

Wasserempfindlichkeit von Filler in bituminösem Mischgut

(1. Teil)

Susceptibilité à l'eau des fillers pour enrobé hydrocarboné

**Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassen
Forschungsauftrag 2/91**

**Ch. Angst, Dr. sc. techn., IMP Bautest AG, Gunzgen
R. Gubler, Dr. sc. nat., EMPA, Dübendorf**

INHALTSVERZEICHNIS

1. ZUSAMMENFASSUNG	3
2. PROBLEMSTELLUNG	5
2.1 Ausgangslage	5
2.2 Zielsetzung	7
3. AUSWAHL DER UNTERSUCHTEN MATERIALIEN	8
3.1 Filler	8
3.2 Zusätze	10
3.3 Bitumen	10
4. HERSTELLUNG VON PRÜFKÖRPERN	11
4.1 Überlegungen zum Design der Prüfkörper	11
4.1.1 Aufbau der Prüfkörper	11
4.1.2 Schadensmechanismen	11
4.1.3 Prinzip der Prüfung auf Wasserempfindlichkeit	12
4.2 Ist-Zustand	12
4.3 Forderungen an Eigenschaften der Prüfkörper	13
4.4 Versuche	16
4.4.1 Rezeptur	16
4.4.2 Herstellung der Mischung	16
4.4.3 Einfluss der Anzahl Verdichtungsschläge	17
4.4.4 Prüfung auf Homogenität	18
4.4.5 Ergebnisse der Homogenitätsprüfung	23
4.4.6 Beurteilung der Prüfkörper aufgrund der Homogenität	34
4.4.7 Folgerung	35

4.5 Standardverfahren zur Prüfkörperherstellung	36
4.5.1 Verwendete Baustoffe	36
4.5.2 Rezept zur Herstellung der Prüfkörper	36
4.5.3 Herstellung Prüfkörper	38
4.5.4 Durchführung der Wasserlagerung	39
4.5.5 Berechnung der Volumenzunahme	39
4.5.6 QS-Massnahmen	40
5. EVALUATION DER PRÜFVERFAHREN	41
5.1 Rollabrieb	41
5.1.1 Grundsätzliches	41
5.1.2 Versuchsbeschreibung	42
5.1.3 Ergebnisse	43
5.2. Monoaxiale Zugversuche	48
5.2.1 Grundsätzliches	48
5.2.2 Durchgeführte Versuche	49
5.2.3 Ergebnisse	50
5.3 Druckversuche	54
5.3.1 Grundsätzliches	54
5.3.2 Durchgeführte Versuche	54
5.4 Spaltzugversuche	65
5.4.1 Grundsätzliches	65
5.4.2 Durchgeführte Versuche	66
5.5 Volumenzunahme	70
5.5.1 Grundsätzliches	70
5.5.2 Durchgeführte Versuche	70
5.5.3 Vergleich mit dem normierten Prüfverfahren	77
6. FOLGERUNGEN	79
6.1 Art und Rezeptur der Prüfkörper	79
6.2 Methoden	80
6.3 Ergebnisse, Verfahren	81
7. AUSBLICK	82
8. LITERATUR	83

1. Zusammenfassung

Die umfangreichen Voruntersuchungen zeigten, dass sowohl bei der Herstellung der Fillerprüfkörper wie auch der Sandasphaltprüfkörper das Herstellungsverfahren einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der sich ergebenden Prüfkörper hat. Das gilt einerseits für die globalen Eigenschaften wie den Hohlraumgehalt, andererseits aber auch für die Homogenität.

Bei Fillerprüfkörpern erwies es sich als schwierig, den gewünschten Zielwert für den Hohlraumgehalt zu erreichen. Insbesondere ergaben sich bei gleicher Prüfvorschrift Unterschiede zwischen den beiden beteiligten Labors. Das bestätigte eine der Erfahrungen, die zu diesem FA geführt haben:

- Die Prüfmethode nach Norm ist zu wenig gut definiert, um reproduzierbare Resultate zu erhalten, da nur schon die Eigenschaften der Prüfkörper, die nach Norm in verschiedenen Labors hergestellt werden, stark differieren können.

Zudem ergaben sich bei der Herstellung von Fillerprüfkörpern deutliche Unterschiede der Verdichtung in Längsrichtung der Prüfkörper. Auch konnten bindemittelreiche Bereiche (Inhomogenitäten), im Schnitt erkennbar als dunkle Flecke von 1 bis 2 mm Durchmesser, festgestellt werden.

Für die Herstellung der Sandasphaltprüfkörper ist ebenfalls eine genau Beschreibung des Verfahrens notwendig, der Hohlraumgehalt als Zielwert konnte damit aber verlässlich erreicht werden. Unterschiede in der Verdichtung in Längsrichtung sind vorhanden, aber etwas geringer als bei Fillerprüfkörpern. Der Hohlraumgehalt ist insgesamt grösser, die Zugänglichkeit des Wassers zu allen Teilen des Prüfkörpers deshalb gesichert. Das im Rahmen des FA entwickelte Prüfverfahren kann als Grundlage für die Normierung verwendet werden.

In einer umfassenden, methodischen Untersuchung wurden mechanische Prüfungen wie Rollabrieb, Zug- und Druckversuche und Spaltzugversuche im Vergleich zum Quellverhalten untersucht. Dabei ergab sich bei den mechanischen Versuchen entweder keine genügende Differenzierung (auch nicht wenn das bekanntermassen sich ungünstig auswirkende Kalziumoxid zugesetzt wurde) oder es zeigten sich grosse Streuungen und zu grosse Unterschiede zwischen den beiden Labors. Insgesamt ergab sich beim Quellverhalten das eindeutig beste Bild.

Der Vergleich des neuen und alten Verfahrens in einem Labor zeigte eine ausreichend gute Korrelation. Es ist deshalb möglich die neue Methode zu normieren. Die Ergebnisse können anhand der Korrelation zur bisherigen Prüfung umgerechnet werden und mit den geltenden Anforderungen der SN 670 760 verglichen werden. Da es nach geltender Norm häufig zu unterschiedlicher Beurteilungen durch verschiedene Labors kam, wäre eine Zwischenlösung bis zum Vorliegen neuer Anforderungswerte bereits eine Verbesserung der heutigen Situation.

Die neue, vorgestellte Methode verbessert das bestehende Verfahren in wesentlichen Teilen. Die Einschränkung der Anwendbarkeit der Volumenzunahme nach Wasserlagerung zur Beurteilung von Sonder- und Spezialfillern gilt nach wie vor.

Résumé

Les importants essais préliminaires montrèrent, autant lors de la confection des éprouvettes de filler que des éprouvettes de mortier bitumineux, que le procédé de confection a une influence essentielle sur les propriétés propres de ces éprouvettes. Cela est valable d'une part pour les propriétés générales, comme la teneur en vides, et d'autre part également pour l'homogénéité.

Il a été montré, que la valeur souhaitée de la teneur en vides des éprouvettes de filler est difficile à atteindre. Bien que les instructions d'essai furent identiques pour les deux laboratoires participant, il s'en suivit des différences. Cela confirme l'une des expériences qui a conduit à ce mandat de recherche :

Dans la norme, la méthode d'essai n'est pas définie de façon suffisante pour obtenir des résultats reproductibles, car les caractéristiques des éprouvettes, qui selon la norme sont confectionnées dans des laboratoires différents, peuvent eux-mêmes déjà fortement varier.

De plus, lors de la confection des éprouvettes de filler, des différences distinctes de compactage ont été remarquées, dans le sens longitudinale des éprouvettes. Il a aussi été constaté des endroits à forte concentration de liant bitumineux, reconnaissables dans les couches par une tâche sombre de 1 à 2 mm.

Pour les éprouvettes de mortier bitumineux, une description exacte de leur mode de confection est également nécessaire. La teneur en vide, en tant que valeur souhaitée, peut ainsi être atteinte avec certitude. Des différences de compactage dans le sens longitudinale de l'éprouvette existent, mais de façon moindre en comparaison avec les éprouvettes de filler. La teneur en vides est dans l'ensemble plus élevée et l'accessibilité de l'eau à toutes les parties de l'éprouvette en est pour cette raison assurée. Le procédé d'essai élaboré dans le cadre de ce mandat de recherche peut être ainsi utilisé pour la normalisation.

Par le biais d'une recherche vaste et méthodique, les essais mécaniques, tels que les essais d'abrasion, les essais de traction et de compression ainsi que les essais de compression diamétrale, furent comparés aux augmentations de volume. Il découle des essais mécaniques, soit aucune variation significative (même si l'on y ajoute de l'oxyde de calcium, à l'effet défavorable notable) ou soit des dispersions trop importantes ou de trop grandes différences entre les deux laboratoires. Dans l'ensemble, la meilleure idée peut se faire suite aux augmentations de volume.

La comparaison entre le nouveau et l'ancien procédé dans un laboratoire, montra une corrélation satisfaisante. Les résultats obtenus, convertis à l'aide de la corrélation avec l'ancien procédé, peuvent être comparés aux exigences de la norme SN 670 760 "Filler pour enrobés bitumineux". Une alternative serait de compléter la norme SN 670 760 avec un supplément comprenant de nouvelles exigences. La norme actuelle conduit fréquemment à des interprétations divergentes de la part des différents laboratoires. C'est pour cette raison qu'une solution provisoire représente déjà une amélioration de la situation actuelle.

2. Problemstellung

2.1 Ausgangslage

Nach Abschluss umfangreicher und grundlegender Forschungsarbeiten an Filler in den Forschungsaufträgen FA 10/68 [1] und FA 6/71 [2], wurde die Norm SN 670 845 "Filler für bituminöses Mischgut, Volumenänderung von Prüfkörpern nach Wasserlagerung" im Jahre 1977 veröffentlicht. Die weiteren Forschungsarbeiten [3,4,5,6] wurden an Filler-Bitumengemischen mit dem Ziel durchgeführt, die mechanischen und rheologischen Eigenschaften zu prüfen. Das Problem der Wasserempfindlichkeit von Filler wurde nicht weiter untersucht.

In Deutschland haben vor allem Schulze und Schellenberg grundlegende Untersuchungen zu diesem Thema geführt [8, 9, 17, 18]. Trotz der Einführung der TP Min StB [7] gelten in einzelnen Bundesländern abweichende Vorschriften und Prüfverfahren (z.B. in Bayern) [8].

Das in den technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Strassenbau TL Min StB 94 [7] verwendete Prüfverfahren zur Beurteilung der Quellfähigkeit des Fillers befriedigt, nach unserer Auffassung, aus folgenden Gründen nicht:

- Die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse ist unbefriedigend:
Als Anforderung an die Quellfähigkeit eines Fillers wird in der TL Min StB 94 Pkt. 4.17 eine maximale Volumenzunahme nach Wasserlagerung von 1,3 Vol.-% postuliert. In der TP Min StB (technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Strassenbau) Pkt. 4.6.4.2 wird die Präzision des Prüfverfahrens (verschiedene Beobachter, verschiedene Geräte) mit 50% des Messwertes angegeben. Beim Grenzwert von 1,3 Vol.-% bedeutet dies, dass die Ergebnisse zweier unterschiedlicher Labors bis zu 0,65 Vol.-% voneinander abweichen dürfen.
- Die Prüfverfahren der Stufen II und III befriedigen ebenfalls nicht:
Zur Beurteilung der Wasserempfindlichkeit des Fillers wird die Quellung sowie der Abfall der Marshallstabilität nach Wasserlagerung von Marshallprüfkörpern herangezogen. Dabei werden die Marshallprüfkörper nach einer Standardrezeptur AB 8 aufbereitet. Es werden Standard-Mineralstoffe für die Stufe II verwendet, bei der Stufe III werden die zur Verwendung vorgesehenen Mineralstoffe zur Herstellung der Labormischung verwendet. Die Nachteile dieses Verfahrens sind unserer Ansicht:
 - Die Hohlraumgehalte der Marshallprüfkörper (4 bis 6 Vol.-%) sind zu tief. Um die Wasserempfindlichkeit von Fillern zu beurteilen, müsste unseres Erachtens der Prüfkörper derart gestaltet werden, dass ein möglichst hoher Wasserzutritt garantiert werden kann. Zudem führen herstellungsbedingte Schwankungen zu Unterschieden im Hohlraumgehalt. Asphalte mit Hohlraumgehalte kleiner 3 Vol.-% gelten im Asphalt-Wasserbau als dicht. Die Hohlraumgehalte der Prüfkörper sind zu nahe an diesem Wert; es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass herstellungsbedingte Schwankungen den Wasserzutritt und damit das Prüfergebnis empfindlich beeinflussen.

- Die Prüfung an einem AB 8 erschwert das Prüfverfahren unnötigerweise. Der Mehraufwand für die Herstellung eines AB 8 bringt keine Vorteile, denn die spezifische Oberfläche der Sand- und Splittkomponente kann vernachlässigt werden. In der Annahme kugelliger Kornformen wurde die spezifische Oberfläche des Fillers in der AB 8-Mischung gemäss TP Min StB (Teil 4.6.4.2.) berechnet. Die spezifische Oberfläche des Fillers beträgt 90% der gesamten Mineralstoffmischung im AB 8.

In Frankreich haben sich die Forschungsarbeiten zum Filler vor allem auf die versteifende Wirkung und den Reinheitsgrad (Tongehalt) konzentriert. Zur Zeit besteht keine Norm; das LCPC hat in einer Richtlinie sogenannte "valeurs conseillées" festgehalten. Darin sind keine Anforderungen an die Wasserempfindlichkeit enthalten.

Diverse Kontakte mit Schweizer-Delegierten in CEN-Arbeitsgruppen haben ergeben, dass zur Zeit keine Euro-Norm betreffend der Wasserempfindlichkeit von Filler für bituminöse Beläge in Arbeit ist.

Die bestehende Norm SN 670 845 "Volumenänderung von Prüfkörpern nach Wasserlagerung" [10] befriedigt in mehrerer Hinsicht nicht mehr:

- Die Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse ist ausgesprochen schlecht. Das in der Norm beschriebene Verfahren zur Herstellung der Prüfkörper ist zu wenig genau, so dass grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Labors entstehen. Es sind auch präzisere Anforderungen an die Lagerungsbedingungen zu definieren. Die Unterschiede in den Resultaten sind oft so gross, dass die Eignung des Fillers, und somit dessen Zulassung für gewisse Baustellen, je nach Prüfstelle anders beurteilt wird. Dass solche Situationen Unternehmer, Bauleitungen und Bauherrschaften stark verunsichern, liegt auf der Hand.
- Seit der Ausarbeitung der Norm SN 670 845 "Volumenzunahme" wurde auch die Belagsnorm SN 640 431 "Asphaltbetonbeläge; Konzeption, Anlieferungen, Ausführung" zwei Mal revidiert. Während in der alten Norm für S-Beläge ausschliesslich industriell hergestellter Fremdfiller zu verwenden war, lassen die neuen Normen auch Eigenfiller (=Rückgewinnungsfiller) zu, sofern dieser die Anforderungen der Filler-norm erfüllt. Der Filler-norm und deren Prüfverfahren kommt somit eine grössere Bedeutung zu.
- Die neueren Forschungsarbeiten (z.B. [5]) haben aufgezeigt, dass die Korngrössenverteilungen sowohl der Fremdfiller wie auch der Eigenfiller sich wesentlich verändert haben. Bei den Fremdfillern ist eine Zunahme der Mahlfinheit festzustellen. Die Rückgewinnungsfiller wurden durch Verwendung neuer Entstaubungsanlagen (zum Teil als Folge der Luftreinhalteverordnung LRV) in ihrer Zusammensetzung verändert. Die Korngrössenverteilung der Filler übt auf die Bestimmung der Volumenzunahme einen entscheidenden Einfluss aus, da gemäss geltender Prüfvorschrift zur Herstellung der Filler-Bitumengemische jeweils ein konstanter Bindemittelgehalt von 10% festgelegt ist. Bei feineren Filler entsteht durch die grössere spezifische Oberfläche ein dünnerer Bindemittelfilm als bei gröberen Filler; die Beurteilung der Quellfähigkeit des Materials wird verfälscht.

- Die in der Norm festgelegte Lagerungsdauer von 28 Tagen führt in der Praxis oft dazu, dass die Untersuchungsergebnisse zu spät erhältlich sind. Seit der Zulassung der Eigenfiller für Deckbeläge sind die Aufbereitungsanlagen sinnvollerweise daran interessiert, möglichst wenig Fremdfiller zu verwenden. Meldet das Kontroll-Labor nach 5 Wochen dass der Filler nicht in Ordnung ist, so sind zwischenzeitlich nicht nur einige tausend Tonnen Belag aufbereitet und eingebaut worden, sondern es vergehen nochmals ca. 5 bis 6 Wochen bis der Unternehmer weiss, ob die getroffenen Massnahmen richtig waren. Durch die angestrebte Verkürzung der Lagerungsdauer soll das Prüfverfahren näher an die täglichen Probleme gebracht werden.
- Aus betriebswirtschaftlichen aber auch ökologischen Gründen ist es sinnvoll, dass die Aufbereitungsanlagen -soweit möglich- lokal anfallendes Material einsetzen. Die Zulassung und Eignungsprüfung der Eigenfiller wird heute aufgrund einer Norm entschieden, die nicht über alle Zweifel erhaben ist.

2.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der Forschungsarbeit besteht darin, eine rasche und zuverlässige Methode zur Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Filler für bituminöses Mischgut zu entwickeln. Diese Methode soll das bisher in der Schweiz normierte Verfahren "Volumenzunahme nach Wasserlagerung" ersetzen.

Gegenüber dem bisherigen Norm-Verfahren sollen folgende Punkte verbessert werden:

- Herstellung der Prüfkörper.
- Verkürzung der Versuchsdauer.
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Im Rahmen von Anschlussarbeiten ist ein Ringversuch unter der Beteiligung mehrerer Labors vorgesehen. In einer späteren Arbeit sind Anforderungen (Grenzwerte) zu erarbeiten, wobei der Einfluss der Quellung des Fillers auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgutproben zu untersuchen sein wird.

