezielt an der Probe einstellen. Durch die Wahl einer kleinen Kraftmessdose der Klasse 0.1 können Zug-/Druck-Kräfte mit einer Auflösung von 0,01 N gemessen werden. Die Prüfmaschine befindet sich während der Versuche in einem Wärme-Kälteschrank, mit dem die im Retardationsversuch verwendeten Versuchstemperaturen im Bereich von ca. + 40 °C bis - 40 °C mit einer Regelgenauigkeit von $\pm 0,3$ K eingestellt werden können.

Nachstehend eine fotografische Abbildung der Probekörpervorbereitung und schematisch die Abbildung der Versuchsanordnung.

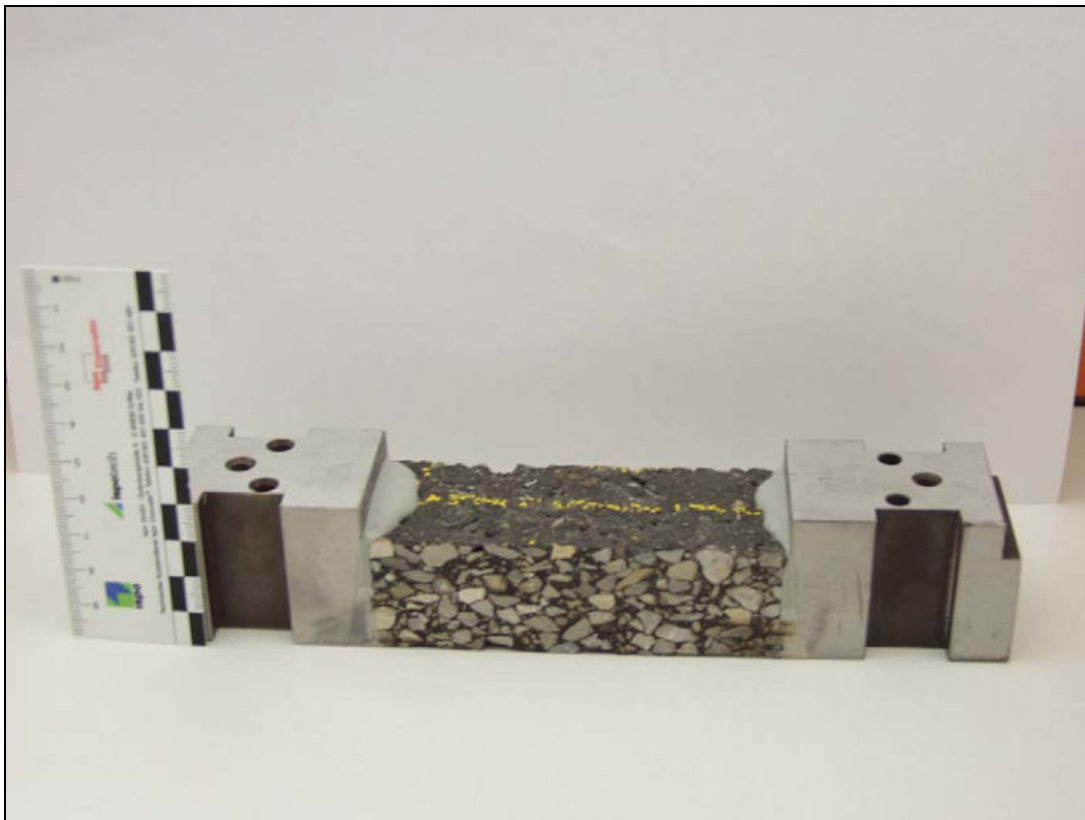


Abbildung A 2: Probekörper in die Adapter eingeklebt

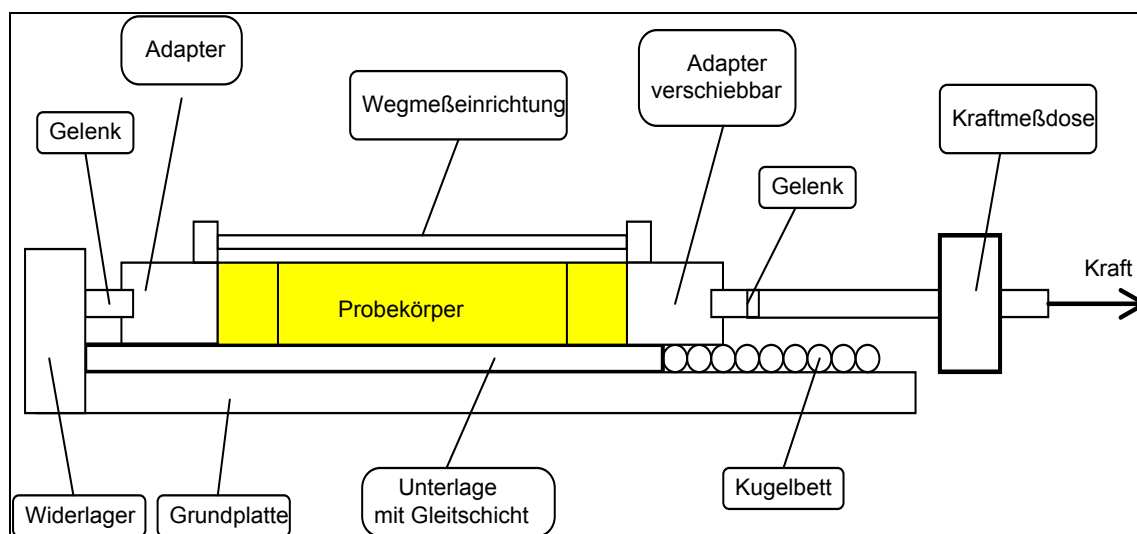


Abbildung A 3: Schematische Darstellung der Probekörperauflagerung und der Messanordnung

Die Prüfmaschine und der Wärme-Kälteschrank werden über einen der Aufgabe entsprechend angepassten Prozessrechner unter Verwendung eines Echtzeit-Multitasking-Betriebssystems und den jeweiligen Versuchsprogrammen zur simultanen Messdatenerfassung, Steuerung und Regelung (Software-PID-Regler) sowie zur Prozessvisualisierung und Versuchsauswertung betrieben.

A.2.2. Probekörper

Bei den im Retardationsversuch verwendeten Probekörpern handelt es sich um stabförmige Proben mit rechteckigem Prüfquerschnitt von ca. 1600 mm². Die Probekörper können während der Eignungsprüfung aus Mischgut hergestellt werden, indem eine Probenplatte der Abmessung 400 x 400 x 40 mm hergestellt wird. Hierdurch ist eine homogene Verdichtung erreichbar. Nach dem Auskühlen sind aus dieser Platte die Probekörper o.a. Maße zu sägen. Weiterhin ist es auch möglich aus Bohrkernen Probekörper zu entnehmen, wobei in Vorversuchen, die in anstehender Tabelle A1 zusammengefasst sind, ermittelt wurde, dass die Reduzierung des Prüfquerschnitts bei der Untersuchung der gesamten Asphaltmatrix keinen Einfluss auf das Ergebnis hatte.

		Abmaße in mm			ϑ in °C	σ in N/mm ²	t in min		v in Ns/mm ²
		H	B	L			Belastung	Entlastung	
ohne Zugabe von Kalkhydrat	Eignungsprüfung	40	40	100	30,0	0,025	60,0	10,0	1,55*10 ⁴
	Konformität	32	40	100					1,48*10 ⁴
mit Zugabe von Kalkhydrat	Eignungsprüfung	40	40	100	30,0	0,025	60,0	10,0	2,13*10 ⁴
	Konformität	32	40	100					2,22*10 ⁴
									2,17*10 ⁴