3. Auswahl der untersuchten Materialien

Für die Durchführung der Forschungsarbeit wurden folgende Standard-Materialien ausgewählt.

3.1 Filler

Für die Methoden-Entwicklung wurde je ein als "wenig quellfähig" und ein als "stark quellfähig" bekannter Filler verwendet.

Die verwendeten Filler werden wie folgt beschrieben:

- A: Industriell hergestellter Kalksteinfiller ("wenig quellfähig")
- B: Filler B gemäss Forschungsarbeit [5] ("stark quellfähig")
- C: Industriell hergestellter Kieselkalkfiller aus Steinbruch
- D: Rückgewinnungsfiller einer Asphalt-Aufbereitungsanlage;
Aare-Kies-Material
- E: Rückgewinnungsfiller einer Asphalt-Aufbereitungsanlage;
Alpines Material
- F: Phonolithgesteinsmehl; Spezialfiller
- G: Phonolithgesteinsmehl

Die Eigenschaften der verwendeten Filler sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Filler

		A	B	C	D	E	F	G
Anteil <0.09	M.-%	84.4	93.0*	96.0	89.0	79.5	91.0	89.5
Korngrössenverteilung								
< 0.02 mm	M.-%	67.0	49.7*	65.4	50.6	n.b.	12.2	42.7
< 0.005 mm	M.-%	32.0	15.5*	27.6	22.0	n.b.	3.7	14.5
Verunreinigungen								
Anteil CaO	M.-%	0.2	n.b.	0.2	0.3	n.b.	0.3	0.1
Wasserl. Salze	M.-%	0.1	n.b.	0.6	0.7	n.b.	1.0	0.7
Hohlraumgehalt								
Rigden	Vol.-%	32.6	41.9*	34.4	34.8	35.6	48.2	39.0
Versteifende Wirkung								
65/35	°C	17	33.2*	22.3	16.6	n.b.	47.0	30.7
70/30	°C	31	55.0*	38.7	26.8	n.b.	111.8	48.4
Volumenzunahme nach								
Wasserlagerung	Vol.-%	0.5	5.4*	1.3	1.3	2.5	6.5	2.7
Dichte	g/cm ³	2.6641	n.b.	2.6215	2.6913	2.7224	2.609	2.598

n.b. = nicht bestimmt

*Daten aus FA 3/83 [5]

3.2 Zusätze

Zur Veränderung der Wasserempfindlichkeit der geprüften Filler wurde bei einigen Untersuchungen ungelöschter Kalk CaO beigemischt. Vorgängig wurde jeweils der Anteil CaO des entsprechenden Filters bestimmt, damit die Gesamtdosierung an CaO im Filler eingestellt werden konnte.

Auf den Einsatz von Tonmineralien wurde verzichtet, da in früheren Forschungsarbeiten [1,2] dieser Einfluss eingehend untersucht wurde.

3.3 Bitumen

Das Ziel des Forschungsauftrages bestand darin, die Wasserempfindlichkeit der Filler zu prüfen. Aus diesem Grund wurde die gesamte Arbeit mit dem gleichen Bitumen durchgeführt.

In der Norm SN 640 845 "Filler für bituminöses Mischgut; Volumenänderung von Prüfkörpern nach Wasserlagerung" [10] wird die Volumenzunahme nach Wasserlagerung an Prüfkörpern bestimmt, welche mit einem Bitumen B 180/220 hergestellt wurden. Im Gegensatz dazu wurde in der vorliegenden Arbeit mit einem B 80/100 gearbeitet. Ein erklärtes Ziel des Forschungsauftrages bestand darin, die Dauer der Wasserlagerung zu verkürzen. Erste Vorversuche haben gezeigt, dass dies mit einer Erhöhung der Temperatur von 20°C auf 40°C möglich wird. Der Erweichungspunkt RuK des B 180/200 liegt mit 37-44°C im Bereich der Lagerungstemperatur. Beim Bindemittel B 180/220 wurde ein Zerfall der Prüfkörper befürchtet, mit der Wahl des B 80/100 konnte dieses Problem gelöst werden.

Der Einfluss des Haftvermögens des Bitumens auf die Volumenzunahme nach Wasserlagerung wurde stichprobenweise überprüft. Sandasphalt-Prüfkörper mit identischer Rezeptur jedoch unterschiedlichem Bitumen wurden hergestellt. Das Bitumen B80/100 unterschied sich im Gehalt an Haftmittel.

Tabelle 2: Einfluss des Umhüllungsgrades des Bitumens auf die Volumenzunahme nach Wasserlagerung

Haftmittel im B80/100	Masse-%	0	0,2%
Umhüllungsgrad (SN 671 765)	%	68	94
Volumenzunahme Filler A	Vol.-%	0,23	0,16
Volumenzunahme Filler A + 3% CaO	Vol.-%	6,5	6,0

Die Unterschiede in der Volumenzunahme sind erstaunlich klein. Grundsätzlich wurden grössere Unterschiede erwartet.

Ohne weitere Untersuchungen zu diesem Thema wurde beschlossen, ein Bitumen B80/100 mit einem Umhüllungsgrad nach Wasserlagerung von >80% zu verwenden.

4. Herstellung von Prüfkörpern

4.1 Überlegungen zum Design der Prüfkörper

4.1.1 Aufbau der Prüfkörper

Mit dem zu prüfenden Filler wird ein verdichteter Prüfkörper definierter Zusammensetzung hergestellt, an dem dann die Einwirkung von Wasser erfasst werden kann. Ein solcher Prüfkörper enthält während seiner Lebensgeschichte die folgenden 4 Phasen:

- Mineralstoffe (Filler als die zu prüfende Komponente, wahlweise ein weiterer Sand als Trägerkomponente)
- Bitumen
- Luft
- Wasser

4.1.2 Schadensmechanismen

Bei der Herstellung ist Wasser abwesend, das Bindemittel kann die Mineralstoffe vollständig umhüllen und zugleich das Haufwerk verkleben. Wasserempfindlichkeit ist dann definiert als die Auswirkung von Wasser auf dieses Haufwerk. Zwei hauptsächliche Kategorien von Schadensmechanismen sind dabei in Betracht zu ziehen:

- Reaktion von Wasser mit Filler. Dazu gehören die chemische Reaktion von Wasser mit Substanzen der Mineralstoffe, Aufnahme von Kristallwasser, Aufnahme von Wasser an der Mineralstoffoberfläche, Lösen von im Wasser löslichen Anteilen der Mineralstoffe. Die als Folge dieser Reaktionen stattfindende Wasseraufnahme ist dabei generell mit einer Massenzunahme des Prüfkörpers und fast immer auch mit einer Volumenzunahme verbunden. Die Volumenzunahme des Mörtels hat, wenn sie ein kritisches Ausmass überschreitet, im Mischgut eine Sprengwirkung.
- Schwächung des Verbundes im Haufwerk durch Ablösen des Bindemittels von der Mineralstoffoberfläche. Dazu gehört die Wasseraufnahme an der Mineralstoffoberfläche, gefolgt von der Ablösung des Bindemittels und zuletzt der Zerstörung des Verbundes im Mörtel. Die chemische Reaktion von Wasser mit mineralischen Bestandteilen erzeugt in vielen Fällen weichere und mechanisch schwächere Bestandteile und damit ebenfalls eine mechanische Schwächung. Daneben können reaktive Filler zusammen mit Wasser aber auch eine Versteifung bewirken, wenn Fillerbestandteile wie Zement wirken.

Diesen beiden Kategorien von Mechanismen entsprechen zwei verschiedene Messgrössen als Indikatoren für die Einwirkung von Wasser auf den Prüfkörper:

- Volumenzunahme als Mass für Wasseraufnahme und Sprengwirkung
- Abnahme der mechanischen Festigkeit als direkter Indikator für die Schwächung des Belages

Die Prüfung auf Wasserempfindlichkeit erfasst somit eine globale Eigenschaft der Filler im Mischgut. Ein Teil dieser aufgezählten Reaktionen werden zusätzlich mit in anderen Normen beschriebenen Prüfverfahren erfasst (z.B. Anteil wasserlöslicher Substanzen).

4.1.3 Prinzip der Prüfung auf Wasserempfindlichkeit

Der Prüfvorgang sollte beschleunigt die Schadensentwicklung im Belag widerspiegeln. Der Ausgangszustand des zu prüfenden Materials sollte dem Zustand eines frisch eingebauten Belages entsprechen. Filler im Mörtel ist in normal konzipierten, frisch eingebauten Belägen vollständig umhüllt, es liegt ein Überschuss an Bindemittel vor.

Wasser kann in der Prüfung auf Wasserempfindlichkeit nur wirksam im Prüfkörper anwesend sein, wenn es Zutritt zur Grenzfläche Filler/Bitumen bekommt. Idealerweise ersetzt es dabei die Phase Luft weitgehend. Zudem muss es innerhalb nützlicher Zeit durch das Bindemittel bis an die nach der Prüfkörperherstellung umhüllten Fillerkörner diffundieren können. Davon ausgehend leiten sich Forderungen ab, die an die Prüfkörper zu stellen sind. Als Bestandteil der Forschungsarbeit wird im folgenden die Prüfkörperherstellung nach geltender Norm überprüft.

4.2 Ist-Zustand

Die gemäss Norm SN 670 845 [10] verwendeten Prüfkörper weisen folgende Nachteile auf:

- Der Hohlraumgehalt ist relativ tief und hängt zudem vom geprüften Filler ab. Der Zutritt des Wassers ins Innere des Prüfkörpers ist nicht bei jedem Filler in gleichem Masse gewährleistet.
- Die Bindemitteldosierung ist für alle Filler gleich, unabhängig von der spezifischen Oberfläche des Fillers. Dadurch ergeben sich unterschiedliche theoretische Bindemittelfilm-Dicken. Der Zugang des Wassers zum Filler hängt sehr stark von den Eigenschaften des Fillers ab. Stark versteifende Filler mit hohem Hohlraumgehalt nach Rigden und einer grossen Oberfläche werden in der Versuchsdurchführung benachteiligt.
- Die Reproduzierbarkeit des normierten Verfahrens zur Bestimmung der Volumenzunahme (Unterschied von einem Labor zum anderen) ist relativ schlecht. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Herstellung der Filler/Bitumen-Prüfkörper heikel ist. Der Einfluss der Arbeitsweise auf die Homogenität der Mischung und somit auf das Prüfergebnis ist zu gross.

Prüfkörper sollen mit einem einfachen, gut reproduzierbaren Verfahren hergestellt werden können, welches unabhängig vom geprüften Filler einen genügend grossen Hohlraumgehalt aufweisen. Der angestrebte Hohlraumgehalt soll zwischen 20 und 25 Vol.-% liegen.

Die Forschungsstellen erachteten es nach intensiver Diskussion des Ist-Zustandes und der praktischen Erfahrung als wesentlich, zum Vergleich zum Fillerprüfkörper nach Norm [10] den Sandasphaltprüfkörper in die Forschung einzubeziehen. Sandasphaltprüfkörper sollten mindestens den gleich hohen Hohlraumgehalt aufweisen wie die Fillerprüfkörper.

4.3 Forderungen an Eigenschaften der Prüfkörper

Prüfkörper für die Wasserlagerung haben eine Reihe von Eigenschaften aufzuweisen, die sich aus der Forderung an eine gut durchführbare und reproduzierbare Prüfung herleiten. Diese Eigenschaften werden im folgenden einzeln beschrieben und begründet.

Hohlraumgehalt von 20 bis 25 Vol.-%.

Nur ein ausreichend hoher Hohlraumgehalt erlaubt es dem Wasser ins Innere des Prüfkörpers einzudringen. Bei einem zu grossen Hohlraumgehalt und vor allem beim Vorliegen grosser Poren kann hingegen der quellende Mörtel in diese Poren hineinwachsen anstatt, wie es in der Praxis dann der Fall sein wird, eine Sprengwirkung auszuüben. Beide Extremfälle sind somit prüftechnisch unerwünscht.

Als Zielgrösse wurde deshalb ein Hohlraumgehalt von 20 bis 25 Vol.-% festgelegt. Damit stehen alle Teile des Prüfkörpers während der ganzen Dauer der Wasserlagerung in Kontakt mit Wasser. Ein festgelegter Hohlraumgehalt schliesst zudem Phänomene wie unterschiedliche Eindringgeschwindigkeit des Wassers aus, die bei verschiedenen gut verdichteten Prüfkörpern aus gleichem Material unterschiedliches Verhalten verursachen würden.

Homogenität der Prüfkörper

Was für die Prüfkörper einer Serie gilt, muss auch für die Teile des Prüfkörpers gelten. In inhomogenen Prüfkörpern wären nicht alle Teile des Prüfkörpers gleich leicht dem Wasser zugänglich, einzelne Partien wären besser geschützt, andere mehr dem Angriff während der Wasserlagerung ausgesetzt. In Bereichen mit sehr hohem Hohlraumgehalt könnte ebenfalls das erwähnte Quellen in die Hohlräume hinein stattfinden, ohne dass eine messbare Veränderung am Prüfkörper als Ganzes festzustellen wäre. Ausreichend homogene Prüfkörper sind deshalb eine wichtige Voraussetzung für eine befriedigende Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit.

Hohlraumgehalt unabhängig von der Fillerorte

Für verschiedene Fillerorten sollten gleiche Hohlraumgehalte im Prüfkörper erhalten werden. Nur so können Filler in Bezug auf ihre Wasserempfindlichkeit gleich bewertet werden.

Bindemittelbedarf des Fillers

Verschiedene Filler weisen einen sehr unterschiedlichen Bindemittelbedarf auf, der sich in der Regel durch einen unterschiedlichen Hohlraumgehalt nach Ridgen äussert. In der Prüfung Hohlraum nach Ridgen wird der Filler einer wohl definierten Schlagverdichtung unterzogen. Es wird angenommen, dass der so verdichtete Filler annähernd maximal verdichtet ist. Um Mastix zu bilden, muss das Bindemittel vorerst einmal die Hohlräume in diesem Haufwerk füllen. Ist das geschehen, so beginnt weiteres, zusätzliches Bindemittel das Haufwerk aufzuweiten, bis die Körner schliesslich im Bindemittel 'schwimmen'.

Unterfüllung resultiert in einem unzureichenden Verkleben des Haufwerkes und in teilweise mangelnder Umhüllung der Fillerkörner. Auch kann nicht überall Bindemittel zwischen die Kontaktstellen der Körner dringen. Es ist somit klar, dass – im Bereich der Unterfüllung – der Fillerprüfkörper durch Wasser in Funktion der Bindemittelkonzentration angreifbar ist. Im Bereich der Überfüllung hat das zusätzliche Bindemittel ebenfalls einen wesentlichen Anteil an der Schutzwirkung, indem das zusätzliche Bindemittel sich zwischen die Kontaktstellen der Fillerkörner schiebt und damit die porenförmigen Kanäle verschliesst, über die Wasser ins verklebte Korngerüst eindringen kann. Zudem wird der Bindemittelfilm dicker und damit verzögert sich die Diffusion des Wassers durch das Bindemittel und somit das Quellen.

Als Fazit zeigt sich, dass das Quellen im Prüfverfahren nach geltender Norm [10] sowohl eine Funktion der sogenannten effektiven Bindemittelkonzentration und wie auch der Eigenschaften der Filler ist. Gesucht ist aber das Quellen als eine Funktion der Eigenschaften des Fillers allein, denn um Filler miteinander vergleichen zu können, interessiert nur dieser zweite Aspekt. Daher entschieden sich die Forschungsstellen im Verlauf der Forschungsarbeit, Standardprüfkörper mit einer gegebenen effektiven Konzentration zu verwenden. Die effektive Fillerkonzentration ist dabei das Verhältnis des Füllervolumens in der Mischung (ohne Hohlräume) zum Füllervolumen im verdichteten Korngerüst. Aus dieser Definition ergeben sich die folgenden mathematischen Beziehungen:

$$C_{\text{eff}} = \frac{C_V}{(100 - \text{HR})} \quad (1)$$

mit C_V als volumetrische Fillerkonzentration und HR als Hohlraumgehalt nach Ridgen (beide in Vol.-%)

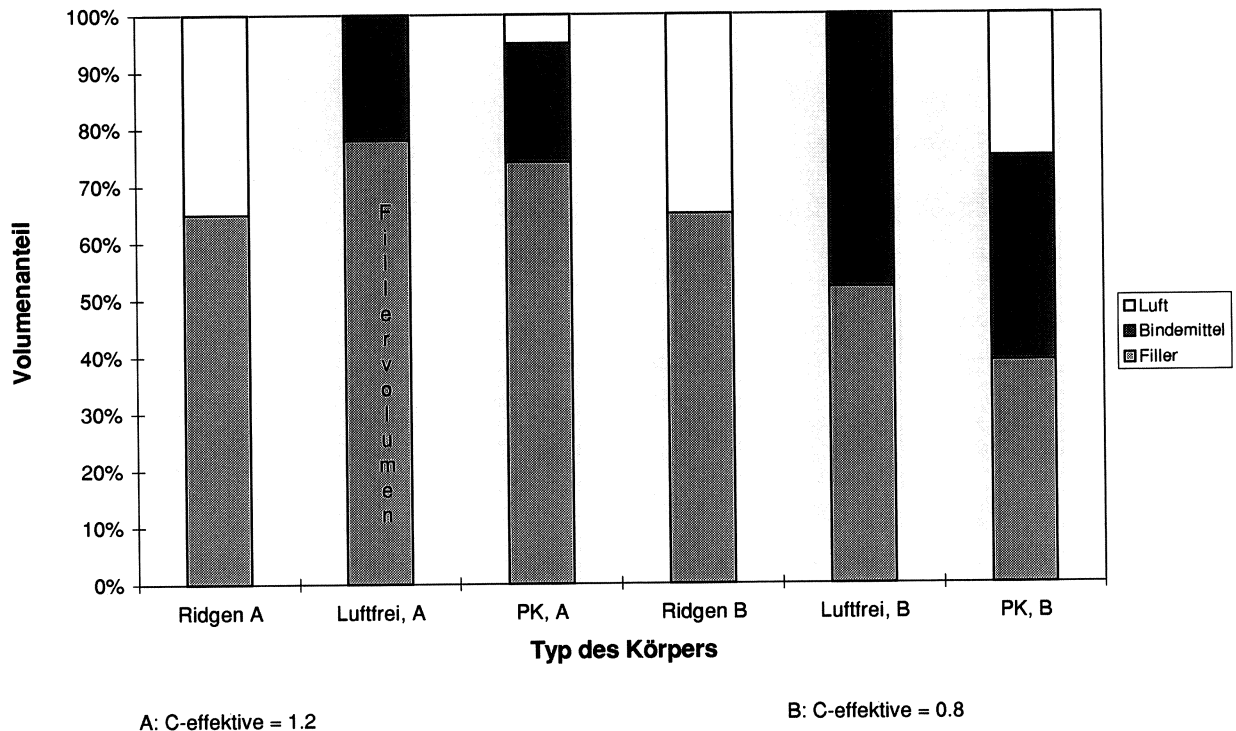
$$C_V = \frac{(m_F / \rho_F)}{(m_F / \rho_F + m_B / \rho_B)} * 100 \quad (2)$$

wobei gilt

- m_F : Masse Filler
- ρ_F : Dichte Filler
- m_B : Masse Bitumen
- ρ_B : Dichte Bitumen

Diese Prinzip wurde bereits in früheren schweizerischen Forschungsarbeiten [5,6] angewandt. Analog dazu wird in den USA oft das 'freie Bindemittelvolumen' [11] als Hilfe beim Rezeptieren verwendet um Fillereigenschaften ohne den Konzentrationseinfluss untersuchen zu können.

Abbildung 1: Durch C_{eff} kontrollierte Beziehung der Volumenanteile Luft, Bindemittel, Filler im verdichteten Filler, der luftfreien Mischung und im realen Prüfkörper dargestellt für zwei Fälle von $C_{eff} = 1.2$ und 0.8



Reproduzierbare Herstellung

Prüfkörper aus Filler und Bitumen mit einem hohen Filleranteil sind erfahrungsgemäss nicht einfach herzustellen, dementsprechend ist auch die Vergleichbarkeit entsprechender Prüfungen nicht immer gegeben. Die zu entwickelnde Methode sollte es deshalb erlauben, verlässlich Prüfkörper mit reproduzierbaren Eigenschaften herzustellen.

4.4 Versuche

4.4.1 Rezeptur

Fillerprüfkörper

Für die Untersuchung der Prüfkörperherstellung wurden Filler A und B, abgesiebt auf 0.09 mm, verwendet. Als Bindemittel wurde ein B80/100 ex Cressier eingesetzt.

Für die zum Vergleich durchgeführten Prüfung auf Volumenänderung nach geltender Norm wurden die dabei vorgeschriebenen Konzentrationen verwendet.

Sandasphaltprüfkörper

Für die Untersuchung der Prüfkörperherstellung wurden Filler A und B, abgesiebt auf 0.09 mm Filler, verwendet. Als weitere Mineralstoffkomponente wurden Quarzsande 0.1 .. 0.5 (im weiteren Grobsand bezeichnet) und 0.08 .. 0.2 (Feinsand) eingesetzt. Als Bindemittel wurde ein B80/100 ex Cressier eingesetzt.

Je nach Zielsetzung der Untersuchung wurden auch hier verschiedene Fillerkonzentrationen angewendet. Zum generellen Vergleich werden jeweils die Werte für C_{eff} angegeben. Für Sandasphaltprüfkörper mit einem Verhältnis von Feinsand zu Grobsand von 11 zu 5 wurde ein Bindemittelbedarf von 4% angenommen. Für Mischungen mit Grobsand allein wurde ein Bindemittelbedarf von 3% angenommen. Der Bindemittelbedarf des Fillers wird entweder aus dem Forschungsbedarf festgelegt oder kann aus einem festgelegten C_{eff} berechnet werden. Aus dem gewünschten Verhältnis von Filler zu Sand kann ausgehend von diesen Annahmen die Rezeptur berechnet werden.

4.4.2 Herstellung der Mischung

Mischungen wurden an den beiden Prüfstellen unterschiedlich hergestellt. Am IMP wurden die Mischungen von Hand nach einem genauen Verfahrensbeschrieb hergestellt. Die EMPA benützte einen Mischer und verwendete das Mischverfahren an, das in der EMPA-SOP 700 für die Prüfung Volumenänderung von Fillerprüfkörpern vorgeschrieben wird.

4.4.3 Einfluss der Anzahl Verdichtungsschläge

Die Prüfstellen entschieden, die Prüfkörper mittels dem Marshallverdichtungsgerät in Anlehnung an das Verfahren nach Norm gemäss "Volumenzunahme von Fillerprüfkörpern" durchzuführen. Dieses Verfahren stützt sich auf in Strassenbaulaboratorien generell vorhandene Gerätschaften, entsprechende Erfahrung ist vorhanden.

In einer Untersuchungsserie wurden die Zahl der Schläge variiert, um die optimale Schlagzahl für die Herstellung von Sandasphaltprüfkörpern herauszufinden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

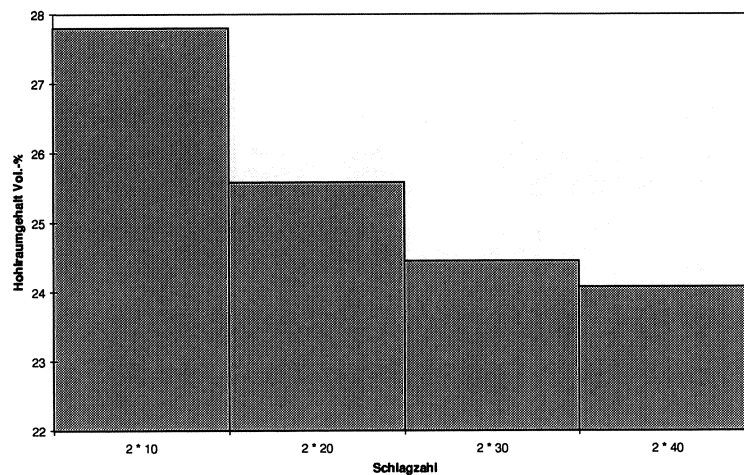
Tabelle 3: Erreichbarer Hohlraumgehalt in Sandasphalt als Funktion der Schlagzahl

Schlagzahl:	2 * 10	2 * 20	2 * 30	2 * 40
Filler	Hohlraumgehalt [Vol.- %]			
A	27.8	25.2	23.7	
A		25.1	24.2	23.6
B		25.6	24.3	24
A91-1091		26.3	24.8	24
A91-1067		25.4	24.7	24.1
A91-1041		25.9	25	24.7
Mittelwert	27.8	25.58	24.45	24.08
Standardabweichung		0.45	0.48	0.4

Anmerkung: In einem ersten Vorversuch wurde die Verdichtung mit den Schlagzahlen 2*10, 2*20 und 2*30 untersucht. Die Ergebnisse (Differenz zwischen 25.2 und 23.7 Vol.-%) deuteten daraufhin, dass für die maximal erreichbare Verdichtung mehr als 30 Schläge benötigt wurden, während bei 2*10 Schlägen eine noch völlig unzureichende Verdichtung vorlag. Es wurde deshalb entschieden, innerhalb dieser Untersuchungsserie mit den Schlagzahlen 2*20, 2*30 und 2*40 zu arbeiten. Aufgeführt sind alle Resultate.

Die Ergebnisse zeigen eine Abnahme des Hohlraumgehaltes als Funktion der Verdichtungsenergie, die proportional zur Schlagzahl angenommen werden kann. Der Hohlraumgehalt nimmt dabei vor allem zwischen 2*10 und 2*20 Schlägen deutlich ab, wie aus Abbildung 2 zu ersehen ist. Zwischen 2*20 und 2*40 Schlägen ist nur noch eine geringe Variation festzustellen, insbesondere die Werte für 2*30 und 2*40 weichen weniger als eine Standardabweichung voneinander ab. Damit ist ab 2*30 Schlägen eine Verdichtung erreicht, die robust gegen kleine Fehler der Versuchsdurchführung ist und zudem mit 24.45 Vol.-% Hohlraumgehalt sehr nahe bei der gewünschten Zielgrösse von 25% liegt. Deshalb wurde für die definitive Prüfvorschrift 2*30 Schläge gewählt.

Abbildung 2: Mittelwert des Hohlraumgehaltes als Funktion der Schlagzahl



4.4.4 Prüfung auf Homogenität

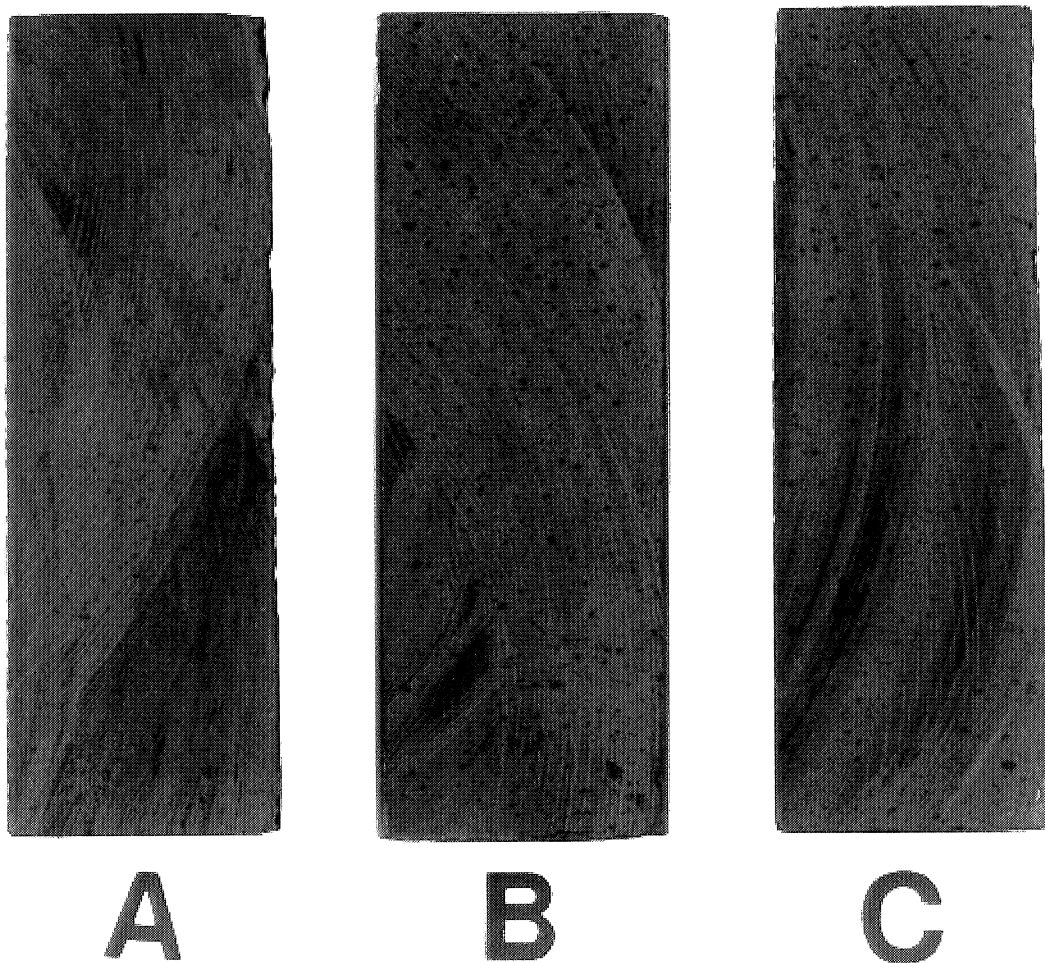
Homogenitätsprüfungen können nach verschiedenen physikalischen Prinzipien durchgeführt werden. Einbezogen wurden Ultraschall, Röntgentomographie, Fotografie von Schnitten und das Bestimmen der Rohdichte, die klassische Methode des Strassenbaus.

Ultraschall

Ultraschall eignet sich zur Untersuchung verschiedenster Materialien auf Inhomogenitäten wie Risse, Hohlräume etc. Es wurde deshalb abgeklärt, inwieweit die Methode Untersuchung der Inhomogenitäten in den vorliegenden Prüfkörpern angewendet werden konnte.

Aus einem Prüfkörper wurde durch zwei Längsschnitte ein flacher, annähernd quaderförmiger Körper (Mittelstück B in Abbildung 3) herausgeschnitten, der sich zur Ultraschallmessung eignete.

Abbildung 3: In der Ultraschalluntersuchung verwendeter Fillerprüfkörper (Mittelstück B).



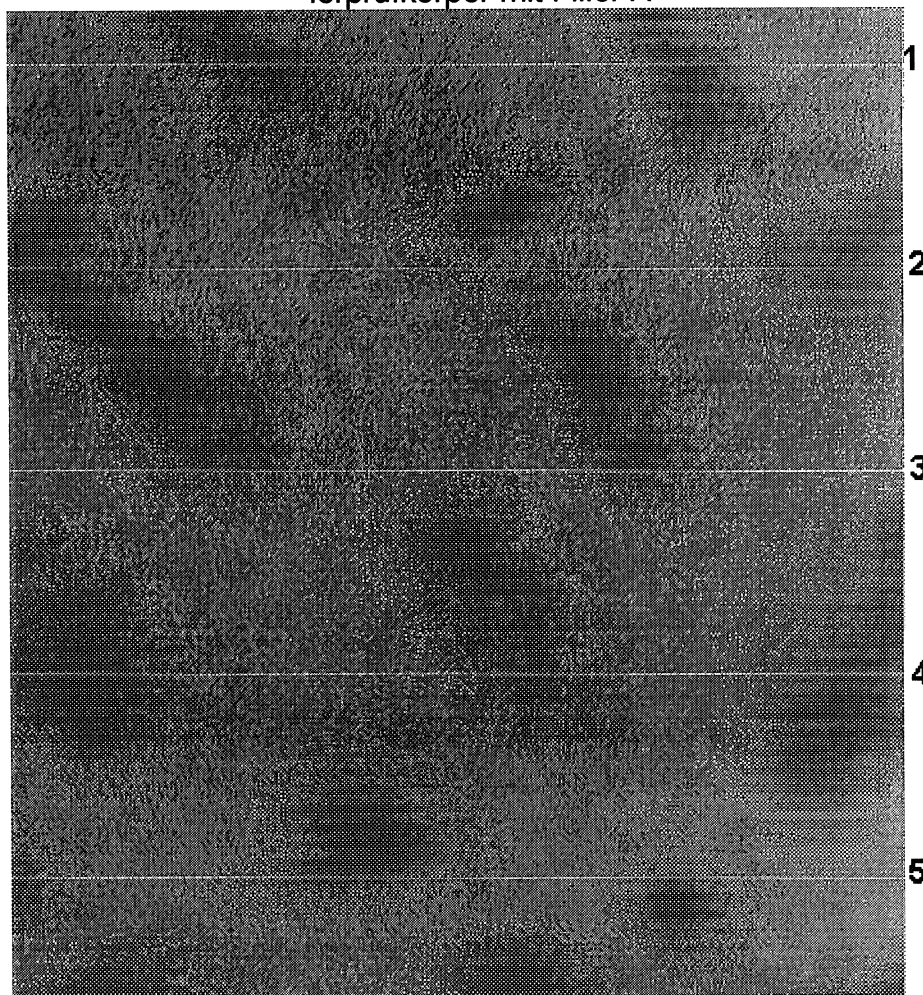
Der Fillerprüfkörper absorbierte Ultraschall sehr stark. Es konnten deshalb innerhalb der Messgenauigkeit keine Unterschiede gefunden werden; die Methode wurde nicht weiter verfolgt.

Röntgentomografie

Röntgentomografie wird ebenfalls erfolgreich für die Untersuchung von Materialien auf Inhomogenität eingesetzt. Insbesondere bewährte sich die Methode zur Untersuchung von Vorgängen in verdichtetem bituminösem Mischgut unter Belastung. Es wurde deshalb geprüft, ob die Methode auch im Rahmen dieser Forschung angewandt werden kann.

Für die Röntgentomografie wurde der gleiche Fillerprüfkörper wie für die Ultraschalluntersuchung verwendet. Er wurde in Richtung der dünnsten Dicke durchstrahlt und die Intensität des Röntgenstrahles nach Passieren des Prüfkörpers registriert. Längsinhomogenitäten in vertikaler Richtung sollten so festgestellt werden können.

Abbildung 4: Mittels Röntgentomografie erkennbare Dichtevariation in einem Fillerprüfkörper mit Filler A



Die mit diesem Verfahren erzeugten Abbilder der Prüfkörper zeigten nur sehr geringfügige Variationen, die sich nicht so auswerten liessen, dass gesicherte und dem Stassenbauer verständliche Informationen über die Homogenität gefunden werden konnten. Die Abbildung 4 weist auf eine Längsinhomogenität hin, indem bei Markierstreifen 5 eine Aufhellung ist (geringere Dichte), unter 5 und nahe bei 4 eine dichtere Schicht vorzuliegen scheint, während dann die Dichte nach oben wieder abnimmt (bei Markierlinie 2), aber weniger ausgeprägt als bei Markierlinie 5. Zusätzlich zur Inhomogenität längs sind mögliche lokale Dichteunterschiede zu erkennen, ein klarer Hinweis auf radiale Inhomogenität lässt sich daraus aber nicht ableiten. Grundsätzlich steht das Ergebnis in Einklang mit der Bestimmung der Homogenität durch Tauchwägung. Die Methode wurde auf Grund der schwierig zu interpretierenden Resultate nicht weiter verfolgt.