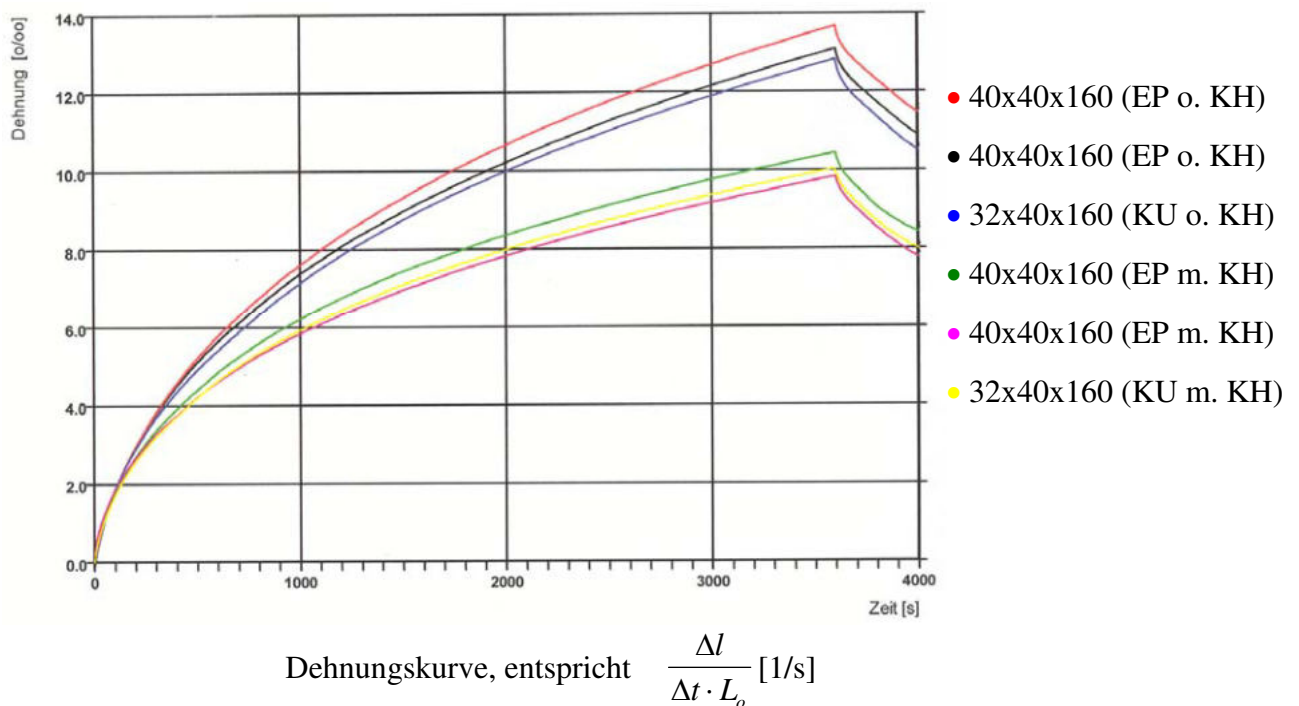
Tabelle A 1: Konformitätsuntersuchung Zugviskosität

A.2.3. Auswerteverfahren (Verfahren I: lineare Auswertung)

Unter der Voraussetzung einer konstanten Zugspannung und einer konstanten Versuchstemperatur sowie der Kenntnis des Verlaufs der Zeit-Dehnungskurve einer Asphaltprobe kann die Zugviskosität über die Steigung im quasi-linearen Abschnitt der Zeit-Dehnungskurve bestimmt werden mit:

$$\lambda_z = \frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}} = \frac{\sigma}{\frac{\Delta l}{\Delta t \cdot L_0}} \quad [\text{N}\cdot\text{s}/\text{mm}^2]$$

mit λ_z = Zugviskosität des Asphalts [N·s/mm²],
 σ = konstante einaxiale Zugspannung [N/mm²],
 $\dot{\varepsilon}$ = Steigung im quasi-linearen Bereich der Zeit-
 L_0 = wirksame Länge (Bezugslänge $L_0 = 60,0$ mm),



EP Eignungsprüfung

KU Konformitätsuntersuchung

KH Kalkhydrat (m. → mit / o. → ohne)

Abbildung A 4: Dehnungskurve Mischgut SMA 0/8 S

A.3. Ansprache der Kälteflexibilität

Die Ansprache des Kälteverhaltens der Asphalte erfolgte nach der "Technischen Püfvorschrift Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen, Ausgabe 1994 mit Hilfe des Abkühlversuchs [5].

In einer Asphaltbefestigung entstehen bei Abkühlung im Bereich tiefer Temperaturen aufgrund der Behinderung des thermischen Schrumpfes (Reibung auf der Unterlage) Zugspannungen, die bei Erreichen der momentan und lokal vorhandenen Zugfestigkeit zum Bruch führen.

Im praxisorientierten Abkühlversuch wird dieser Vorgang unter definierten Laborbedingungen experimentell untersucht. Hierzu wird der Asphaltprobekörper, beginnend bei der Starttemperatur von +20 °C, um 10 K/h abgekühlt. Während dieses Vorgangs wird die vor Versuchsbeginn gemessene Probekörperlänge konstant gehalten. Die durch diese beabsichtigte Behinderung des thermischen Schrumpfs im Probekörper auftretenden thermogenen Zugspannungen werden in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zeit gemessen und bei einem Bruch des Probekörpers werden die maximale thermisch induzierte Zugspannung und die Bruchtemperatur ermittelt.

Die prüftechnische Ansprache des Kälteverhaltens erfolgte mit Hilfe eines am Institut für Materialprüfung Dr. Schellenberg GbR entwickelten Kälteprüfstands. Diese Versuchseinrichtung besteht im wesentlichen aus einer prozessgesteuerten Prüfmaschine, die bei der Prüfung von Asphalt stehend angeordnet und zur Kraftübertragung mit zwei kardanischen Ösen zur momentenfreien Beanspruchung des Probekörpers ausgestattet ist. In diese Ösen werden die beiden Adapter eingehängt, die mittels eines Zweikomponentenklebers auf Epoxidharzbasis an den Probekörper geklebt wurden. Die Position der beiden Adapter wird während des Versuchs von zwei Wegaufnehmerpaaren, die an zwei temperaturindifferenten Messbasen befestigt sind, mit einer Auflösung von $5 \cdot 10^5$ mm erfasst. Mit der verwendeten Schrittmotor-Getriebeeinheit lassen sich Längenänderungen an der Probe mit einer Auflösung von $6 \cdot 10^6$ mm gezielt einstellen. Mit der Kraftmessdose der Klasse 0.1 können Zug-/Druckkräfte von ± 20 kN mit einer Auflösung von 0,1 N gemessen werden. Die Prüfmaschine befindet sich während der Versuche in einem Wärme-Kälteschrank, mit den Versuchstemperaturen im Bereich von ca. + 60 °C bis - 50 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3$ K eingestellt werden können.

Die Asphalte wurden im Laboratorium hergestellt und unter Walzverdichtung zu Platten (Abmessungen: 400 x 400 x 40 mm) geformt. Aus diesen Platten wurden die für die Abkühlversuche benötigten prismatischen Probekörper (Abmessungen: 40 x 40 x 160 mm) herausgesägt.

In Abbildung A 5 ist ein geprüfter Probekörper dargestellt, an dem klar zu sehen ist, dass der Bruch durch die thermisch induzierte Spannung senkrecht zur Prüfrichtung geht und dass die Bruchflächen teilweise im Mineralstoff vorhanden sind.



Abbildung A 5: Probekörper nach dem Abkühlversuch

A.4. Nachweisverfahren für Kalkhydrat

A.4.1 Zweck und Anwendungsbereich

Das Verfahren dient zur Bestimmung des Anteils

- an Calciumhydroxid in Kalkhydraten für den Einsatz im Asphaltstraßenbau,
- an Calciumhydroxid in Kalkhydrat/Gesteinsmehl - Mischfüllern für den Einsatz im Asphaltstraßenbau,
- an Calciumhydroxid in extrahierten Füllern aus Asphaltmischungen. Das Verfahren ist anwendbar im Rahmen von Eignungsprüfungen sowie bei den Prüfungen von eingebautem Asphalt.

Das Verfahren erfasst diejenigen Anteile an Calciumhydroxid, die unter den Bedingungen dieser spezifischen Methode die Reaktion eingehen. Die Auswertung der Ergebnisse, die mit der folgenden Methode erzielt werden, muss unter Beachtung dieser einschränkenden Definition vorgenommen werden.

A.4.2 Probenvorbereitung

Die zu untersuchende Probe darf möglichst wenig mit Luft in Berührung kommen, da sie durch Feuchte- und Kohlenstoffdioxidaufnahme verändert wird. Daher müssen die Proben in luftdichten Verpackungen transportiert und gelagert werden, ebenso müssen alle Handhabungen schnellstmöglich durchgeführt werden.

Extrahierte Füllerproben sind wegen möglicher Bildung von Agglomeraten beim Zentrifugieren aufzumahlen, während Kalkhydrat- und Mischfüllerproben ohne weitere Aufbereitungsschritte zur Analyse eingesetzt werden können.

A.4.3 Durchführung

A.4.3.1 Titrationsmethode

A.4.3.1.1 Kalkhydrat

In einem 300-ml-Erlenmeyerkolben werden 150 ml Wasser und 5 ml der Tensidlösung unter Rühren vermischt. Danach werden 10 ml Isobutanol zugegeben. Die Lösung wird solange gerührt bis keine Schlierenbildung mehr erkennbar ist. In diese Lösung wird $(1,0 \pm 0,05)$ g Kalkhydrat, auf 1 mg genau eingewogen, unter Schwenken gleichmäßig einsuspendiert. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird vor der Titration 5 min lang gerührt.