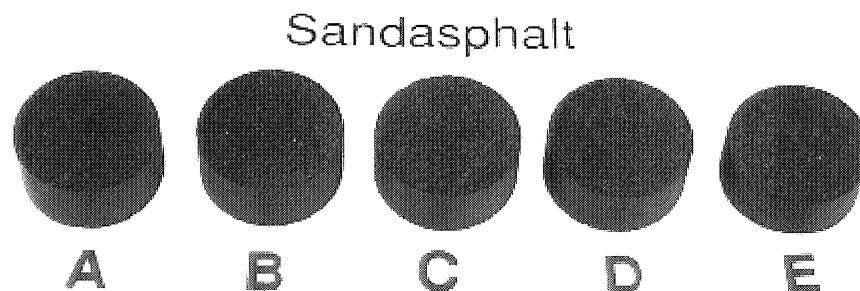
Fotografische Untersuchung von Schnittflächen

Die auf der Abbildung 3 erkennbaren dunklen Punkte in den Schnittflächen wurden Bindemittelanreicherungen interpretiert. Die Fotografie von Schnitten ist somit ein geeignetes Verfahren kleinräumliche Inhomogenitäten (im Bereich eines oder weniger Millimeter) zu erfassen und zu dokumentieren.

Bestimmen der Homogenität mittels Tauchwägung

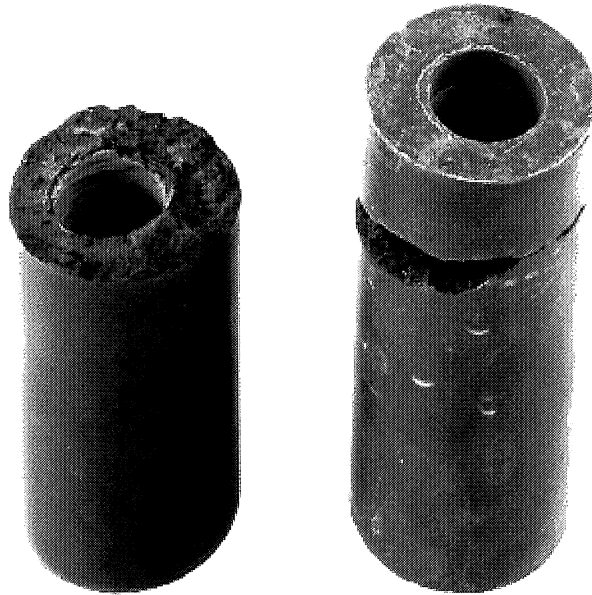
Für die Bestimmung der Homogenität längs wurde der Prüfkörper durch 4 Querschnitte in 5 gleich grosse Scheiben geteilt, fotografiert (Abbildung 5) und anschliessend für weitere Untersuchungen verwendet.

Abbildung 5: Prüfkörperscheiben zur Untersuchung der Homogenität längs am Beispiel eines Sandasphaltprüfkörpers



Für die Bestimmung der Homogenität radial wurde aus dem Prüfkörper ein zentraler Bohrkern $\varnothing$ 25 mm herausgebohrt. Vor allem am äusseren Mantel resultierten Beschädigungen und als Folge davon erhebliche Materialverluste (Abbildung 6). Diese Methode wurde deshalb verworfen. Als Alternative dazu wurde links und rechts vom Prüfkörper ein Teil des Mantels weggesägt, wie es aus Abbildung 3 zu ersehen ist. Die Beschädigungen waren dabei unwesentlich, für die Untersuchung wurde deshalb nur noch diese zweite Methode angewendet. Die beiden äusseren Teile repräsentierten dabei ausschliesslich Material aus dem Mantelbereich, der mittlere Teil enthielt den ganzen Kern- und einen Teil des Mantelbereiches. Radiale Unterschiede in der Verdichtung sollten sich deshalb zumindest als Tendenz abzeichnen.

Abbildung 6: Herausbohren eines zentralen Kernes aus einem Prüfkörper zum Erfassen der radialen Verteilung der Verdichtung.



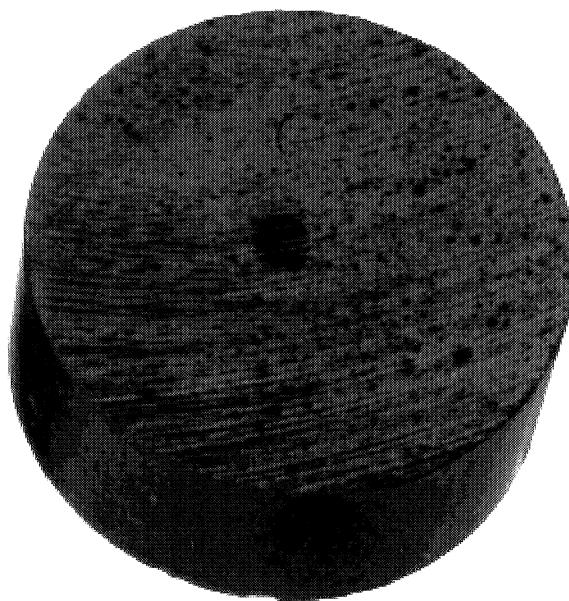
Die Rohdichte wurde durch Tauchwägung an allen Prüfkörpern bestimmt, Dichte am Mischgut, der Bindemittelgehalt an ausgesuchten Proben. Die Volumenzunahme über die Zeit wurde im Sinne einer vertieften Untersuchung an den Scheiben einzelner Prüfkörpers bestimmt. Untersucht wurden sowohl Fillerprüfkörper hergestellt nach SN 670'845 wie auch Sandasphaltprüfkörper. Verwendung fanden Filler B und Filler A.

4.4.5 Ergebnisse der Homogenitätsprüfung

Fillerprüfkörper

Die Fotografien zeigen an einem Teil der Fillerprüfkörper kleine, dunkle Punkte an den Schnitten (Abbildung 7). Das deutet auf bindemittelreiche Stellen hin, also auf eine unzureichende Vermischung. Bei Handmischungen ist dieses Phänomen besonders auffällig.

Abbildung 7: Fotografie einer Scheibe aus Fillerprüfkörper mit Filler A, handgemischt



D

Die Homogenität längs wurde an je 4 Fillerprüfkörpern mit Filler A und mit Filler B bestimmt. Die Werte sind in den Tabellen 4 und 5 zusammengestellt. Scheibe A ist dabei die oberste in Bezug auf die letzte Schlagverdichtung.

Tabelle 4: Homogenität längs in Fillerprüfkörpern, Filler A

Rohdichte					Dichte:	2.338	
Prüfkörper	Scheibe					Mittelwert	
	A	B	C	D	E	PK	
1	1.836	1.812	1.823	1.842	1.867	1.836	
2	1.853	1.823	1.798	1.794	1.825	1.8186	
3	1.883	1.839	1.803	1.804	1.837	1.8332	
4	1.816	1.777	1.781	1.812	1.856	1.8084	
Mittelwert	1.847	1.813	1.801	1.813	1.846		
Hohlraumgehalt							
Prüfkörper	Scheibe					Mittelwert	Standardabw.
	A	B	C	D	E	PK	PK
1	21.47	22.5	22.03	21.21	20.15	21.472	0.892
2	20.74	22.03	23.1	23.27	21.94	22.216	1.022
3	19.46	21.34	22.88	22.84	21.43	21.59	1.401
4	22.33	23.99	23.82	22.5	20.62	22.652	1.361
Mittelwert	21	22.47	22.96	22.46	21.03	21.98	
Standardabweichung aller Scheiben							1.197
Standardabweichung der Prüfkörper							0.553
Mittelwert der Standardabweichungen der Prüfkörper							1.169

Aus der Dichte des Mischgutes und den Rohdichten wurden die Hohlraumgehalte berechnet und statistisch ausgewertet. Die Standardabweichung des Hohlraumgehaltes der Prüfkörper beträgt nur knapp die Hälfte der Standardabweichung aller Scheiben und auch nur knapp die Hälfte der mittleren Standardabweichung der Scheiben der einzelnen Prüfkörper. Der grössere Teil der Streuung resultiert somit aus der Längsinhomogenität. Der maximale (23.99) Hohlraumgehalt ist um 19.1% grösser als der minimale (20.15). Der mittlere Hohlraumgehalt beträgt 21.98 Vol.-% und liegt innerhalb der Zielvorgabe von ca. 25 Vol.-%.

Tabelle 5: Homogenität längs in Fillerprüfkörpern, Filler B

Rohdichte					Dichte:	2.339	
Prüfkörper	Schnitt					Mittelwert	
	A	B	C	D	E	PK	
1	1.689	1.661	1.641	1.64	1.686	1.657	
2	1.684	1.635	1.631	1.634	1.684	1.6536	
3	1.654	1.613	1.6	1.611	1.657	1.627	
4	1.669	1.643	1.634	1.654	1.702	1.6604	
Mittelwert	1.674	1.638	1.627	1.635	1.682		
Hohlraumgehalt							
Prüfkörper	Schnitt				Mittelwert	Standardabw.	
	A	B	C	D	E	PK	PK
1	27.79	28.99	29.84	29.88	27.92	28.884	1.005
2	28	30.1	30.27	30.14	28	29.302	1.19
3	29.29	31.04	31.59	31.12	29.16	30.44	1.13
4	28.64	29.76	30.14	29.29	27.23	29.012	1.143
Mittelwert	28.43	29.97	30.46	30.11	28.08	29.41	
Standardabweichung aller Scheiben							1.205
Standardabweichung der Prüfkörper							0.709
Mittelwert der Standardabweichungen der Prüfkörper							1.117

Die Standardabweichung des Hohlraumgehaltes der Prüfkörper beträgt nur knapp 60% der Standardabweichung aller Scheiben und etwa 65% der mittleren Standardabweichung der einzelnen Prüfkörper. Der grössere Teil der Streuung resultiert auch bei diesem Filler somit aus der Längsinhomogenität. Der maximale (31.59) Hohlraumgehalt ist 13.7% grösser als der minimale (27.79). Der mittlere Hohlraumgehalt beträgt 29.41 Vol.-% und liegt weit weg von der Zielvorgabe von ca. 25%.

Abbildung 8: Verlauf der gemittelten Hohlraumgehalte entlang der Längsachse an Fillerprüfkörpern mit Filler A

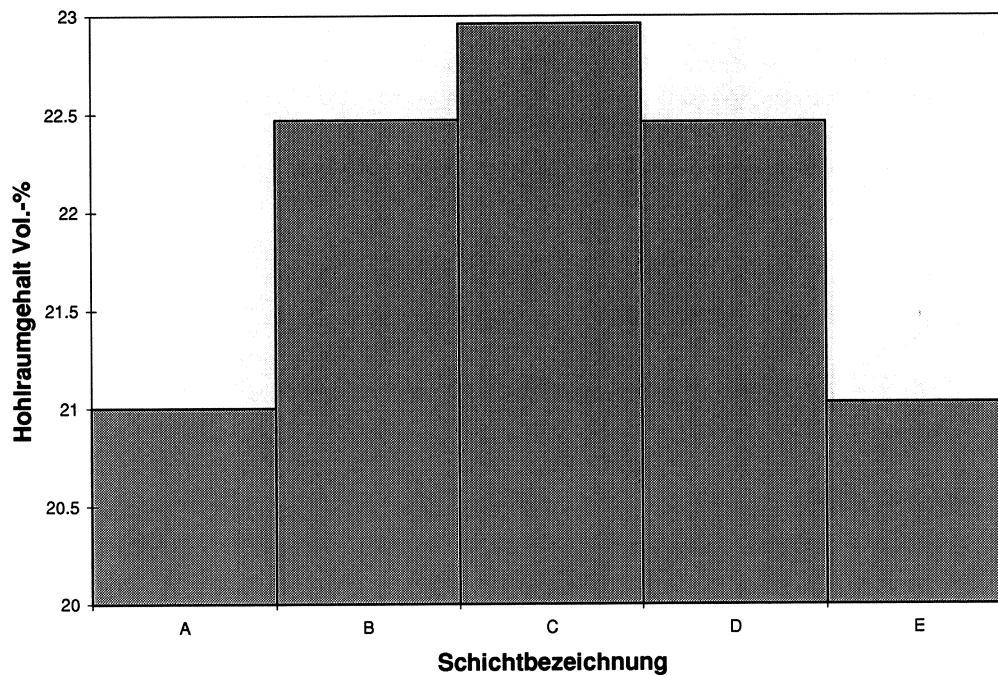


Abbildung 9: Verlauf der gemittelten Hohlraumgehalte entlang der Längsachse an Fillerprüfkörpern mit Filler B

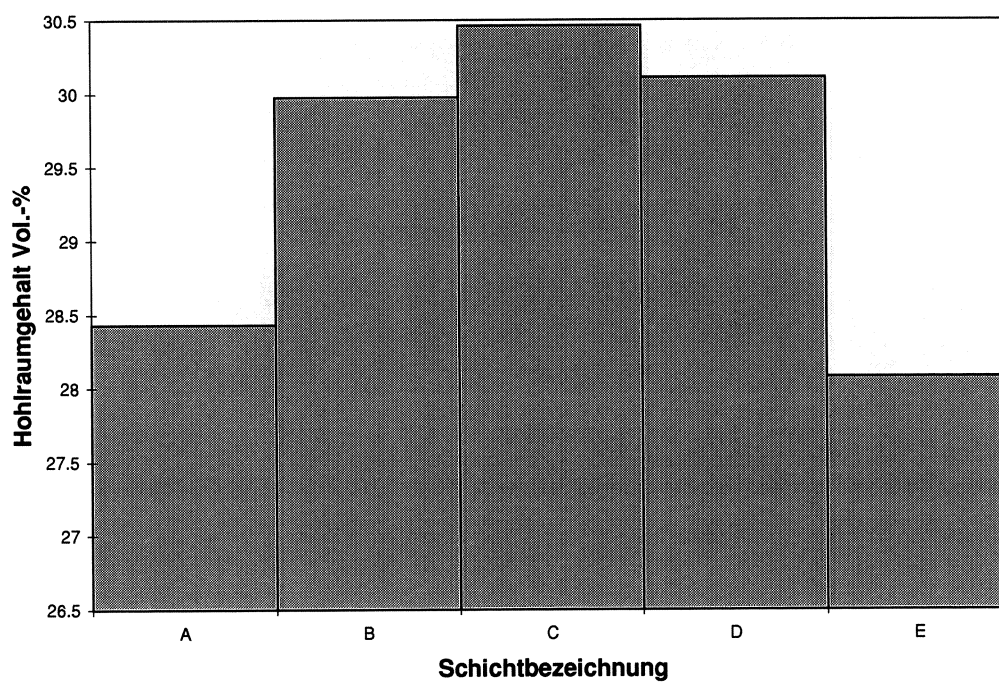


Tabelle 6: Homogenität radial in Fillerprüfkörpern, Filler A

Rohdichte			Dichte:	2.338	
Prüfkörper	Scheibe			Mittelwert	
	Rand	Mitte	Rand	PK	
1	1.817	1.806	1.800	1.808	
2	1.821	1.822	1.824	1.822	
3	1.803	1.807	1.811	1.807	
4	1.820	1.819	1.819	1.819	
Mittelwert	1.815	1.813	1.813		
Hohlraumgehalt					
Prüfkörper	Scheibe			Mittelwert	Standardabw.
	Rand	Mitte	Rand	PK	PK
1	22.3	22.8	23	22.7	0.36
2	22.1	22.1	22	22.1	0.06
3	22.9	22.7	22.6	22.7	0.15
4	22.2	22.2	22.2	22.2	0.00
Mittelwert	22.375	22.45	22.45		
Standardabweichung aller Scheiben					0.35
Standardabweichung der Prüfkörper					0.34
Mittelwert der Standardabweichungen der Prüfkörper					0.14

Tabelle 7: Homogenität radial in Fillerprüfkörpern, Filler B

Rohdichte			Dichte:	2.339	
Prüfkörper	Scheibe			Mittelwert	
	Rand	Mitte	Rand	PK	
1	1.678	1.676	1.653	1.669	
2	1.649	1.647	1.644	1.647	
3	1.658	1.678	1.683	1.673	
4	1.644	1.658	1.658	1.91	
Mittelwert	1.657	1.665	1.6595		
Hohlraumgehalt					
Prüfkörper	Scheibe			Mittelwert	Standardabw.
	Rand	Mitte	Rand	PK	PK
1	28.26	28.35	29.33	28.65	0.59
2	29.50	29.59	29.71	29.60	0.11
3	29.12	28.26	28.05	28.48	0.57
4	29.71	29.12	29.12	29.32	0.34
Mittelwert	29.15	28.83	29.05	29.01	
Standardabweichung aller Scheiben					0.616
Standardabweichung der Prüfkörper					0.535
Mittelwert der Standardabweichungen der Prüfkörper					0.402

Die Abbildung 8 zeigt den Verlauf der Mittelwerte der Hohlraumgehalte der Scheiben A bis E. Die über die Prüfkörper gemittelten Hohlraumgehalte entlang der Längsachse (Scheiben A bis E) zeigen deutlich die geringeren Hohlraumgehalte an den Prüfkörperenden.

Beide Filler zeigen diesen Effekt, in beiden Fällen ist der Verlauf innerhalb der Bestimmungsgenauigkeit symmetrisch.

Die Tabellen 6 und 7 beweisen, dass die Standardabweichung der Hohlraumgehalte aller Scheiben innerhalb der Bestimmungsgenauigkeit gleich der Standardabweichungen der Hohlraumgehalte der Prüfkörper ist. Damit kann für beide Filler keine radiale Variation der Verdichtung nachgewiesen werden. Dies stimmt mit der Beobachtung überein, dass bei Rohdichte und Hohlraumgehalt zwischen Rand und Mitte keine signifikanten Unterschiede bestehen. Wie bei den für die Bestimmung der Längshomogenität verwendeten Prüfkörpern besteht eine ausgeprägte Differenz der Hohlraumgehalte zwischen den beiden Füllern.

Bindemittelgehaltsverteilung in Fillerprüfkörpern

Um auszuschliessen, dass der Bindemittelgehalt und nicht die Verdichtung die Ursache der beobachteten Unterschiede in den Hohlraumgehalten darstellten, wurde jeweils an einem Prüfkörper der Bindemittelgehalt bestimmt. Dazu wurden die einzelnen Scheiben extrahiert, der verbleibende Filler gewogen, das Bindemittel zurückgewonnen und daran der Aschegehalt bestimmt, um den aschefreien Bindemittelgehalt berechnen zu können.

Tabelle 8: Bindemittelgehaltsverteilung längs in Fillerprüfkörpern, Filler A und B

Scheibe	A	B	C	D	E	Mittelwert
Filler A	9.61	9.92	9.99	9.95	10.00	9.89
Filler B	9.47	9.39	9.8	9.76	9.47	9.58

Tabelle 8 zeigt, dass keine klar erkennbare Inhomogenität längs im Bindemittelgehalt besteht. Die Abweichung zwischen dem Sollgehalt von 10% ist für den Filler A minim, für den Filler B grösser, aber nicht so gross, dass daraus die Unterschiede im Hohlraumgehalt erklärt werden können.

Tabelle 9 zeigt für die radiale Verteilung des Bindemittelgehaltes ein sehr ähnliches Bild. Es besteht kein beweisbarer Unterschied zwischen den äusseren und mittleren Teilen des Prüfkörpers. Ein ähnlicher Unterschied wie oben kann im Bindemittelgehalt zwischen den Prüfkörpern "A" und "B" festgestellt werden.

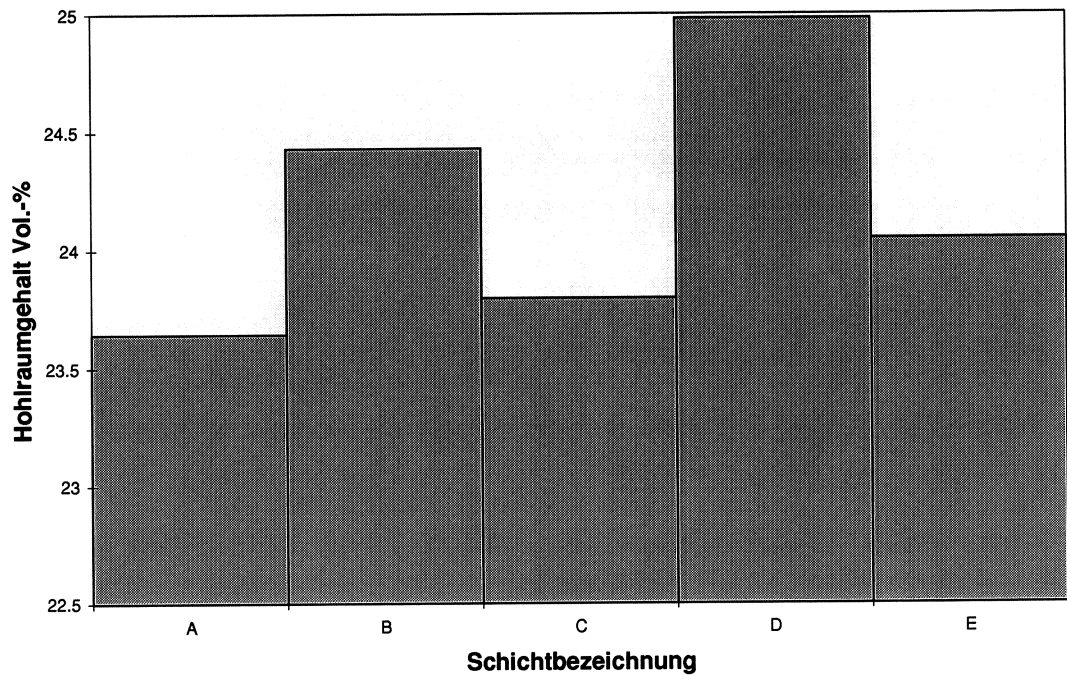
Tabelle 9: Bindemittelgehaltsverteilung radial in Fillerprüfkörpern, Filler A und B

Scheibe	Aussen	Mitte	Aussen	Mittelwert
Filler A	9.77	9.71	9.55	9.68
Filler B	9.55	9.24	9.41	9.4

Sandasphaltprüfkörper

An den Schnittbildern der Sandasphaltprüfkörper konnten keine kleinräumigen Inhomogenitäten festgestellt werden, wie die Abbildung 5 zeigt.

Abbildung 10: Verlauf des gemittelten Hohlraumgehalts entlang der Längsachse an Sandasphalt-Prüfkörpern mit Filler A



Die Homogenität längs wurde an je 4 Sandasphaltprüfkörpern mit Filler A und mit Filler B bestimmt. Die Werte sind in den Tabellen 10 und 11 zusammengestellt. Scheibe A ist dabei die oberste in Bezug auf die letzte Schlagverdichtung.

Tabelle 10: Homogenität längs in Sandasphaltprüfkörpern, Filler A

Rohdichte					Dichte:	2.47	
Prüfkörper	Scheibe					Mittelwert	
	A	B	C	D	E	PK	
1	1.868	1.873	1.868	1.854	1.918	1.8762	
2	1.907	1.869	1.891	1.861	1.871	1.8798	
3	1.892	1.844	1.896	1.844	1.859	1.867	
4	1.877	1.88	1.874	1.853	1.856	1.91	
Mittelwert	1.886	1.8665	1.88225	1.853	1.876		
Hohlraumgehalt							
Prüfkörper	Scheibe					Mittelwert	Standardabw.
	A	B	C	D	E	PK	PK
1	24.37	24.17	24.37	24.94	22.35	24.04	0.99
2	22.79	24.33	23.44	24.66	24.25	23.90	0.76
3	23.40	25.34	23.24	25.34	24.74	24.41	1.03
4	24.01	23.89	24.13	24.98	24.86	24.38	0.51
Mittelwert	23.64	24.43	23.80	24.98	24.05	24.18	
Standardabweichung aller Scheiben							0.810
Standardabweichung der Prüfkörper							0.254
Mittelwert der Standardabweichungen der Prüfkörper							0.821

Die Standardabweichung des Hohlraumgehaltes der Prüfkörper beträgt nur ein Drittel der Standardabweichung aller Scheiben und auch nur ein Drittel der mittleren Standardabweichung der Scheiben der einzelnen Prüfkörper. Der grössere Teil der Streuung resultiert somit aus der Längsinhomogenität. Der maximale (25.34) Hohlraumgehalt ist 13.4% grösser als der minimale (22.35), was eine Verbesserung gegenüber den Verhältnissen bei den entsprechenden Fillerprüfkörper darstellt (Zunahme 19.1%). Dies ist nicht nur durch einen zufälligen Einzelwert verursacht, denn die Standardabweichung aller Scheiben ist mit 0.81 Vol.-% deutlich kleiner als bei den entsprechenden Fillerprüfkörpern (1.197 Vol.-%). Der mittlere Hohlraumgehalt beträgt 24.18 Vol.-% und liegt noch im Bereich der Zielvorgabe von ca. 25%.

Tabelle 11: Homogenität längs in Fillerprüfkörpern, Filler B

Rohdichte					Dichte:	2.339	
Prüfkörper	Schnitt					Mittelwert	
	A	B	C	D	E	PK	
1	1.885	1.807	1.856	1.834	1.843	1.845	
2	1.865	1.793	1.856	1.825	1.838	1.8354	
3	1.879	1.816	1.866	1.833	1.856	1.85	
4	1.888	1.815	1.835	1.83	1.84	1.91	
Mittelwert	1.879	1.808	1.853	1.831	1.844		
Hohlraumgehalt							
Prüfkörper	Schnitt					Mittelwert	St-Abw.
	A	B	C	D	E	PK	PK
1	23.28	26.46	24.46	25.36	24.99	24.91	1.17
2	24.09	27.02	24.46	25.72	25.19	25.30	1.15
3	23.52	26.09	24.05	25.40	24.46	24.70	1.04
4	23.16	26.13	25.32	25.52	25.11	25.05	1.12
Mittelwert	23.51	26.43	24.57	25.50	24.94	24.99	
Standardabweichung aller Scheiben							1.052
Standardabweichung der Prüfkörper							0.248
Mittelwert der Standardabweichungen der Prüfkörper							1.120

Die Standardabweichung des Hohlraumgehaltes der Prüfkörper beträgt nur knapp ein Viertel der Standardabweichung aller Scheiben wie auch mittleren Standardabweichung der einzelnen Prüfkörper. Der grössere Teil der Streuung resultiert auch bei diesem Filler somit aus der Längsinhomogenität. Der maximale (27.02) Hohlraumgehalt ist 16.7% grösser als der minimale (23.16). Das ist schlechter als bei den entsprechenden Fillerprüfkörpern, wo die Differenz nur 13.7% beträgt. Der Unterschied ist jedoch nur durch die tiefen Werte der Scheiben A bedingt, denn die gesamte Standardabweichung von 1.05 Vol.-% ist etwas kleiner als bei den entsprechenden Fillerprüfkörpern (1.205 Vol.-%). Der mittlere Hohlraumgehalt beträgt 24.99 Vol.-% und liegt sehr nahe bei der Zielvorgabe von ca. 25 Vol.-%. Vor allem weisen die Sandasphaltprüfkörper mit beiden Fillern den praktisch gleichen Hohlraumgehalt auf.

Abbildung 11: Verlauf der gemittelten Hohlraumgehalte entlang der Längsachse an Asphaltprüfkörper mit Filler B

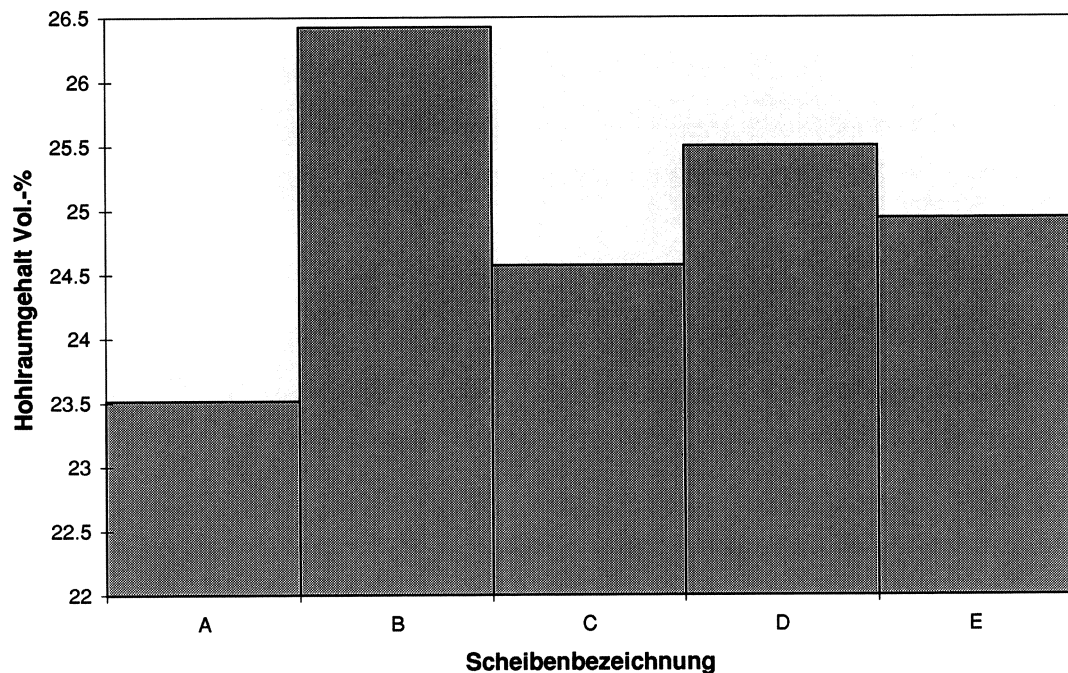


Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Mittelwerte der Hohlraumgehalte der Scheiben A bis E. Die über die Prüfkörper gemittelten Hohlraumgehalte entlang der Längsachse (Scheiben A bis E) zeigen einen geringeren Hohlraumgehalt an den Prüfkörperenden und, weniger ausgeprägt, in der Prüfkörpermitte auf. Die zuletzt verdichtete Seite weist den geringsten Hohlraumgehalt und somit die höchste Verdichtung auf.

Die radiale Homogenität wurde nur an je einem Prüfkörper mit Filler A und Filler B überprüft. Wie bei den Fillerprüfkörpern wurde der Prüfkörper durch Längsschnitte aufgeteilt. Die Tabelle 12 zeigt, dass auch bei Sandasphaltprüfkörpern kein Hinweis auf radiale Inhomogenität besteht.

Tabelle 12: Homogenität radial in Fillerprüfkörpern, Filler B

Filler	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	
	Aussenbereiche	Mitte
A	24.4	24.6
B	25.4	25.5

Bindemittelgehaltsverteilung in Sandasphaltprüfkörpern

Um auszuschliessen, dass der Bindemittelgehalt und nicht die Verdichtung die Ursache der beobachteten Unterschiede in den Hohlraumgehalten darstellten wurde jeweils an einem Prüfkörper der Bindemittelgehalt bestimmt. Dazu wurden die einzelnen Scheiben extrahiert, der verbleibende Filler gewogen, das Bindemittel zurückgewonnen und daran der Aschegehalt bestimmt, um den aschefreien Bindemittelgehalt zu berechnen können.

Tabelle 13: Bindemittelgehaltsverteilung längs in Sandasphaltprüfkörpern, Filler A und B

Scheibe	A	B	C	D	E	Mittelwert
Filler Lonza	5.06	4.93	5.02	4.72	5.22	4.99
Filler B	4.87	4.63	4.67	5.21	5.07	4.89

Tabelle 13 zeigt, dass keine klar erkennbare Inhomogenität längs im Bindemittelgehalt besteht. Die Abweichung zwischen dem Sollgehalt von 5% ist für den Filler A minim, für den Filler B grösser, aber nicht so gross, dass daraus die Unterschiede im Hohlraumgehalt erklärt werden können.

Tabelle 14 zeigt für die radiale Verteilung des Bindemittelgehaltes ein sehr ähnliches Bild. Es besteht kein beweisbarer Unterschied zwischen den äusseren und mittleren Teilen des Prüfkörpers. Ein ähnlicher Unterschied wie oben kann im Bindemittelgehalt zwischen den Prüfkörpern "Filler A" und "Filler B" festgestellt werden.

Tabelle 14: Bindemittelgehaltsverteilung radial in Sandasphaltprüfkörpern, Filler A und B

Scheibe	Aussen	Mitte	Aussen	Mittelwert
Filler A	5.18	5.06	5.07	5.1
Filler B	4.87	4.98	5	4.95

4.4.6 Beurteilung der Prüfkörper aufgrund der Homogenität

Sowohl bei der Herstellung von Fillerprüfkörpern nach Norm SN 670'845 wie auch bei den Sandasphaltprüfkörpern treten Inhomogenitäten in Längsrichtung auf, die bei den untersuchten Fillerprüfkörpern ausgeprägter ausfallen. Es konnte keine Inhomogenität in radialer Richtung nachgewiesen werden. Die beiden Filler lieferten Fillerprüfkörper stark unterschiedlicher Hohlraumgehalte, aber Sandasphaltprüfkörper des nahezu gleichen Hohlraumgehaltes.

4.4.7 Folgerung

Da Sandasphaltprüfkörper eindeutig genauer auf einen bestimmten Hohlraumgehalt eingestellt werden konnten, wurde entschieden, die weiteren Untersuchungen primär an Sandasphaltprüfkörpern durchzuführen. Entsprechend den Ergebnissen zum Einfluss der Schlagzahlen und der Homogenität wurde die Zielvorgabe für den Hohlraumgehalt von Sandasphaltprüfkörpern von 25 Vol.-% bestätigt.

4.5 Standardverfahren zur Prüfkörperherstellung

4.5.1 Verwendete Baustoffe

Pro durchgeführten Versuch sind folgende Baustoffe erforderlich:

- 1200 g des zu prüfenden Fillers; auf Sieb 0,09 mm abgesiebt.
- 800 g feuergetrockneter Quarzsand 0,1 bis 0,5 mm.
- 200 g Bitumen B80/100 gemäss Norm SN 671 110d [12] und mit einen Umhüllungsgrad [13] nach Wasserlagerung von $\geq 80\%$.

4.5.2 Rezept zur Herstellung der Prüfkörper

Mineralstoffe

- 40% Quarzsand; pro Prüfkörper 167 g
- 60% Filler; pro Prüfkörper 250 g

Bindemitteldosierung

Das Bindemittel wird derart dosiert, dass eine effektive Volumenkonzentration C_{eff} von 1,16 resultiert.

$$\text{Bitumen (g)} = \frac{93}{1,16 \times (1 - H_R)} - 93 \quad (1)$$

HR: Hohlraumgehalt nach Ridgen [14] als Dezimalbruch (z.B. 0,35)

Herleitung der Formel (1):

Aus
$$c_v = \frac{V_F}{V_F + V_B} \quad (2)$$

VF : Volumen Filler
VB : Volumen Bitumen

wird mit
$$V_F = \frac{M_F}{\gamma_F}; V_B = \frac{M_B}{\gamma_B}$$

$$c_v = \frac{M_F}{(M_F + \frac{M_B * \gamma_F}{\gamma_B})} \quad (3)$$

MF : Masse Filler
 γ_F : Dichte Filler
MB : Masse Bitumen
 γ_B : Dichte Bitumen

Aus (3)

wird mit $\gamma_B \cong 1,0$
$$c_v = \frac{M_F}{M_F + M_B * \gamma_F}$$

und
$$ceff = \frac{c_v}{1 - HR}$$

$$ceff = \frac{\frac{M_F}{M_F + M_B * \gamma_F}}{1 - HR} \quad (4)$$

für
$$ceff = 1,16$$

$$M_F = 250g$$

kann aus (4) M_B berechnet werden:

$$M_B = \frac{250}{\gamma_F} * \left[\frac{1}{1,16 * (1 - HR)} - 1 \right] \quad (5)$$

für $\gamma_F = 2,69$ wird aus (5)

$$M_B = \frac{93}{1,16 * (1 - HR)} - 93 \quad (1)$$

4.5.3 Herstellung Prüfkörper

Filler und Quarzsand im Ofen auf 150 °C vorwärmen.