A.4.3.1.2 Kalkhydrat/Gesteinsmehl - Mischfüller

In einem 300-ml-Erlenmeyerkolben werden 150 ml Wasser und 5 ml der Tensidlösung unter Rühren vermischt. Danach werden 10 ml Isobutanol zugegeben. Die Lösung wird solange gerührt bis keine Schlierenbildung mehr erkennbar ist. In diese Lösung wird $(1,0 \pm 0,05)$ g Mischfüller, auf 1 mg genau eingewogen, unter Schwenken gleichmäßig einsuspendiert. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird vor der Titration 5 min lang gerührt.

A.4.3.1.3 Extrahierter Füller

In einem 300-ml-Erlenmeyerkolben werden 150 ml Wasser und 5 ml der Tensidlösung unter Rühren vermischt. Danach werden 10 ml Isobutanol zugegeben. Die Lösung wird solange gerührt bis keine Schlierenbildung mehr erkennbar ist. In diese Lösung wird $(1,0 \pm 0,05)$ g extrahierter Füller, auf 1 mg genau eingewogen, unter Schwenken gleichmäßig einsuspendiert. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird vor der Titration ca. 30 min lang gerührt. Sollte nach dieser Zeit noch keine vollständige Dispergierung der Probe erkennbar sein, ist die Rührzeit entsprechend zu verlängern.

A.4.3.1.4 Durchführung

Einige Tropfen der Phenolphthaleinlösung werden zugegeben, die zu titrierende Suspension färbt sich rosa.

Bei Kalkhydrat wird unter Rühren langsam Salzsäure aus einer 50-ml-Bürette zugetropft (Titriergeschwindigkeit 12 ml/min) bis sich die Lösung gerade bleibend entfärbt hat (pH 9,8).

Ohne weitere HCl-Zugabe wird nun 60 s gerührt und unmittelbar anschließend bis zur Entfärbung tropfenweise zu Ende titriert. Eine evtl. nach wenigen Sekunden wiederkehrende Rosa-färbung der Lösung bleibt unbeachtet.

Bei Mischfüllern und extrahierten Füllern wird unter Rühren langsam Salzsäure aus einer 25-ml-Bürette zugetropft (Titriergeschwindigkeit 12 ml/min) bis sich die Lösung gerade bleibend entfärbt hat (pH 9,8). Ohne weitere HCl-Zugabe wird nun 30 s gerührt und unmittelbar anschließend bis zur Entfärbung tropfenweise zu Ende titriert.

A.4.3.2 Zuckermethode

A.4.3.2.1 Kalkhydrat

In einem 300-ml-Erlenmeyerkolben werden 150 ml Wasser und 5 ml der Tensidlösung unter Rühren vermischt. Danach werden 10 ml Isobutanol zugegeben. Die Lösung wird solange gerührt bis keine Schlierenbildung mehr erkennbar ist. Nach Zugabe von 10 g Saccharose wird weiter gerührt bis eine klare Lösung vorliegt. In diese Lösung wird $(1,0 \pm 0,05)$ g Kalkhydrat, auf 1 mg genau eingewogen, unter Schwenken gleichmäßig einsuspendiert. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird 12 bis 15 min lang gerührt.

A.4.3.2.2 Kalkhydrat/Gesteinsmehl - Mischfüller

In einem 300-ml-Erlenmeyerkolben werden 150 ml Wasser und 5 ml der Tensidlösung unter Rühren vermischt. Danach werden 10 ml Isobutanol zugegeben. Die Lösung wird solange gerührt bis keine Schlierenbildung mehr erkennbar ist. Nach Zugabe von 5 g Saccharose wird weiter gerührt bis eine klare Lösung vorliegt. In diese Lösung wird $(1,0 \pm 0,05)$ g Mischfüller, auf 1 mg genau eingewogen, unter Schwenken gleichmäßig einsuspendiert. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird 12 bis 15 min lang gerührt.

A.4.3.2.3 Extrahierter Füller

In einem 300-ml-Erlenmeyerkolben werden 150 ml Wasser und 5 ml der Tensidlösung unter Rühren vermischt. Danach werden 10 ml Isobutanol zugegeben. Die Lösung wird solange gerührt bis keine Schlierenbildung mehr erkennbar ist. Nach Zugabe von 5 g Saccharose wird weiter gerührt bis eine klare Lösung vorliegt. In diese Lösung wird $(1,0 \pm 0,05)$ g extrahierter Füller, auf 1 mg genau eingewogen, unter Schwenken gleichmäßig einsuspendiert. Der Er-

lenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird ca. 30 min lang gerührt. Sollte nach dieser Zeit noch keine vollständige Dispergierung der Probe erkennbar sein, ist die Rührzeit entsprechend zu verlängern.

A.4.3.2.4 Filtration

Über eine Feinfilterpapier-Doppellage (Porengröße 2,5 µm, Weißbandfilter) wird durch einen Büchner-Trichter in eine 500-ml-Saugflasche abgesaugt. Mit sechs 25-ml-Portionen kaltem Wasser wird das Filter ausgewaschen.

A.4.3.2.5 Durchführung

Zum Filtrat werden einige Tropfen der Phenolphthaleinlösung zugegeben, die zu titrierende Lösung färbt sich rosa. Bei Kalkhydrat wird mit Salzsäure aus einer 50-ml-Bürette, bei Mischfüller bzw. extrahiertem Füller wird mit Salzsäure aus einer 25-ml-Bürette bis zur Entfärbung titriert.

A.4.3.3 Esterextraktionsmethode

A.4.3.3.1 Kalkhydrat

($0,1 \pm 0,005$) g Kalkhydrat wird auf 1 mg genau eingewogen und sofort in den Erlenmeyerkolben überführt, in dem 25 ml Ethylacetoacetat und 80 ml Isobutanol vorgelegt sind. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird 12 bis 15 min lang gerührt.

A.4.3.3.2 Kalkhydrat/Gesteinsmehl - Mischfüller

($1,0 \pm 0,05$) g Mischfüller wird auf 1 mg genau eingewogen und sofort in den Erlenmeyerkolben überführt, in dem 25 ml Ethylacetoacetat und 80 ml Isobutanol vorgelegt sind. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird 12 bis 15 min lang gerührt.

A.4.3.3.3 Extrahierter Füller

($1,0 \pm 0,05$) g extrahierter Füller wird auf 1 mg genau eingewogen und sofort in den Erlenmeyerkolben überführt, in dem 25 ml Ethylacetoacetat und 80 ml Isobutanol vorgelegt sind.

Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Stopfen verschlossen, die Suspension wird ca. 30 min lang gerührt. Sollte nach dieser Zeit noch keine vollständige Dispergierung der Probe erkennbar sein, ist die Rührzeit entsprechend zu verlängern.

A.4.3.3.4 Extraktion

Die Mischung ist unter Rühren zum Sieden zu bringen und am Rückfluss zu kochen. Der Rückflusskühler wird oben mit dem Trockenrohr, das Natriumhydroxid auf Träger enthält, verbunden und bietet so Schutz gegen Eindringen von Kohlenstoffdioxid aus der Luft.

Nach 15 min wird die Extraktion unterbrochen. Der Extrakt wird auf weniger als 50 °C abgekühlt und durch einen Büchnertrichter in eine 500-ml-Saugflasche abgesaugt. In die Nutsche sind ein Filterpapier für niedrige Filtrationsgeschwindigkeit (Korngröße des Rückstandes von 2,0 µm bis 2,2 µm) und ein Filterpapier für mittlere Filtrationsgeschwindigkeit (Korngröße des Rückstandes 6,5 µm) einzulegen (Filterpapier nicht von Hand zuschneiden). Vor der Filtration sind die Filter mit Ethylacetoacetat anzufeuchten. Ist das Filtrat getrübt, so ist durch dieselbe Filterkombination ein zweites Mal zu filtrieren. Kolben und Rückstand sind mit höchstens 50 ml 2-Propanol zu waschen. Hierbei ist es nicht notwendig, die letzten Reste des Rückstands zu überführen.

A.4.3.3.5 Titration

Das Filtrat ist mit drei bis vier Tropfen der Bromphenolblaulösung zu versetzen und mit Salzsäure (0,5 mol/l) aus einer 25-ml-Bürette bis zum Umschlag von Grün nach Gelb zu titrieren.

A.4.4 Blindwertbestimmung

Bei Mischfüllern und extrahierten Füllern ist eine Blindwertbestimmung des eingesetzten Gesteinsmehls erforderlich. Dabei ist das gleiche Verfahren und die gleiche Menge an Reagenzien zu verwenden. Das entsprechende Gesteinsmehl wird in der Menge eingesetzt, die der Zusammensetzung des Füllermaterials entspricht. Die Ergebnisse der analytischen Bestimmungen sind entsprechend zu korrigieren.