Benötigte Menge Bitumen (für 4 Prüfkörper) aus Gefäss ausschneiden und in gedecktem Becher im Ofen auf 150 °C vorwärmen.

Filler, Quarzsand und Bitumen bei 150 °C intensiv mischen:

- Zum Aufheizen grosse Eisenschalen auf Dreibein über Bunsenbrenner verwenden. Temperatur mit Thermometer kontrollieren.
- Mit Pistill intensiv solange rühren, bis keine Farbveränderungen mehr sichtbar sind. Der erste Prüfkörper wird extrem lange gemischt. Entnahme von 1 g Material; als Farbmuster für weitere PK verwenden.
- Mischgut in einer gedeckten Eisenschale im Ofen temperieren; $150^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Mischgut in vorgeheizte Stahlzylinder $\varnothing$ 50 mm einfüllen.

Anmerkung: Alternativ dazu kann in einem geeigneten mechanischen Mischer gemischt werden.

Prüfkörper herstellen:

- Verdichtung mit umgebautem Marshallgerät (gemäss [10])
2 x 30 Schläge.
- Prüfkörper ausformen und abkühlen lassen.
- Die Prüfkörper ungeschnitten im Exsikator (mit Silikagel) über Nacht trocken lagern. Die Wasserlagerung hat spätestens 24 Stunden nach der Herstellung der Prüfkörper zu erfolgen.
- Schneiden der Prüfkörper (kleine Säge benutzen) auf eine Länge von 100 ± 1 mm.

4.5.4 Durchführung der Wasserlagerung

- Bestimmung der Rohdichte gemäss SN 671 967a [16]
- Fluten der Prüfkörper:
 - Prüfkörper stehend in Exikator stellen;
 - Exikator bis auf Höhe Oberkante Prüfkörper mit Eis füllen;
 - Wasser nachgiessen bis 1 - 2 cm über Prüfkörper-Oberkante.
- Vakuumpumpe anschliessen
- Vakuum von 25 bis 30 mbar innerhalb von 20 Minuten gemäss Tabelle 15 erreichen.

Tabelle 15: Durchführen der Evakuierung

Start	Einstellung	725 mbar
nach 5 Minuten	"	550 mbar
nach 10 Minuten	"	375 mbar
nach 15 Minuten	"	200 mbar
nach 20 Minuten	"	25 mbar

- Prüfkörper 2,5 Std. bei Unterdruck von 25 mbar im Eiswasser lagern.
- Bestimmung der Rohdichte:
Prüfkörper oberflächlich abtrocknen und Rohdichte bestimmen gemäss [16]
- Wasserlagerung:
Prüfkörper in Wasser bei 40°C; 24 Std. ± ½ Std. lagern.
- Bestimmung der Rohdichte nach 24 Std. gemäss [16]

4.5.5 Berechnung der Volumenzunahme

Volumenänderung (ΔV) für jeden Prüfkörper wie folgt berechnen:

$$\Delta V = \frac{V_{24} - V_0}{V_0} \times 100 [\text{Vol.}\%]$$

- ΔV Volumenänderung des Prüfkörpers nach 24-stündiger Wasserlagerung
 V_0 Volumen des Prüfkörpers vor Wasserlagerung
 V_{24} Volumen des Prüfkörpers nach Wasserlagerung

Massgebender Wert

Als massgebender Wert für die Volumenänderung gilt das Mittel der Bestimmungen an mindestens drei Prüfkörpern. Dabei dürfen die Einzelwerte vom Mittelwert höchstens 0,5 Vol.-% abweichen.

4.5.6 QS-Massnahmen

Die verwendeten Gerätschaften können von Labor zu Labor ändern. Um einen unzulässigen Einfluss von laborspezifischen Geräten und Verfahren auszuschliessen, sollte bei der laborinternen Validierung des Verfahrens abgeklärt werden:

- Die geforderte Verdichtung gemessen am Hohlraumgehalt muss erreicht werden. Der Hohlraumgehalt muss im Bereich von 25 ± 2 Vol.-% liegen.
- Die Homogenität muss ausreichend sein. Der Prüfkörper ist auf 100 mm zuzuschneiden. Dann ist der Hohlraumgehalt des gesamten Prüfkörpers zu bestimmen. Aus einem zweiten Prüfkörper sind 5 Scheiben à 20 mm Dicke zu schneiden und an jeder der Hohlraumgehalt zu bestimmen. Der kleinste und grösste Wert dürfen nicht mehr als 4 Vol.-% voneinander abweichen. Kein Wert darf mehr als 3 Vol.-% vom Wert des gesamten Prüfkörpers abweichen.
- Die Penetration des aufgearbeiteten Bindemittels muss mindestens 55% des ursprünglichen Wertes betragen.

5. Evaluation der Prüfverfahren

5.1 Rollabrieb

5.1.1 Grundsätzliches

Folgende Überlegungen führten zur Untersuchung des sogenannten Rollabriebversuches:

- Es sollte ein einfacher Versuch ohne grossen apparativen Aufwand definiert werden
- Die Wasserempfindlichkeit des Fillers soll durch eine kombinierte Abriebs- und Wasserlagerungsbeanspruchung angesprochen werden
- Der Masseverlust durch die Abriebs-/ Wasserlagerungs-Beanspruchung soll als Mass für die Wasserempfindlichkeit dienen.

Dieser Rollabriebversuch wurde in Anlehnung an das Schüttelabrieb-Verfahren der Technischen Universität München [8] definiert.

In diesem Schüttelabriebverfahren wird mit dem zu prüfenden Filler und einem definierten Quarzsand ein Sandasphaltprüfkörper hergestellt, der in einen mit wassergefüllten Zylinder gelegt wird. Der Zylinder wird in einer Schüttelmaschine mit 20 Upm drei Stunden lang gedreht. Als Mass für die Wasserempfindlichkeit des Fillers wird der Masseverlust des Prüfkörpers gewogen.

Mit der Erprobung der Methode "Rollabrieb" wurde versucht, die Vorteile der Methode der TU München mit einem apparativ geringeren Aufwand zu nutzen. An dieser Stelle ist allerdings zu bemerken, dass die TU München die Wasserempfindlichkeit des Fillers aufgrund dreier Versuche (Schüttelabrieb, Volumenzunahme nach Wasserlagerung sowie Abfall Druckfestigkeit nach Wasserlagerung) beurteilt.

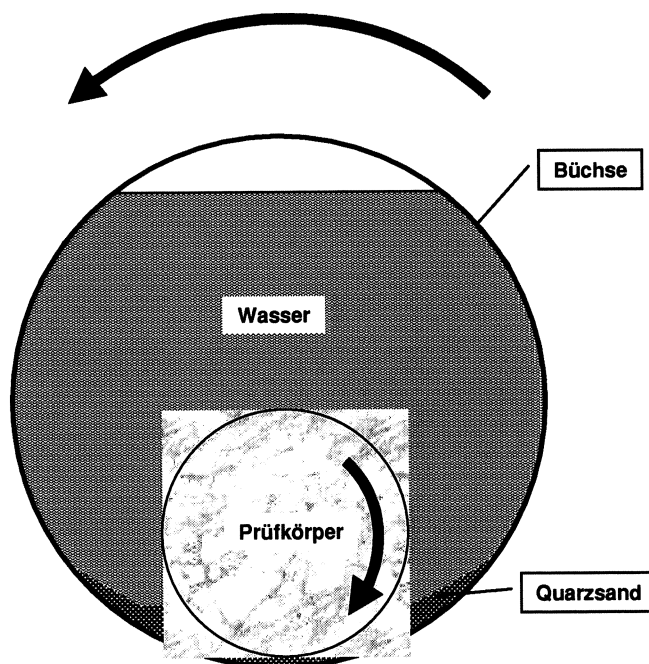
5.1.2 Versuchsbeschreibung

Der Versuch "Rollabrieb" beinhaltet folgende Schritte:

- Herstellung von Sandasphalt-Prüfkörper gemäss Punkt 4.5.
- Fluten der Sandasphalt-Prüfkörper unter Vakuum im Eiswasser; Vakuum von 25 mbar innert 20 min stufenweise erreichen; anschliessend 2½ Std. bei 25 mbar in Eiswasser lagern.
- Je ein Prüfkörper mit 50 g Quarzsand 0.1-0.5 mm in eine Blechbüchse mit Ø 140 mm stellen; Büchse mit Wasser 3 cm über OK Prüfkörper füllen und gut verschliessen.
- Verschlussene Büchse in horizontaler Stellung mit 40 Upm um die Längsachse drehen.
- Prüfkörper stündlich aus der Büchse entfernen; abspülen, abtupfen und trocknen, wägen.
- Gewichtsverlust in Funktion der Versuchsdauer aufzeichnen.

In einer ersten Phase wurden zwei Prüfkörper in dieselbe Büchse gelegt; der Abrieb erfolgte durch die gegenseitige Berührung der beiden Prüfkörper. Diese Versuchsanordnung erwies sich als ungeeignet, da die Versuchsbedingungen über die gesamte Versuchsdauer nicht konstant waren. Weichere Prüfkörper wurden an ihrem weichen Gegenpart weniger beansprucht als harte Prüfkörper. Aus diesem Grund wurden in jener zweiten Phase Versuche mit einem Prüfkörper pro Büchse gefahren.

Abbildung 12: Prinzipskizze des Versuches "Rollabrieb".



5.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 16 zusammengefasst sowie in den Abbildungen 13, 14 und 15 graphisch dargestellt.

Es lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Der Rollabriebversuch ohne vorgängige Wasserlagerung der Prüfkörper zeigt zu wenig Unterschiede zwischen den verschiedenen quellfähigen Fillern.
- Auch nach Wasserlagerung ist die Streuung zwischen den einzelnen Prüfkörper innerhalb einer Serie sehr gross.
- Durch den Abrieb der Prüfkörper entsteht ein Brei, welcher die Schärfe des Quarzsandes abstumpft. Prüfkörper, die zu Beginn des Versuches einen grossen Gewichtsverlust erleiden, werden im weiteren weniger stark beansprucht als Prüfkörper, bei denen die Schärfe des Quarzsandes erhalten bleibt.
- Die Abweichungen zweier Prüfkörper des gleichen Fillers entsprechen etwa der Abweichung zwischen den zwei untersuchten Fillern die in Bezug auf die Wasserempfindlichkeit sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Aufgrund der negativen Untersuchungsergebnisse, insbesondere der Tatsachen dass die Unterschiede zwischen den zwei untersuchten Fillern nicht aufgezeigt werden konnte und die Streuungen zu gross waren, wurde die Versuchsanordnung "Rollabrieb" nicht weiter verfolgt.

Zeit [Std]	A1		A2		A3		A4		A5		A6	
	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]
0	419.1	0.00	420.4	0.00	394.8	0.00	396.7	0.00	360.2	0.00	362.8	0.00
1	387.8	7.47	405.8	3.47	387.8	1.77	392.0	1.18	360.4	-0.06	363.7	-0.25
2	358.0	14.58	398.1	5.30	381.1	3.47	387.7	2.27	359.7	0.14	362.5	0.08
3	338.8	19.16	390.8	7.04	374.4	5.17	383.5	3.33	358.5	0.47	360.9	0.52
4	316.2	24.55	379.3	9.78	368.5	6.66	379.9	4.23	357.2	0.83	358.7	1.13
5	291.2	30.52	372.8	11.32	361.3	8.49	375.5	5.34	355.7	1.25	357.4	1.49
6	269.2	35.77	365.3	13.11	356.2	9.78	372.2	6.18	354.3	1.64	355.6	1.98
7	247.1	41.04	357.9	14.87	351.2	11.04	368.6	7.08	352.8	2.05	353.7	2.51
8	233.7	44.24	349.0	16.98	345.9	12.39	364.7	8.07	351.7	2.36	351.9	3.00
9	217.3	48.15	340.4	19.03	340.1	13.86	360.7	9.07	351.3	2.47	349.9	3.56

Zeit [Std]	B1		B2		B3		B4		B5		B6	
	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]	Masse PK [g]	Massever- lust [%]
0	407.1	0.00	415.1	0.00	394.5	0.00	388.6	0.00	361.9	0.00	363.1	0.00
1	401.1	1.47	398.6	3.97	386.7	1.98	379.6	2.32	361.8	0.03	363.6	-0.14
2	392.6	3.56	380.7	8.29	379.2	3.88	372.6	4.12	359.8	0.58	364.1	-0.28
3	385.1	5.40	375.3	9.59	372.7	5.53	366.8	5.61	357.4	1.24	362.6	0.14
4	377.5	7.27	357.6	13.85	367.2	6.92	361.7	6.92	353.8	2.24	360.4	0.74
5	374.2	8.08	342.2	17.56	360.7	8.57	355.0	8.65	349.4	3.45	358.5	1.27
6	370.2	9.06	337.2	18.77	355.6	9.86	349.4	10.09	346.6	4.23	357.1	1.65
7	365.3	10.27	331.4	20.16	351.0	11.03	343.6	11.58	343.2	5.17	356.3	1.87
8	360.0	11.57	316.5	23.75	346.1	12.27	338.1	13.00	339.5	6.19	355.2	2.18
9	353.4	13.19	303.4	26.91	341.8	13.36	332.8	14.36	336.0	7.16	353.6	2.62

Legende: A1, A2, A3, A4: Filler-Sand-Prüfkörper mit Filler A mit vorgängiger Wasserlagerung

A5, A6: Filler-Sand-Prüfkörper mit Filler A ohne vorgängiger Wasserlagerung

B1, B2, B3, B4: Filler-Sand-Prüfkörper mit Filler B mit vorgängiger Wasserlagerung

B5, B6: Filler-Sand-Prüfkörper mit Filler B ohne vorgängiger Wasserlagerung

Abb. 13: Masseverlust in Abhängigkeit der Beanspruchungszeit der einzelnen Prüfkörper

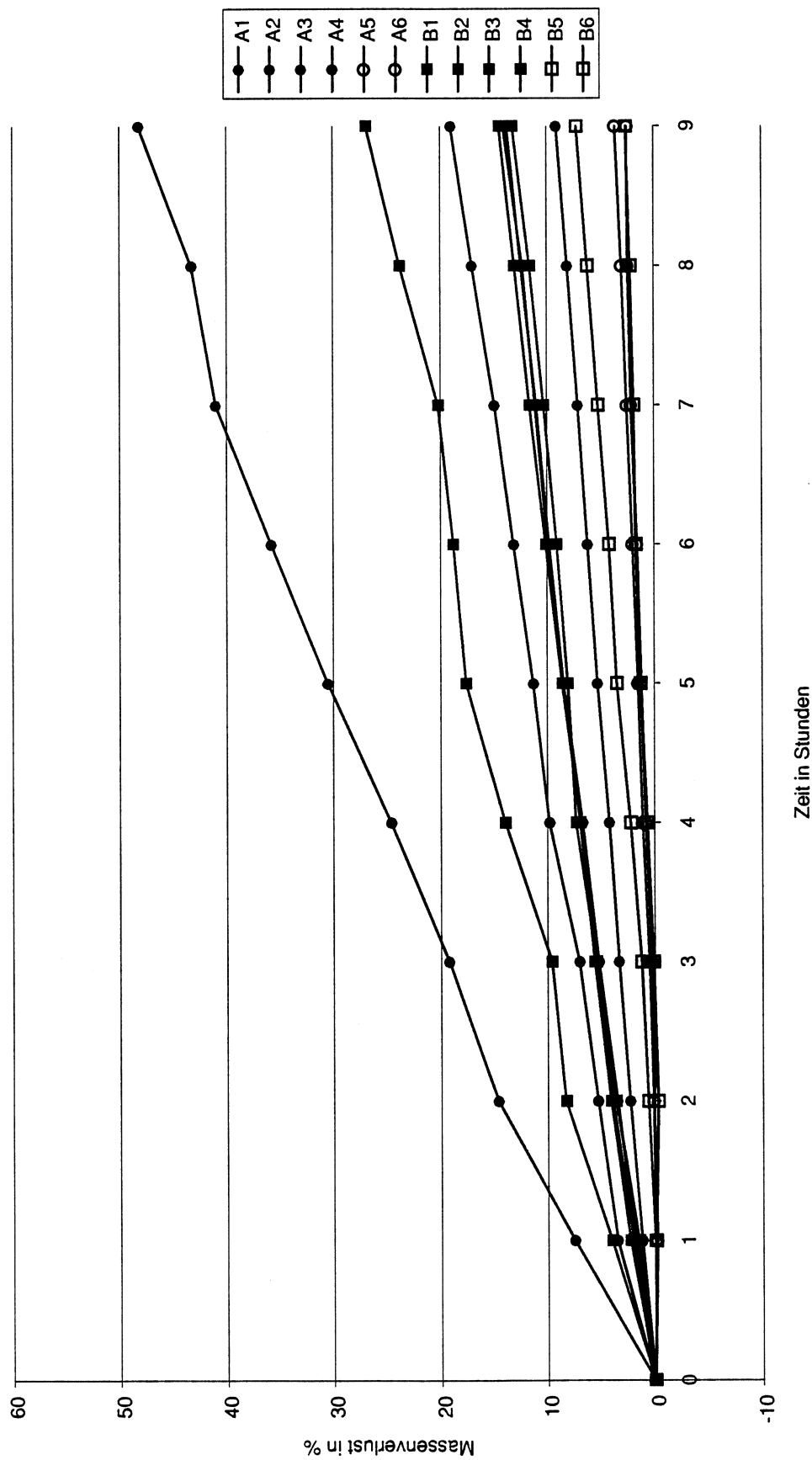


Abb. 14: Masseverlust in Abhängigkeit der Beanspruchungszeit; Mittelwerte

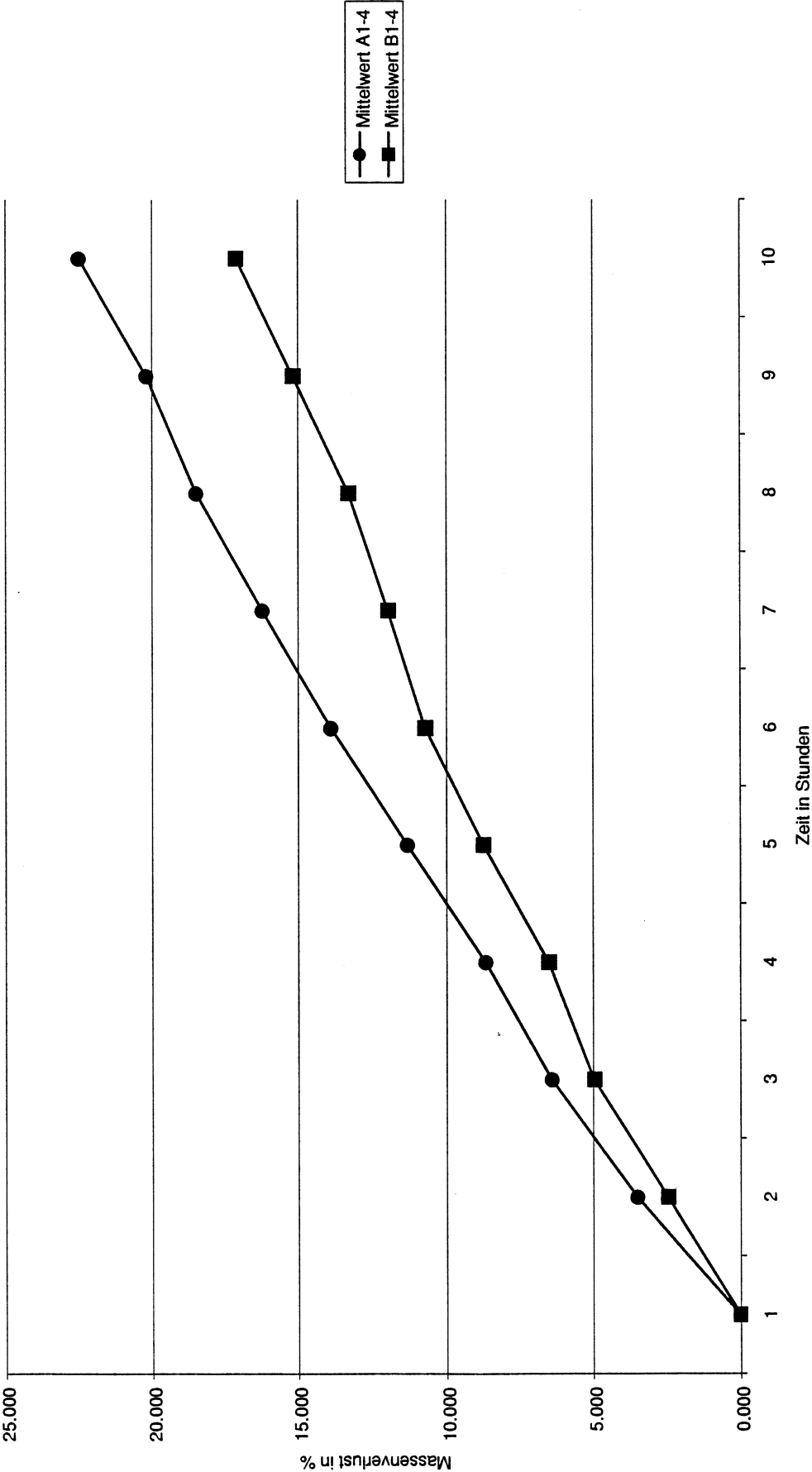
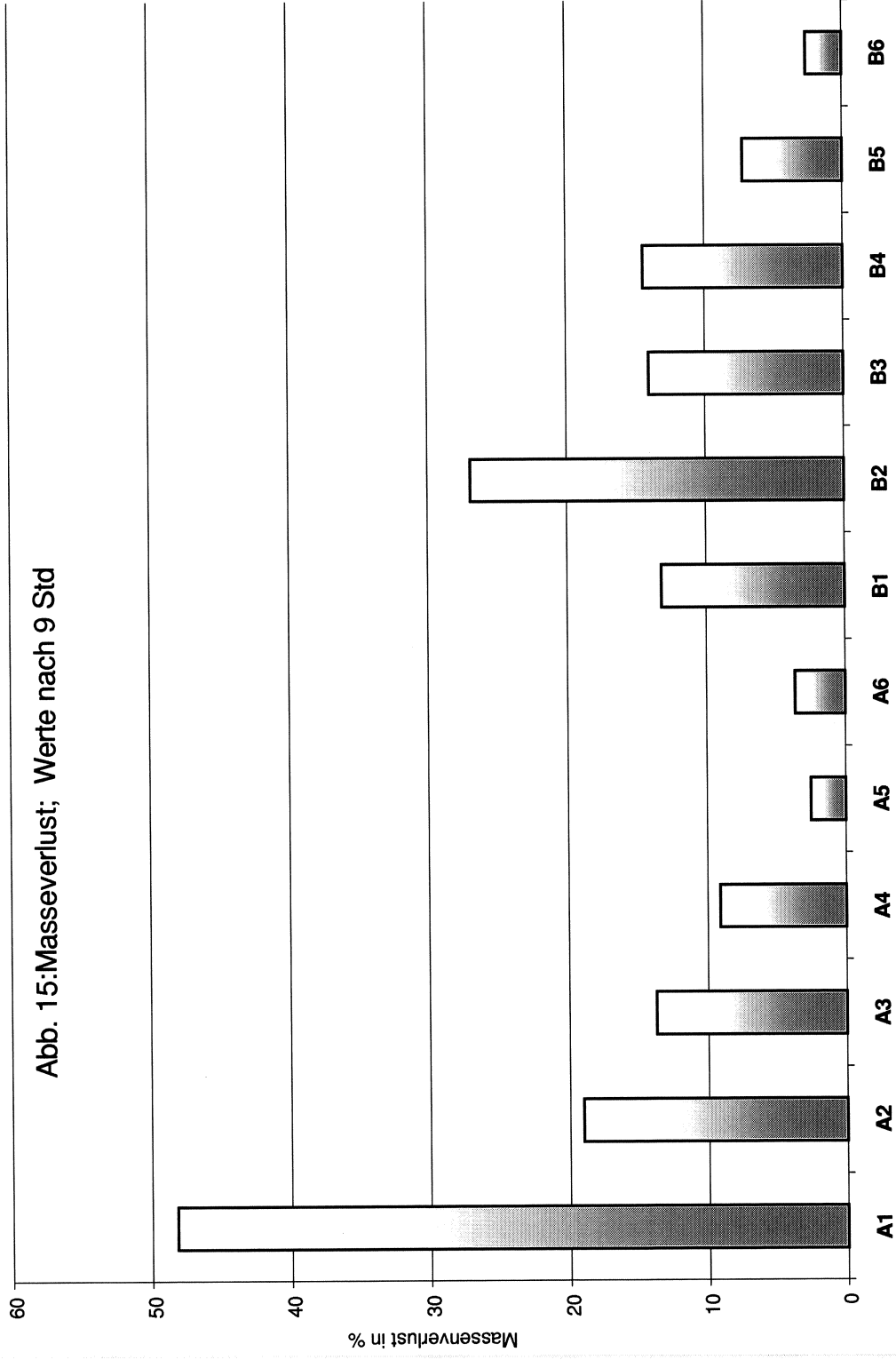


Abb. 15: Masseverlust; Werte nach 9 Std



5.2. Monoaxiale Zugversuche

5.2.1 Grundsätzliches

Das Quellen des Fillers nach Wasserlagerung führt zu strukturellen Veränderungen innerhalb des Prüfkörpers. Monoaxiale Zugprüfungen sind daher sehr geeignet, um diese Schädigungen zu erfassen. Allerdings ist die Durchführung eines monoaxialen Zugversuches sehr anspruchsvoll und mit gewissen Nachteilen verbunden:

- Die Lasteinleitung in der Prüfkörper (Schlag zu Beginn des Prüfkörpers) lässt sich nur mit einem hohen apparativen Aufwand ausschliessen.
- Die Prüfkörpervorbereitung ist sehr aufwendig, müssen doch die Stirnseiten der zylindrischen Prüfkörper planparallel sein. Ein Schleifen von Prüfkörpern mit relativ geringer Festigkeit ist anspruchsvoll.

Weggesteuerte Versuche:

Weggesteuerte monoaxiale Zugversuche müssen grundsätzlich als ungünstig betrachtet werden, da eine unkontrollierte Zunahme der Belastung insbesondere zu Beginn der Prüfung nur mit sehr aufwendigen Steuerungen verhindert werden kann. Es lässt sich bei einfachen Prüfmaschinen kaum verhindern, dass zu Beginn der Prüfung die Last schlagartig zunimmt. Trotz diesem grundsätzlichen Nachteil wurde eine Reihe weggesteuerter, monoaxialer Zugversuche durchgeführt, da diese Versuche apparativ einfach durchzuführen sind. Das Ziel des Forschungsauftrages bestand ja darin, eine einfache Prüfung zu definieren, welche auch in kleineren Strassenbaulabors durchgeführt werden kann. Einfache Marshallpressen, welche in jedem Strassenbaulabor zur Verfügung stehen, führen weggesteuerte Versuche durch.

Aus den Vorversuchen war bekannt, dass der Weg bis zum Bruch im Bereich von 0,2 bis 0,8 mm liegt. Die Versuchsgeschwindigkeit wurde zu 0,15 mm/sek. gewählt, damit der Bruch des Prüfkörpers innert weniger Sekunden erreicht wird.

Lastgesteuerte Versuche:

Bei einem langsamen Versuch werden die viskoelastischen Eigenschaften des Bindemittels zu stark gewichtet. Der Versuch sollte schnell durchgeführt werden, damit das Fließen des Prüfkörpers möglichst gering gehalten werden kann.

Aufgrund einiger Versuche wurde festgestellt, dass die Zugfestigkeit von Fillerprüfkörper wie auch von Sand-Filler-Prüfkörper in einem Bereich von 0,1 bis 0,3 N/mm² liegt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde daher mit 0,05 N/mm² pro Sekunde festgelegt, um den Bruch innerhalb weniger Sekunden zu erreichen.

5.2.2 Durchgeführte Versuche

In einer grösseren Untersuchungsreihe wurden sowohl lastgesteuerte wie auch weggesteuerte Versuche durchgeführt. Es wurden sowohl Fillerprüfkörper gemäss Norm SN 670 845 wie auch Sand-Fillerprüfkörper gemäss Pkt. 4 untersucht.

Die Versuchsreihe wurde mit 2 verschiedenen Fillern; einem als wenig quellfähig bekannten Kalksteinfiller (A) sowie einem stark quellfähigen Filler (B) durchgeführt.

Die Temperatur für die Prüfkörper wurde zu +15°C festgelegt. Die Prüfkörper wurden in einem Luftbad über Nacht temperiert.

Lastgesteuerte Versuche wurden mit einer Lastzunahme von 0,05 N/mm² pro Sekunde durchgeführt.

Bei den weggesteuerten Versuche wurde eine Geschwindigkeit von 0,15 mm/sek. gewählt, um dem definierten Ziel eines schnellen Versuches zu entsprechen.

Für jede Versuchsanordnung wurde eine Reihe von 4 Einzelprüfungen durchgeführt.

In der Tabelle 17 wird eine Übersicht über die durchgeführten Versuche gegeben.

Tabelle 17: Durchgeführte monoaxiale Zugversuche bei +15°C.

	Filler A				Filler B			
	Sandasphalt PK		Filler PK (SN 670 845)		Sandasphalt PK		Filler PK (SN 670 845)	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
	Wasserlagerung		Wasserlagerung		Wasserlagerung		Wasserlagerung	
Lastgesteuerte Versuche	x	x	x	x	x	x	x	x
Weggesteuerte Versuche	x	x	x	x	x	x	x	x

PK : Prüfkörper

Für jede Versuchsanordnung wurde zur Berechnung der massgebenden Mittelwerte eine Serie von 4 Einzelwerten bestimmt.

Der Abfall der Bruchkraft sowie des Bruchweges infolge der Wasserlagerung (24 Std. bei 40°C) wurde durch das Verhältnis beider Werte vor/nach Wasserlagerung charakterisiert.

5.2.3 Ergebnisse

Die Einzelwerte der durchgeführten Versuche sowie die daraus errechneten Mittelwerte sind in der Tabelle 18 wiedergegeben.

In der Tabelle 19 sind die Mittelwerte der durchgeführten Versuche aufgeführt sowie die Verhältnisse der Ergebnisse vor/nach Wasserlagerung aufgeführt.

Aus den durchgeführten monoaxialen Zugversuche lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Beim stark quellfähigen Filler B sind während der Wasserlagerung Querrisse im zylindrischen Prüfkörper entstanden. Die Zugversuche konnten bei diesem Filler nach der Wasserlagerung nicht durchgeführt werden. Die Filler-Prüfkörper haben sich für die Durchführung von Zugversuche als ungeeignet erwiesen.
- Die Streuung der Ergebnisse nach Wasserlagerung sind deutlich höher als vor Wasserlagerung. Der Varianzkoeffizient (sowohl bei der Bruchkraft als auch beim Bruchweg) ist deutlich grösser bei den Prüfkörpern nach Wasserlagerung, als bei den Prüfkörpern vor Wasserlagerung.

Die Aussagekraft der monoaxialen Zugversuche in Bezug auf die Wasserempfindlichkeit von Fillern wird beurteilt, indem die Verhältnisse der Ergebnisse vor/nach Wasserlagerung betrachtet werden.

Tabelle 18

Ergebnisse der monoaxialen Zugversuche bei 15°C an Filler-Prüfkörper
gemäss Norm SN 670 845 sowie an Filler-Sand-Prüfkörper; EW

Filler A; lastgesteuert

	Filler-Prüfkörper				Sandaspalt-Prüfkörper			
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
	0.4	0.51	0.33	0.45	0.55	0.76	0.29	0.45
	0.49	0.5	0.3	0.42	0.59	0.85	0.28	0.43
	0.48	0.59	0.28		0.61	0.83	0.29	0.4
	0.43	0.53	0.2	0.38	0.52	0.71	0.19	0.31
Mittelwert	0.45	0.53	0.28	0.42	0.57	0.79	0.26	0.40
Std Abw	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03	0.06	0.04	0.05
Varianzkoeff %	8.16	6.56	17.35	6.88	6.15	7.09	16.02	13.47

Filler B; lastgesteuert

	Filler-Prüfkörper				Sandaspalt-Prüfkörper			
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
	0.24	0.39	*	*	0.59	0.91	0.25	0.4
	0.24	0.38	*	*	0.51	0.83	0.42	0.62
	0.29	0.52	*	*	0.55	0.8	0.31	0.51
	0.29	0.55	*	*	0.51	0.78	0.19	0.39
Mittelwert	0.27	0.46			0.54	0.83	0.29	0.48
Std Abw	0.02	0.08			0.03	0.05	0.08	0.09
Varianzkoeff %	9.43	16.48			6.14	5.96	29.05	19.49

* : Versuch nicht durchführbar, da Prüfkörper nach Wasserlagerung gerissen

Filler A; weggesteuert

	Filler-Prüfkörper				Sandaspalt-Prüfkörper			
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
	0.38	0.4	0.32	0.42	0.91	0.76	0.26	0.23
	0.25	0.36	0.28	0.34	0.49	0.51	0.15	0.19
	0.35	0.38	0.26	0.29	0.59	0.64	0.14	0.1
	0.36	0.38	0.24	0.26	0.46	0.58	0.2	0.23
Mittelwert	0.34	0.38	0.28	0.33	0.61	0.62	0.19	0.19
Std Abw	0.05	0.01	0.03	0.06	0.18	0.09	0.05	0.05
Varianzkoeff %	15.00	3.72	10.76	18.49	29.12	14.74	25.40	28.32

Filler B; weggesteuert

	Filler-Prüfkörper				Sandaspalt-Prüfkörper			
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
	0.22	0.23	*	*	0.45	0.57		
	0.23	0.31	*	*	0.44	0.61	0.25	0.26
	0.23	0.28	*	*	0.5	0.55	0.24	0.19
	0.21	0.2	*	*	0.48	0.54	0.14	0.17
Mittelwert	0.22	0.26			0.47	0.57	0.21	0.21
Std Abw	0.01	0.04			0.02	0.03	0.05	0.04
Varianzkoeff %	3.73	16.75			5.10	4.72	23.65	18.67

Tabelle 19

Ergebnisse der monoaxialen Zugversuche bei 15°C an Filler-Prüfkörper
gemäss Norm SN 670 845 sowie an Filler-Sand-Prüfkörper; Mittelwerte
und Vergleich vor/nach Wasserlagerung

Weggesteuerte Versuche

Filler-Prüfkörper

	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler L	0.34	0.38	0.28	0.33	1.21	1.15
Filler B	0.22	0.26	*	*	*	*

Sandasphalt-Prüfkörper

	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler L	0.61	0.62	0.19	0.19	3.21	3.26
Filler B	0.47	0.57	0.21	0.21	2.24	2.71

Lastgesteuerte Versuche

Filler-Prüfkörper

	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler L	0.45	0.53	0.28	0.42	1.61	1.26
Filler B	0.27	0.46	*	*	*	*

* : Versuch nicht durchführbar, da Prüfkörper nach Wasserlagerung gerissen

Sandasphalt-Prüfkörper

	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler L	0.57	0.79	0.26	0.4	2.19	1.98
Filler B	0.54	0.83	0.29	0.48	1.86	1.73

Verhältniszahl von Bruchkraft und Bruchweg bei Zugversuche an Sandasphalt-Prüfkörper vor/nach Wasserlagerung:

Filler	weggesteuerter Versuch		lastgesteuerter Versuch	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
A	3.21	3.26	2.19	1.98
B	2.24	2.71	1.86	1.73

Die weggesteuerten Versuche zeigen grössere Unterschiede zwischen den geprüften Fil-
lern auf. Aus diesem Grunde werden diese Versuche als günstiger beurteilt als lastge-
steuerte Versuche. Dies erstaunt, da aus theoretischen Überlegungen die weggesteuerten
Versuche grundsätzlich als ungünstig betrachtet wurden (siehe Pkt. 5.2.1).