A.4.5 Auswertung und Ergebnisse

Der Gehalt an Calciumhydroxid, ausgedrückt als Massenanteil $\omega(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ in %, wird nach folgenden Gleichungen berechnet:

A.4.5.1 Kalkhydrat

$$\begin{aligned}\omega(\text{Ca}(\text{OH})_2) &= \frac{37,05 \times V_1 \times F_1 \times 100}{1000 \times m_1} = \\ &= \frac{3,705 \times V_1 \times F_1}{m_1} \quad (2)\end{aligned}$$

A.4.5.2 Mischfüller und extrahierter Füller

$$\begin{aligned}\omega(\text{Ca}(\text{OH})_2) &= \frac{18,525 \times V_2 \times F_2 \times 100}{1000 \times m_2} = \\ &= \frac{1,8525 \times V_2 \times F_2}{1000 \times m_2} \quad (3)\end{aligned}$$

Hierin bedeuten:

V_1 Volumen der verbrauchten Salzsäure (1 mol/l), in ml;

V_2 Volumen der verbrauchten Salzsäure (0,5 mol/l), in ml;

F_1, F_2 Faktoren der Salzsäure 1 mol/l bzw. 0,5 mol/l;

m_1 Masse der Kalkhydrat-Probe, in g;

m_2 Masse der Mischfüller-Probe bzw. der extrahierten Füller-Probe, in g.

B. Zusammensetzung und volumetrische Kennwerte der Mischungen

B.1. Korngrößenverteilung der Mineralstoffe

B.1.1. Splittmastixasphalt 0/8 S

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	ESP 5/8	ESP 2/5	EBS 0/2	EF 0/0.09	Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches	
					einzel	Summe
0,00 – 0,09			18,5	86,4	11,6	11,6
0,09 – 0,25		0,9	12,3	12,8	3,4	15,0
0,25 – 0,71		0,5	20,2	0,8	3,4	18,4
0,71 – 2,0	0,7	2,5	36,7		6,5	24,9
2,0 – 5,0	11,9	88,8	12,3		19,2	44,1
5,0 – 8,0	80,7	7,3			51,7	95,8
8,0 – 11,2	6,7				4,2	100,0
Unterkorn	12,6	3,9	-	-	Füller	11,6
Überkorn	6,7	7,3	12,3	13,6	Sand	13,3
					> 2.0 mm	75,1

Tabelle A 2: Eignungsprüfung SMA 0/8 S ohne Kalkhydrat

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	ESP 5/8	ESP 2/5	EBS 0/2	MF 0/0.09	EF 0/0.09	Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches	
						einzel	Summe
0,00 – 0,09			18,5	91,2	86,4	12,0	12,0
0,09 – 0,25		0,9	12,3	8,8	12,8	3,1	15,1
0,25 – 0,71		0,5	20,2		0,8	3,3	18,4
0,71 – 2,0	0,7	2,5	36,7			6,5	24,9
2,0 – 5,0	11,9	88,8	12,3			19,2	44,1
5,0 – 8,0	80,7	7,3				51,7	95,8
8,0 – 11,2	6,7					4,2	100,0
Unterkorn	12,6	3,9	-			Füller	12,0
Überkorn	6,7	7,3	12,3			Sand	12,9
						> 2.0 mm	75,1

Tabelle A 3: Eignungsprüfung SMA 0/8 S mit Kalkhydrat

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	Anteil in M.-%			
	Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4
0,00 – 0,09	17,1	12,9	13,7	14,5
0,09 – 0,25	5,0	3,0	4,2	2,8
0,25 – 0,71	3,2	3,5	3,5	2,9
0,71 – 2,0	4,6	6,1	4,9	5,6
2,0 – 5,0	43,3	17,7	18,3	13,7
5,0 – 8,0	55,9	53,9	52,1	55,1
8,0 – 11,2	0,7	2,9	3,3	5,5
Füller	17,1	12,9	13,7	14,5
Sand	12,8	12,6	12,6	11,3
> 2.0 mm	70,1	74,5	73,7	74,2

Tabelle A 4: Kontrollprüfung SMA 0/8 S

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	Anteil in M.-%			
	Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4
0,00 – 0,09	16,8	13,5	14,8	14,9
0,09 – 0,25	5,0	3,4	4,0	3,1
0,25 – 0,71	4,1	3,9	3,8	3,1
0,71 – 2,0	5,2	6,4	6,0	6,4
2,0 – 5,0	11,4	17,4	19,8	16,0
5,0 – 8,0	56,6	52,6	49,1	52,8
8,0 – 11,2	0,9	2,8	2,5	3,7
Füller	16,8	13,5	14,8	14,9
Sand	14,3	13,7	13,8	12,6
> 2.0 mm	68,9	72,8	71,4	72,5

Tabelle A 5: 1. Nachuntersuchung 2002 SMA 0/8 S

B.1.2. Asphaltbeton 0/11

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	ESP 8/11	ESP 5/8	ESP 5/8	EBS 0/2 I	EBS 0/2 II	NS 0/2	EF 0/0.09	Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches	
								einzel	Summe
0,00 – 0,09				8,8	19,9	4,3	93,1	9,5	9,5
0,09 – 0,25				11,3	13,1	18,0	6,7	6,6	16,1
0,25 – 0,71			1,3	22,7	19,4	31,0	0,2	11,3	27,4
0,71 – 2,0	0,6	0,7	6,0	45,7	37,6	38,3		20,6	48,0
2,0 – 5,0	0,6	13,4	88,8	11,5	10,0	8,4		15,9	63,9
5,0 – 8,0	13,3	79,8	3,9					15,5	79,4
8,0 – 11,2	83,7	6,1						20,2	99,6
11,2 – 16,0	1,8							0,4	100,0
Unterkorn	14,5	14,1	7,3	-	-	-	-	Füller	9,5
Überkorn	1,8	6,1	3,9	11,5	10,0	8,4	6,9	Sand	38,5
								> 2 mm	52,0

Tabelle A 6: Eignungsprüfung AB 0/11 ohne Kalkhydrat

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	ESP 8/11	ESP 5/8	ESP 5/8	EBS 0/2 I	EBS 0/2 II	NS 0/2	<u>EF</u> 0/0.09	MF 0/0.09	Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches	
									einzel	Summe
0,00 – 0,09				8,8	19,9	4,3	<u>93,1</u>	91,2	9,4	9,4
0,09 – 0,25				11,3	13,1	18,0	<u>6,7</u>	8,8	6,8	16,2
0,25 – 0,71			1,3	22,7	19,4	31,0	<u>0,2</u>		11,3	27,5
0,71 – 2,0	0,6	0,7	6,0	45,7	37,6	38,3			20,6	48,0
2,0 – 5,0	0,6	13,4	88,8	11,5	10,0	8,4			15,9	63,9
5,0 – 8,0	13,3	79,8	3,9						15,5	79,4
8,0 – 11,2	83,7	6,1							20,2	99,6
11,2 – 16,0	1,8								0,4	100,0
Unterkorn	14,5	14,1	7,3	-	-	-	-	-	Füller	9,4
Überkorn	1,8	6,1	3,9	11,5	10,0	8,4	6,9	8,8	Sand	38,6
									> 2 mm	52,0

Tabelle A 7: Eignungsprüfung AB 0/11 mit Kalkhydrat

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	Anteil in M.-%			
	Feld A	Feld B	Feld C	Feld D
0,00 – 0,09	8,2	8,9	9,4	9,1
0,09 – 0,25	7,9	8,1	6,8	7,2
0,25 – 0,71	11,6	11,8	11,1	11,7
0,71 – 2,0	18,8	16,9	15,6	16,7
2,0 – 5,0	17,9	16,1	14,1	14,4
5,0 – 8,0	17,8	15,4	17,2	17,8
8,0 – 11,2	17,0	21,7	23,9	22,7
11,2 – 16,0	0,8	1,1	2,0	0,4
Füller	8,2	8,9	9,4	9,1
Sand	38,3	36,8	33,5	35,6
> 2.0 mm	53,5	54,3	57,1	55,3

Tabelle A 8: Kontrollprüfung AB 0/11

Bezeichnung der Lieferkörnungen Prüfkorngrößen in mm	Anteil in M.-%			
	Feld A	Feld B	Feld C	Feld D
0,00 – 0,09	9,1	10,1	10,0	9,6
0,09 – 0,25	7,5	7,6	7,7	7,0
0,25 – 0,71	11,7	11,8	11,6	11,5
0,71 – 2,0	17,2	16,2	16,3	15,7
2,0 – 5,0	15,7	16,4	15,5	14,7
5,0 – 8,0	18,6	17,6	18,9	19,4
8,0 – 11,2	20,2	20,3	20,0	22,1
11,2 – 16,0	--	--	--	--
Füller	9,1	10,1	10,0	9,6
Sand	36,4	35,6	35,6	34,2
> 2.0 mm	54,5	54,3	54,4	56,2

Tabelle A 9: 1. Nachuntersuchung 2002 AB 0/11

B.2. Ermittelte Bindemittelgehalte

		Anteil in M.-%			
		Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4
SMA 0/8 S	Eignungsprüfung	7,3	7,0	7,0	7,3
	Kontrollprüfung	7,2	7,0	7,1	6,8
	1. Nachuntersuchung	6,8	7,0	7,2	6,9

		Anteil in M.-%			
		Feld A	Feld B	Feld C	Feld D
AB 0/11	Eignungsprüfung	6,2	5,9	5,9	6,2
	Kontrollprüfung	6,3	6,2	5,8	6,1
	1. Nachuntersuchung	6,2	5,8	5,8	6,0

Tabelle A 10: Ermittelte Bindemittelgehalte während der Untersuchungen

B.3. Ermittelte Roh- und Raumdichten

		ρ_R in g/cm ³			
		Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4
SMA 0/8 S	Eignungsprüfung	2,401	2,411	2,408	2,398
	Kontrollprüfung	2,421	2,429	2,406	2,408
	1. Nachuntersuchung	2,431	2,438	2,400	2,419

		ρ_R in g/cm ³			
		Feld A	Feld B	Feld C	Feld D
AB 0/11	Eignungsprüfung	2,455	2,466	2,547	2,446
	Kontrollprüfung	2,450	2,460	2,466	2,446
	1. Nachuntersuchung	2,448	2,469	2,461	2,465

Tabelle A 11: Ermittelte Rohdichten während der Untersuchungen

		Bindemittelgehalt in M.-%	ρ_A in g/cm ³
SMA 0/8 S	ohne Kalkhydrat	7,0	2,316
		7,3	2,319
		7,6	2,329
	mit Kalkhydrat	7,0	2,320
		7,3	2,324
		7,6	2,326
AB 0/11	ohne Kalkhydrat	6,1	2,384
		6,5	2,396
		6,9	2,395
	mit Kalkhydrat	6,1	2,380
		6,5	2,389
		6,9	2,381

Tabelle A 12: Ermittelte Raumdichten Eignungsprüfungen

		Kontrollprüfung	
		ρ_A in g/cm ³	
		Einzelwert	μ
Feld 1	MPK	2,373 2,370 2,367	2,370
	BK	2,370 2,373 2,377	2,373
Feld 2	MPK	2,342 2,345 2,343	2,343
	BK	2,352 2,354 2,358	2,355
Feld 3	MPK	2,315 2,319 2,316	2,317
	BK	2,317 2,327 2,324	2,323
Feld 4	MPK	2,306 2,301 2,299	2,302
	BK	2,285 2,286 2,286	2,286

Tabelle A 13: Ermittelte Raumdichten Kontrollprüfung SMA 0/8 S

		1. Nachuntersuchung 2002		
		ρ_A in g/cm ³		
		Einzelwert		μ
Feld 1	MPK	2,379	2,371 2,375	2,375
	außerhalb Radspur	2,383	2,379	2,381
	innerhalb Radspur	2,367 2,371 2,376 2,369 2,371	2,375 2,376 2,375 2,374 2,362	2,372
Feld 2	MPK	2,371	2,374 2,379	2,375
	außerhalb Radspur	2,379	2,376	2,377
	innerhalb Radspur	2,367 2,364 2,376 2,369 2,368	2,367 2,363 2,366 2,372 2,368	2,368
Feld 3	MPK	2,329	2,336 2,337	2,334
	außerhalb Radspur	2,337	2,340	2,338
	innerhalb Radspur	2,325 2,327 2,328 2,323 2,326	2,327 2,321 2,324 2,331 2,320	2,325
Feld 4	MPK	2,325	2,326 2,325	2,325
	außerhalb Radspur	2,311	2,309	2,310
	innerhalb Radspur	2,304 2,306 2,305 2,302 2,310	2,309 2,307 2,324 2,307 2,314	2,309

Tabelle A 14: Ermittelte Raumdichten 1. Nachuntersuchung SMA 0/8 S

		Kontrollprüfung	
		ρ_A in g/cm ³	
		Einzelwert	μ
Feld A	MPK	2,394 2,390 2,389	2,391
	BK	2,316 2,303 2,321	2,313
Feld B	MPK	2,408 2,400 2,406	2,405
	BK	2,372 2,376 2,368	2,372
Feld C	MPK	2,403 2,405 2,402	2,403
	BK	2,368 2,367 2,366	2,367
Feld D	MPK	2,400 2,399 2,403	2,401
	BK	2,361 2,357 2,364	2,361

Tabelle A 15: Ermittelte Raumdichten Kontrollprüfung AB 0/11

		1. Nachuntersuchung 2002				
		ρ_A in g/cm ³				
		Einzelwert		μ		
Feld A	MPK	2,405	2,397	2,396	2,399	
	außerhalb Radspur	2,356	2,363		2,359	
	innerhalb Radspur	2,335	2,344	2,343	2,347	2,346
		2,333	2,348	2,349	2,356	
		2,357	2,345			
Feld B	MPK	2,407	2,402	2,412	2,407	
	außerhalb Radspur	2,394	2,392		2,393	
	innerhalb Radspur	2,382	2,390	2,386	2,366	2,382
		2,384	2,384	2,385	2,382	
		2,379	2,386			
Feld C	MPK	2,405	2,409	2,409	2,408	
	außerhalb Radspur	2,375	2,377		2,376	
	innerhalb Radspur	2,376	2,374	2,371	2,376	2,374
		2,373	2,371	2,375	2,378	
		2,377	2,370			
Feld D	MPK	2,411	2,414	2,415	2,413	
	außerhalb Radspur	2,368	2,376		2,372	
	innerhalb Radspur	2,370	2,369	2,367	2,369	2,368
		2,364	2,386	2,363	2,361	
		2,366	2,360			

Tabelle A 16: Ermittelte Raumdichten 1. Nachuntersuchung AB 0/11

B.4. Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Geprüfte Eigenschaft	Prüfvorschrift	Prüfverfahren	Prüfergebnisse				
			Kalksteinmehl	Mischfüller	Moräne-Füller Dußlingen	Moräne-Füller Bräunlingen	Basalt-Füller
Äußere Beschaffenheit	TP Min-StB Teil 3.1.3	Homogenität	trocken, lock. Aggregate	trocken, lock. Aggregate	trocken, lock. Aggregate	trocken, lock. Aggregate	trock., lock. Aggregate
		Farbe	weiß-hellbeige	weiß-hellbeige	gelblich-mittelgrau	gelblich-mittelgrau	mittelgrau-oliv
		Geruch	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos
		Korngrößenverteilung	abgestuft	abgestuft	abgestuft, hoh. Feinant.	abgestuft	abgestuft, hoh. Feinant
		Zusammenballungen	vereinzelt in den Feianteilen	vereinzelt in den Feianteilen	keine vorhanden	keine vorhanden	keine vorhanden
		Verunreinigungen	keine vorhanden	keine vorhanden	vereinzelt vorhanden	keine vorhanden	keine vorhanden
		Kornoberfläche	glatt und rau	glatt und rau	glatt und rau	glatt und rau	überwiegend rau
		Kornf.:Gr.I	--		10 %	--	10 %
		Gr. II	40 %		50 %	20 %	70 %
		Gr. III	50 %		40 %	60 %	20 %
Gr. IV	10 %		--	20 %	--		
Korngrößenverteilung	DIN 52 098	Überkorn > 0,09 mm	19,1 M.-%	10,4 M.-%	11,4 M.-%	9,5 M.-%	7,8 M.-%
Rohdichte $\rho_{R,F}$	DIN 52102-FM	Trockenroh-dichte	2,721 g/cm ³	2,434 g/cm ³	2,731 g/cm ³	2,711 g/cm ³	2,966 g/cm ³
Raum-dichte ρ_{sed}		Sedimentation in Toluol	0,71 g/cm ³	0,33 g/cm ³	0,77 g/cm ³	0,67 g/cm ³	0,91 g/cm ³
Hohlraum-gehalt H_{sed}		in Toluol	73,7 Vol.-%	86,3 Vol.-%	71,8 Vol.-%	75,4 Vol.-%	69,3 Vol.-%
Hohlraum-gehalt RIGDEN H_t	TP Min-StB Teil 3.8.3	--	35,0 Vol.-%	50,7 Vol.-%	36,2 Vol.-%	36,1 Vol.-%	44,4 Vol.-%
Versteifende Eigenschaften	DIN 52096	Stabilisierungsindex	2,40 : 1	1,15 : 1	2,10 : 1	2,10 : 1	1,90 : 1
		Erweichungspunkterhöhung 65 / 35	13,8 °	40,5°	17,5 °	18,3 °	22,3 °
Organische Bestandteile	DIN 52099	--	keine vorh.	keine vorh.	keine vorh.	keine vorh.	keine vorh.
Wasserlösl. Anteile W_L	TP Min-StB Teil 4.6.3.1	Ausgabe 1999	0,08 M.-%	1,80 M.-%	0,49 M.-%	0,49 M.-%	0,21 M.-%
Wasserempfindlichkeit	TP Min-StB Teil 4.6.3.2	Stufe I	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden

Tabelle A 17: Charakteristische Daten der Füller

Gehalt	KSTM	WKH	Moräne B 27	Moräne L 181	Basalt
	Masse-%				
Glühverlust	42,7	25,1	25,7	21,8	1,6
davon CO ₂	42,4	0,4	23,3	20,5	0,2
SO ₃	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1
SiO ₂	2,0	0,3	31,1	38,1	48,0
Fe ₂ O ₃	0,3	0,1	2,2	2,3	12,3
Al ₂ O ₃	0,6	0,1	4,8	4,8	12,3
MgO	0,3	0,3	3,5	1,9	9,7
CaO	53,7	73,7	29,0	27,5	10,0
Mn ₂ O ₃	0,01	0,01	0,1	0,1	0,2
Na ₂ O	<0,01	<0,01	0,6	0,8	2,4
K ₂ O	0,1	0,02	1,2	0,9	1,3
SrO	<0,01	<0,01	0,04	0,04	0,07
BaO	<0,01	<0,01	0,02	0,02	0,06
Summe	99,7	99,8	98,5	98,3	98,0
Feuchte	0,1	1,1	0,1	0,2	0,2
KSTM = Kalksteinmehl; WKH = Weißkalkhydrat					

Tabelle A 18: Chemische Vollanalysen der Ausgangsstoffe

C. IST-Aufnahme der Beobachtungsstrecken

C.1. B 27 - Dußlingen

Feld 1

Informationen zur Messstelle

Stationierung	0+896
Regelquerschnitt	RQ 12
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Dußlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Gerade
Entwässerungseinrichtung	links
Längsneigung in %	4,0
Querneigung in %	0,4



Abbildung A 6: Ansicht Feld 1, B 27



Abbildung A 7: Detail Feld 1, B 27

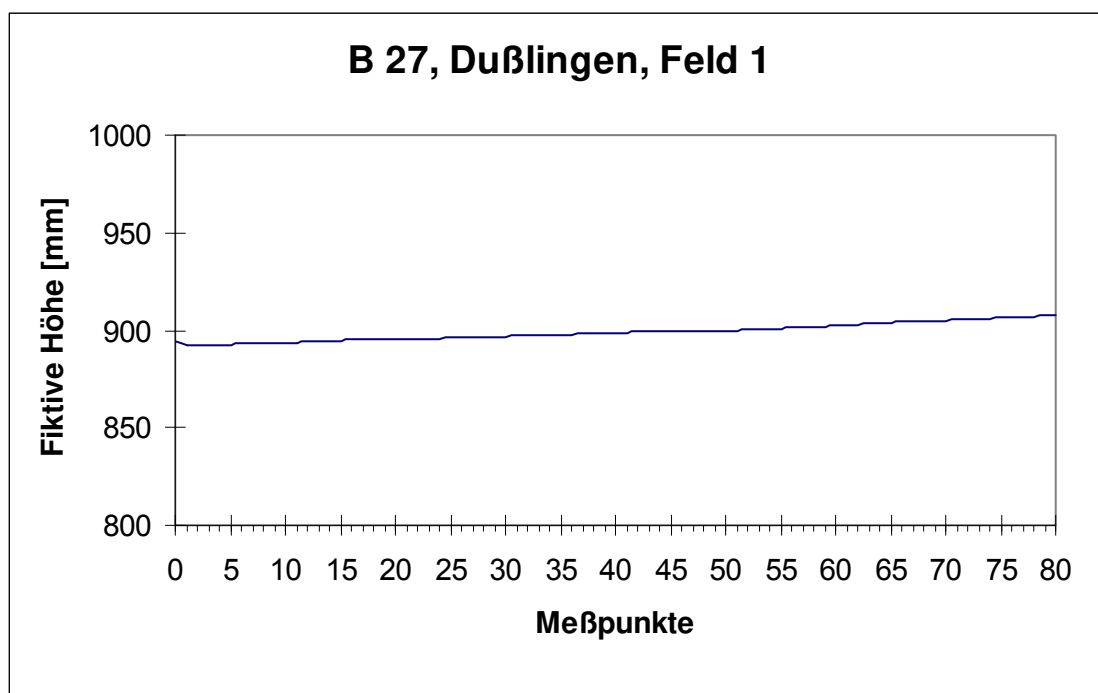


Abbildung A 8: Aufgenommenes Querprofil Feld 1, B 27

Die Oberfläche der Deckschicht aus Feld 1 weist keine messbaren Spurrinnen bzw. Verdrückungen auf.

Feld 2

Informationen zur Messstelle

Stationierung	0+962
Regelquerschnitt	RQ 12
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Dußlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Gerade
Entwässerungseinrichtung	links
Längsneigung in %	4,0
Querneigung in %	0,6



Abbildung A 9: Ansicht Feld 2, B 27



Abbildung A 10: Detail Feld 2, B 27

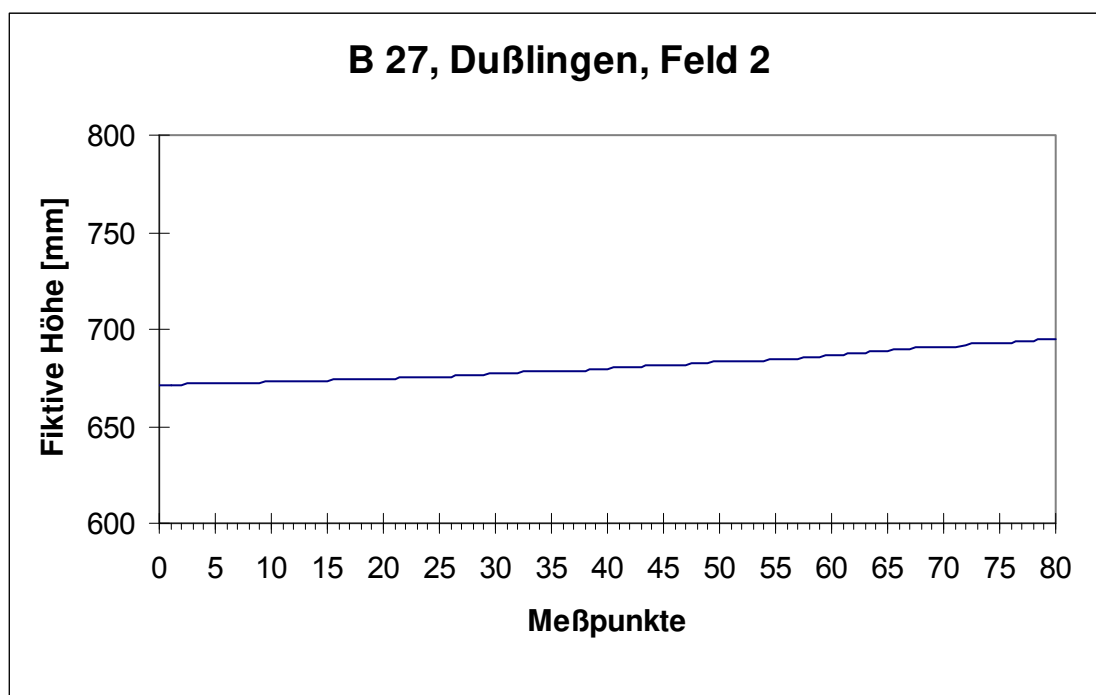


Abbildung A 11: Aufgenommenes Querprofil Feld 2, B 27

Die Oberfläche der Deckschicht aus Feld 2 weist keine messbaren Spurrinnen bzw. Verdrückungen auf.

Feld 3

Informationen zur Messstelle

Stationierung	1+079
Regelquerschnitt	RQ 12
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Dußlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Gerade
Entwässerungseinrichtung	rechts
Längsneigung in %	4,0
Querneigung in %	0,5



Abbildung A 12: Ansicht Feld 3, B 27



Abbildung A 13: Detail Feld 3, B 27

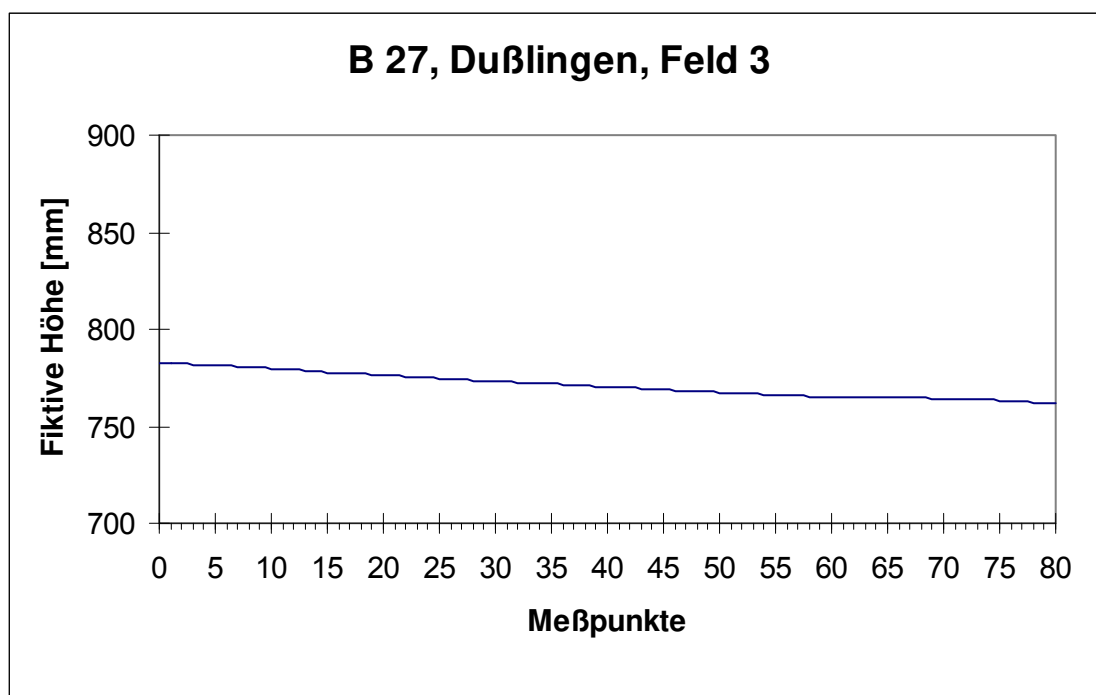


Abbildung A 14: Aufgenommenes Querprofil Feld 3, B 27

Die Oberfläche der Deckschicht aus Feld 3 weist keine messbaren Spurrinnen bzw. Verdrückungen auf.

Feld 4

Informationen zur Messstelle

Stationierung	1+175
Regelquerschnitt	RQ 12
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Dußlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Gerade
Entwässerungseinrichtung	rechts
Längsneigung in %	4,5
Querneigung in %	0,2



Abbildung A 15: Ansicht Feld 4, B 27



Abbildung A 16: Detail Feld 4, B 27

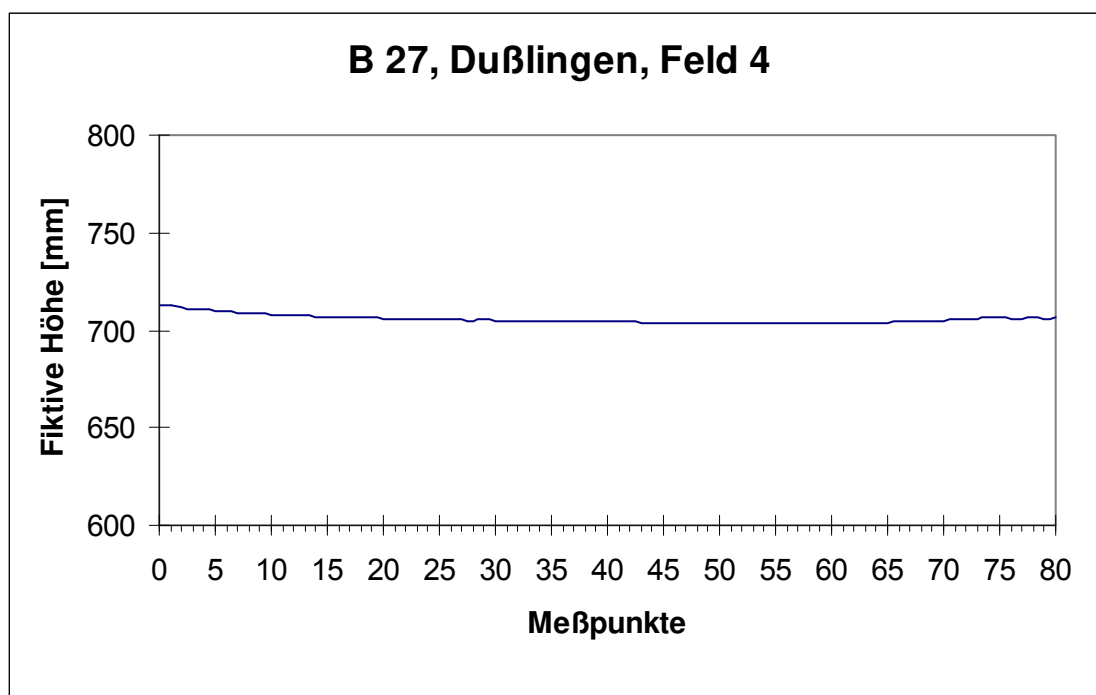


Abbildung A 17: Aufgenommenes Querprofil Feld 4, B 27

Die Oberfläche der Deckschicht aus Feld 4 weist keine messbaren Spurrinnen bzw. Verdrückungen auf.

C.2. L 181 - Bräunlingen

Feld A

Informationen zur Messstelle

Stationierung	0+196
Regelquerschnitt	RQ 10
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Bräunlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Linkskurve
Entwässerungseinrichtung	links
Längsneigung in %	0,5
Querneigung in %	4,5



Abbildung A 18: Ansicht Feld A, L 181



Abbildung A 19: Spurrinnen Feld A, L 181

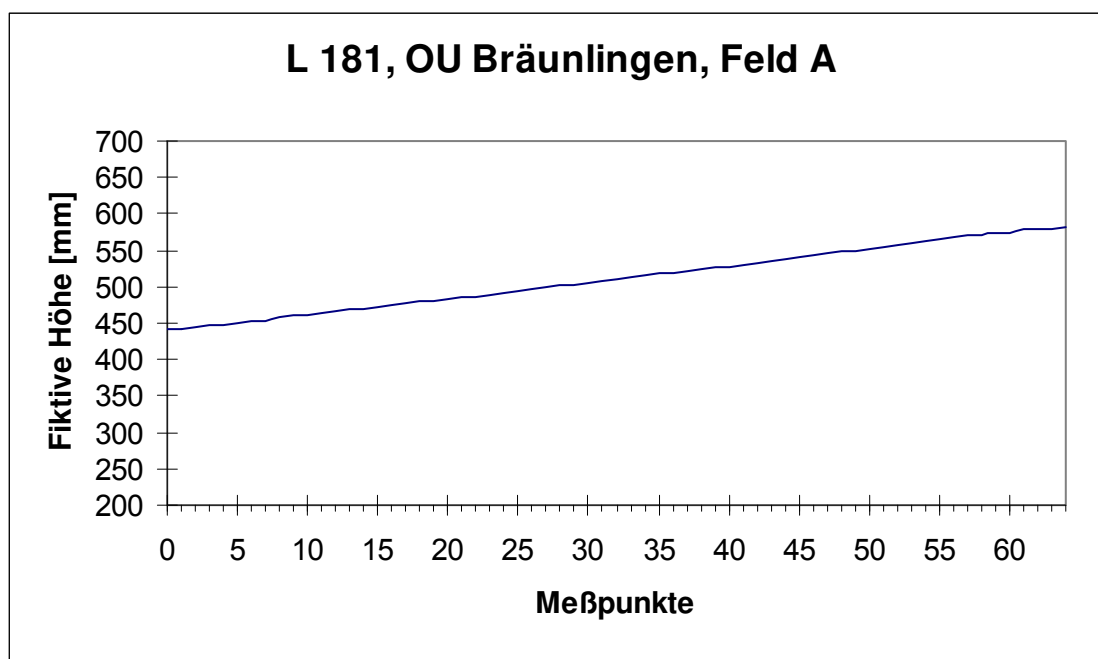


Abbildung A 20: Aufgenommenes Querprofil Feld A, L 181

Der Oberflächenzustand der Deckschicht aus Feld A weist keine erkennbaren Veränderungen auf. Lediglich in der Radrollspur ist eine Spurrinntentiefe von 2-3 mm vorhanden.

Feld B

Informationen zur Messstelle

Stationierung	0+312
Regelquerschnitt	RQ 10
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Bräunlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Linkskurve
Entwässerungseinrichtung	links
Längsneigung in %	1,0
Querneigung in %	5,0



Abbildung A 21: Ansicht Feld B, L 181



Abbildung A 22: Querprofil Feld B, L 181

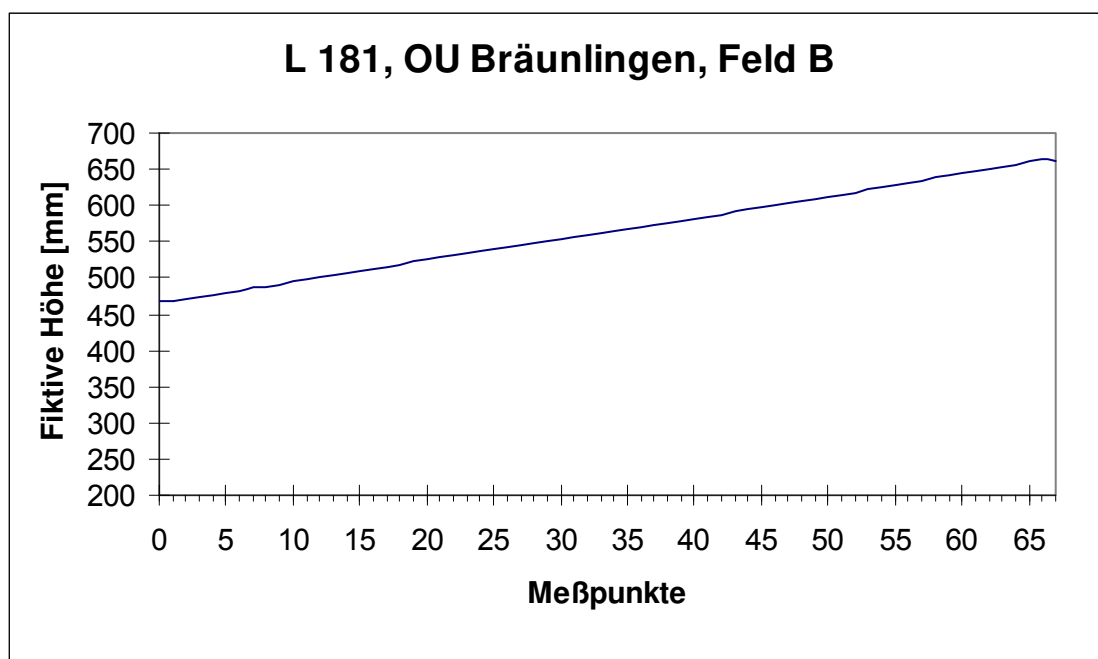


Abbildung A 23: Aufgenommenes Querprofil Feld B, L 181

Der Oberflächenzustand der Deckschicht aus Feld B weist keine erkennbaren Veränderungen auf. Lediglich in der Radrollspur ist eine Spurrinntentiefe von 2-3 mm vorhanden.

Feld C

Informationen zur Messstelle

Stationierung	0+458
Regelquerschnitt	RQ 10
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Bräunlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Gerade
Entwässerungseinrichtung	links
Längsneigung in %	0,5
Querneigung in %	2,5



Abbildung A 24: Ansicht Feld C, L 181



Abbildung A 25: Querprofil Feld C, L 181

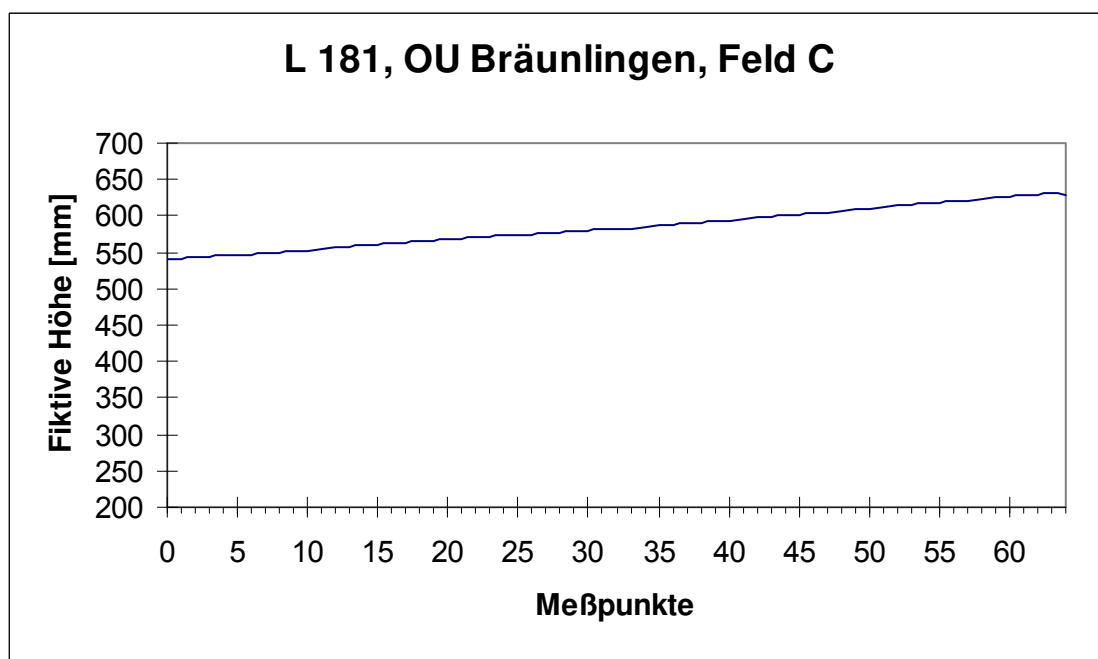


Abbildung A 26: Aufgenommenes Querprofil Feld C, L 181

Der Oberflächenzustand der Deckschicht aus Feld C weist keine erkennbaren Veränderungen auf. Lediglich in der Radrollspur ist eine Spurrinntentiefe von 2-3 mm vorhanden.

Feld D

Informationen zur Messstelle

Stationierung	0+617
Regelquerschnitt	RQ 10
Verbale Lagebeschreibung	freie Strecke
Richtung	Bräunlingen
zulässige Höchstgeschwindigkeit in km/h	100
Lage der Entnahmestelle	sonnig
Streckenverlauf	Gerade
Entwässerungseinrichtung	links
Längsneigung in %	nicht messbar
Querneigung in %	2,5



Abbildung A 27: Ansicht Feld D, L 181



Abbildung A 28: Querprofil Feld D, L 181

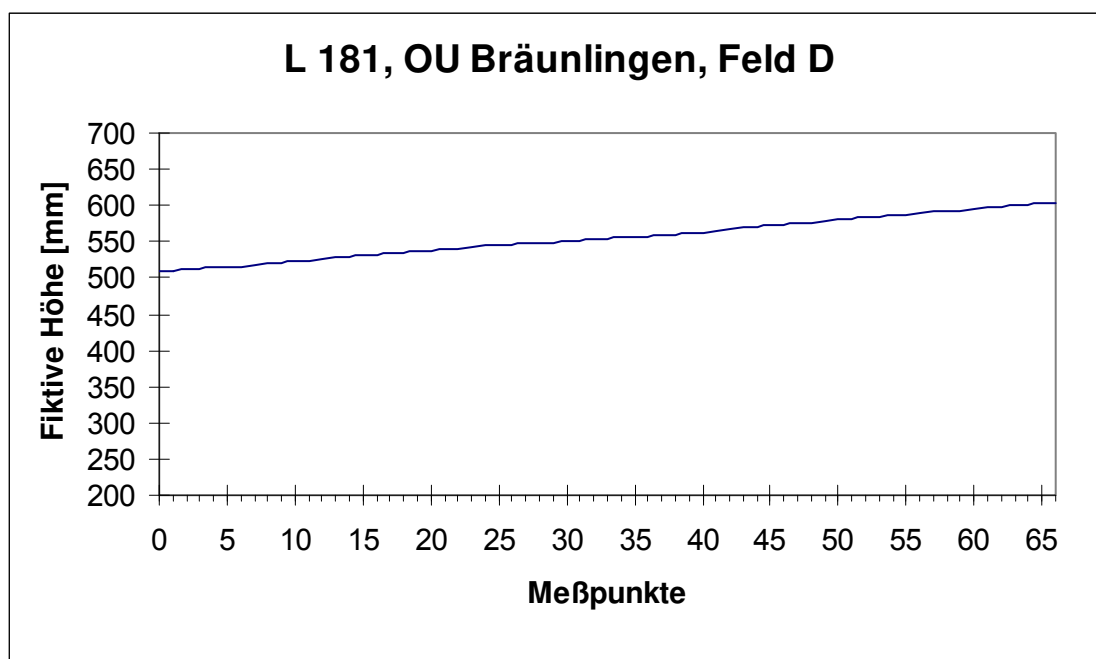


Abbildung A 29: Aufgenommenes Querprofil Feld D, L 181

Der Oberflächenzustand der Deckschicht aus Feld D weist keine erkennbaren Veränderungen auf. Lediglich in der Radrollspur ist eine Spurrinntiefe von 2-3 mm vorhanden.