Das bisherige Verfahren aus der Norm 670 845 zeigt zwischen den beiden geprüften Fil-
lern sehr deutliche Unterschiede (Volumenzunahme von 0,5 bzw. 5,4 Vol.-%). Beim weg-
gesteuerten, monoaxialen Zugversuch wird ein Unterschied von lediglich 50% festgestellt.
Zudem ist die Streuung innerhalb der Serie relativ gross.

In der untenstehenden Tabelle 21 wurde zur Beurteilung der Signifikanz der Unterschiede die Verhältniszahlen der Bruchkraft vor/nach Wasserlagerung für die einzelnen Versuche berechnet.

Tabelle 21: Verhältniszahl der Bruchkraft bei weggesteuerten,
mnoaxialen Zugversuchen an Sandaspalt-PK
vor/nach Wasserlagerung

Filler	Prüfkörper Nr.	Bruchkraft vor Wasserl.	Bruchkraft nach Wasserl.	Verhältnis vor/nach
A	1	0.91	0.26	3.50
	2	0.49	0.15	3.27
	3	0.59	0.14	4.21
	4	0.46	0.2	2.30
	Mittelwert	0.61	0.19	3.32
	Standardabw	0.18	0.05	0.68
	Varianzkoeff. %	29.12	25.40	20.62
B	1	0.45		
	2	0.44	0.25	1.76
	3	0.5	0.24	2.08
	4	0.48	0.14	3.43
	Mittelwert	0.47	0.21	2.42
	Standardabw	0.02	0.05	0.72
	Varianzkoeff. %	5.10	23.65	29.81

Die beiden Stichproben stammen mit einer Wahrscheinlichkeit von 11% aus der gleichen Grundgesamtheit. Das heisst, die Mittelwerte sind mit einer Wahrscheinlichkeit von 89% verschieden. Da im Allgemeinen bei der Prüfung auf signifikante Unterschiede eine Wahrscheinlichkeit von 95% verlangt wird, kann ein signifikanter Unterschied statistisch nicht belegt werden.

5.3 Druckversuche

5.3.1 Grundsätzliches

Die Wasserempfindlichkeit der Filler kann grundsätzlich durch den Abfall der Druckfestigkeit infolge Wasserlagerung festgestellt werden. Druckfestigkeitsprüfungen sind sehr einfach durchzuführen und somit in jedem Strassenbaulabor möglich.

Risse im Prüfkörper, welche allenfalls während der Wasserlagerung auftreten können, werden in einem Druckversuch zusammengedrückt und haben daher theoretisch wenig Einfluss auf das Ergebnis. Strukturelle Veränderungen beeinflussen das Ergebnis deutlich weniger als bei Zugversuchen. Bei diesen wurde allerdings festgestellt, dass die Strukturveränderung durch die Wasserlagerung derart gross sein können, dass die Versuchsdurchführung verunmöglicht wurde.

Betreffend der Wahl der Versuchsparameter galten die gleichen Voraussetzungen wie bei den monoaxialen Zugversuchen; das heisst die Versuche sollten relativ rasch durchgeführt werden, um die viskose Eigenschaften des Bindemittels möglichst wenig anzusprechen. Aufgrund einiger Vorversuche waren sowohl Bruchkraft als auch Bruchweg in der Gröszenordnung bekannt. Es wurden folgende Versuchsbedingungen festgelegt:

- Lastgesteuerter Versuch mit einer Zunahme der Spannung um $0,1 \text{ N/mm}^2/\text{sek}$.
- Weggesteuerter Versuch mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $0,15 \text{ mm}^2/\text{sek}$.

5.3.2 Durchgeführte Versuche

Vergleich Filler-Prüfkörper/Sandasphaltprüfkörper

Es wurden sowohl last- wie auch weggesteuerte Druckversuche bei $+15^\circ\text{C}$ an Fillerprüfkörpern sowie an Sandasphaltprüfkörpern durchgeführt. Untersucht wurden die Filler A und B vor und nach Wasserlagerung. Für jede Versuchsanordnung wurden 4 Prüfkörper einzeln untersucht sowie deren Mittelwerte berechnet. In der Tabelle 22 wird eine Übersicht über die durchgeführten Druckversuche gegeben.

Tabelle 22 Durchgeführte Druckversuche bei $+15^\circ\text{C}$

	Filler A				Filler B			
	Sandasphalt-PK		Filler PK (SN 670 845)		Sandasphalt-PK		Filler PK (SN 670 845)	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
	Wasserlagerung		Wasserlagerung		Wasserlagerung		Wasserlagerung	
Lastgesteuerte Versuche	x	x	x	x	x	x	x	x
Weggesteuerte Versuche	x	x	x	x	x	x	x	x

PK : Prüfkörper

Die geprüften Sandasphalt-Prüfkörper enthielten eine Fillerdosierung von 20%. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 23 und 24 zusammengefasst. Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Filler-Prüfkörper sind auch bei den Druckversuchen als ungeeignet zu betrachten. Beim wasserempfindlichen Filler B sind Risse nach der Wasserlagerung aufgetreten; die Kraft war teilweise kaum mehr messbar. Die Prüfkörper waren durch die Wasserlagerung bereits derart aufgelockert, dass eine Prüfung der Druckfestigkeit nicht mehr durchführbar war.
- Die Veränderung der Bruchkraft nach Wasserlagerung ist deutlich grösser als die Veränderung des Weges bis zur Bruchkraft.
- Beim weggesteuerten Versuch wurden grössere Unterschiede zwischen den Fillern festgestellt als beim lastgesteuerten Versuch.

Tabelle 23: Ergebnisse der Druckversuche bei 15°C;
Vergleich vor/nach Wasselagerung

Weggesteuerte Versuche

	Filler-Prüfkörper					
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler A	2.64	1.84	2.11	2.08	1.25	0.88
Filler B	1.36	1.81	0.47*	2.41*	2.89*	0.75*

* Prüfkörper nach Wasserlagerung gerissen; Versuch z.T. nicht durchführbar

	Sandasphalt-Prüfkörper					
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler A	3.03	1.75	1.97	1.45	1.54	1.21
Filler B	2.41	1.91	0.96	1.44	2.51	1.33

Lastgesteuerte Versuche

	Filler-Prüfkörper					
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler A	2.61	1.93	2.1	2.35	1.24	0.82
Filler B	1.48	2.12	0.36*	*	4.11*	*

* Prüfkörper nach Wasserlagerung gerissen; Versuch z.T. nicht durchführbar

	Sandasphalt-Prüfkörper					
	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		Verhältnis vor/nach Wasserlagerung	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
Filler A	2.98	1.87	1.7	1.43	1.75	1.31
Filler B	2.58	2.05	1.74	1.61	1.48	1.27

Tabelle 24: Verhältniszahl der Bruchkraft bei Druckversuche an Sandasphalt-PK vor/nach Wasselagerung

Filler	Weggesteuerter Versuch		Lastgesteuerter Versuch	
	Kraft kN	Weg mm	Kraft kN	Weg mm
A	1.54	1.21	1.75	1.31
B	2.51	1.33	1.48	1.27

Erhöhung der Fillerdosierung

Die erste Serie der durchgeführten Druckversuche zeigte zwar bei der Bruchkraft der weggesteuerten Versuche einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden geprüften Fillern auf. Unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Praxis mit diesen beiden Fillern wurde jedoch eine grössere Unterscheidung im Prüfverfahren angestrebt. Aus diesem Grunde wurde die Fillerdosierung in den Sandasphalt-Prüfkörpern erhöht. Es wurden Versuche mit Fillerdosierungen von 20%, 40% und 60% durchgeführt. Die Bindemitteldosierung wurde für die einzelnen Fillergehalte derart festgelegt, dass eine effektive Volumenkonzentration von $C_{\text{eff}} = 1.16$ erfolgte (berechnet aus Masse Filler und Masse Bitumen ohne Berücksichtigung des Quarzsandes). Die Ergebnisse der weggesteuerten Versuche sind in der Tabelle 25 zusammengefasst. Erstaunlicherweise konnte keine Verbesserung der Aussagekraft infolge Erhöhung der Fillerdosierung festgestellt werden.

Zudem fällt auf, dass die Bruchkraft beim Filler A sowohl vor, wie auch nach der Wasserlagerung, generell höher ist als beim Filler B. In beiden Fillern nimmt die Bruchkraft mit zunehmendem Fillergehalt zu.

Tabelle 25: Druckversuche bei 15°C mit verschiedenen Anteilen an Filler im Sandasphalt-Prüfkörper (weggesteuerte Druckversuche mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0.05 mm/s).

Filler	Anteil Filler	Bruchkraft kN		Verhältnis vor / nach Wasserlagerung	Abnahme der Druckfestigkeit
		vor WL	nach WL		
A	20%	3.63	1.8	2.02	50.4
	40%	4.85	3.4	1.43	29.9
	60%	6.3	4.78	1.32	24.1
B	20%	3.07	1.23	2.50	59.9
	40%	3.39	1.44	2.35	57.5
	60%	3.44	1.52	2.26	55.8

Schleifen der Prüfkörper

Für die Durchführung von Druckfestigkeits-Prüfungen müssen Prüfkörper generell planparallel geschliffen werden. Das Schleifen von Sandasphaltprüfkörper mit geringer Druckfestigkeit ist heikel auszuführen, da die Kanten der Prüfkörper stark beansprucht werden. Ein Abbrechen dieser Kanten kann auch bei grosser Sorgfalt nicht immer verhindert werden.

Um abzuklären ob auf das Schleifen verzichtet werden kann, wurde eine Serie Druckprüfungen an ungeschliffenen Prüfkörpern durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 26 zusammengefasst.

An diesen Untersuchungsergebnissen fällt auf, dass die Bruchkraft der ungeschliffenen Prüfkörper generell tiefer liegt. Aus der Prüfung spröder Materialien (wie etwa Beton) ist bekannt, dass das Schleifen der Prüfkörper eine Erhöhung der Bruchkraft bewirkt. Dass dies auch bei Sandasphalt-Prüfkörpern in einer Grössenordnung von 20% der Fall ist, wurde nicht erwartet, da die Prüfkörper durch die schlagende Verdichtung im Marshallgerät relativ ebene Stirnflächen aufweisen. Zudem ist der Einfluss der Plan-Parallelität der Stirnseiten um so grösser je spröder die geprüften Materialien sind; Sandasphalt-Prüfkörper sind relativ weich.

Die Standardabweichung in den einzelnen Prüfserien ist bei den ungeschliffenen Prüfkörpern in der Regel deutlich grösser als bei den geschliffenen Prüfkörpern.

Aus den oben durchgeführten Versuchen folgt eindeutig, dass die Sandasphalt-Prüfkörper nicht ungeschliffen geprüft werden dürfen.

Tabelle 26: Vergleich der Druckprüfungen an geschliffenen und ungeschliffenen Prüfkörpern (weggesteuerter Druckversuch mit Vorschubgeschwindigkeit 0.05 mm/sec. ohne Wasserlagerung)

Filler	Anteil Filler	Bruchkraft geschliffener PK		Bruchkraft ungeschliffener PK	
		Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
A	20%	3.63	0.081	2.91	0.066
	40%	4.85	0.049	4.37	0.134
	60%	6.3	0.305	5.33	0.267
B	20%	3.07	0.109	2.81	0.879
	40%	3.39	0.257	2.33	0.675
	60%	3.44	0.151	2.58	0.302

Vergleich zweier Labors

Es wurden in den zwei Labors der Forschungsstellen die gleichen Prüfserien parallel durchgeführt. Dabei wurden Sandasphalt-Prüfkörpern mit dem Filler A und B in einer Dosierung von 20/40/60/80% in weggesteuerten Druckversuchen bei +15°C vor/nach Wasserlagerung untersucht. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 27 und 28 zusammengefasst; die Einzelwerte im Anhang aufgeführt. Die Untersuchungsergebnisse werden wie folgt kommentiert:

- In beiden Labors wurde bei einer Fillerdosierung von 20% bzw. 40% die grösste Streuung der Einzelwerte festgestellt. Dies gilt sowohl beim Filler A wie auch beim Filler B.
- Die Differenz zwischen den beiden Labors liegt bei einer Fillerdosierung von 20% am grössten.
- Bei den Prüfkörpern mit einer Fillerdosierung von 80% entstanden Probleme bei der Prüfkörperherstellung. Diese Fillerdosierung liegt zu hoch und kann ausgeschlossen werden.

Bei der Wahl der Fillerdosierung für die weiteren Untersuchungen wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Die Sandasphalt-Prüfkörper sollten einen möglichst hohen Anteil an Filler enthalten.
- Die Volumenzunahme nach Wasserlagerung sollte möglichst gross sein.
- Die Abweichung zwischen den Ergebnissen der beiden Prüflabors sollte möglichst klein sein.

Tabelle 27: Ergebnisse der weggesteuerten Druckversuche bei 15°C an Sandasphaltprüfkörpern mit unterschiedlicher Fillerdosierung; Vergleich der Ergebnisse der beiden Labors

Filler A

Filler-Dosierung	Labor IMP			Labor EMPA		
	Druckfestigkeit N/mm ² vor WL	Druckfestigkeit N/mm ² nach WL	Verhältnis vor / nach	Druckfestigkeit N/mm ² vor WL	Druckfestigkeit N/mm ² nach WL	Verhältnis vor / nach
20%	2.08	2.72	0.76	3.69	2.11	1.75
	2.37	2.93	0.81	3.57	1.49	2.40
	2.01	2.54	0.79	3.82	2.11	1.81
	2.03	2.58	0.79	3.39	1.89	1.79
Mittelwert	2.12	2.69	0.79	3.62	1.90	1.94
StandardAbw	0.17	0.18	0.02	0.18	0.29	0.31
Var.Koeff.	7.90	6.54	2.31	5.05	15.39	15.84
40%	4.54	4.22	1.08	4.88	3.8	1.28
	4.32	4.12	1.05	4.81	3	1.60
	4.27	4.2	1.02	4.33	2.84	1.52
	4.37	4.21	1.04	3.45	3	1.15
Mittelwert	4.38	4.19	1.04	4.37	3.16	1.39
StandardAbw	0.12	0.05	0.02	0.66	0.43	0.21
Var.Koeff.	2.68	1.09	2.35	15.08	13.71	15.11
60%	5.44	5.38	1.01	6.52	5.24	1.24
	5.39	5.66	0.95	6.08	4.31	1.41
	5.97	5.28	1.13			
	5.49	4.79	1.15			
Mittelwert	5.57	5.28	1.06	6.30	4.78	1.33
StandardAbw	0.27	0.36	0.09	0.31	0.66	0.12
Var.Koeff.	4.81	6.87	8.85	4.94	13.77	8.86
80%	6.17	4.83	1.28			
	5.61	4.97	1.13			
	6.28	5.39	1.17			
	5.54	5.26	1.05			
Mittelwert	5.90	5.11	1.16			
StandardAbw	0.38	0.26	0.09			
Var.Koeff.	6.42	5.04	8.07			

Tabelle 28: Ergebnisse der weggesteuerten Druckversuche bei 15°C an Sandasphaltprüfkörpern mit unterschiedlicher Fillerdosierung; Vergleich der Ergebnisse der beiden Labors

Filler B

Filler-Dosierung	Labor IMP			Labor EMPA		
	Druckfestigkeit N/mm2 vor WL	nach WL	Verhältnis vor / nach	Druckfestigkeit N/mm2 vor WL	nach WL	Verhältnis vor / nach
20%	1.95	1.71	1.14	2.99	1.14	2.62
	1.86	1.15	1.62	3.14	1.32	2.38
	1.72	1.27	1.35	3.83	0.97	3.95
	1.79	1.39	1.29	3.11	1.53	2.03
Mittelwert	1.83	1.38	1.35	3.27	1.24	2.75
StandardAbw	0.10	0.24	0.20	0.38	0.24	0.84
Var.Koeff.	5.37	17.45	14.77	11.65	19.39	30.51
40%	3.12	1.53	2.04	3.2	1.43	2.24
	2.57	1.56	1.65	3.57	1.44	2.48
	2.96	1.51	1.96	3.34	1.03	3.24
	3.27	1.68	1.95	3.34	0.85	3.93
Mittelwert	2.98	1.57	1.90	3.36	1.19	2.97
StandardAbw	0.30	0.08	0.17	0.15	0.30	0.77
Var.Koeff.	10.11	4.85	9.07	4.56	24.85	25.86
60%	3.4	1.42	2.39	3.34	1.45	2.30
	3.44	1.44	2.39	3.55	1.6	2.22
	3.44	1.72	2.00			
	2.98	1.64	1.82			
Mittelwert	3.32	1.56	2.15	3.45	1.53	2.26
StandardAbw	0.22	0.15	0.29	0.15	0.11	0.06
Var.Koeff.	6.76	9.53	13.43	4.31	6.96	2.65
80%	2.12	1.19	1.78	3.34	1.45	2.30
	1.99	1.15	1.73	3.55	1.6	2.22
	2.09	1.29	1.62			
	1.94	1.18	1.64			
Mittelwert	2.04	1.20	1.69	3.45	1.53	2.26
StandardAbw	0.08	0.06	0.08	0.15	0.11	0.06
Var.Koeff.	4.14	5.05	4.43	4.31	6.96	2.65

In der untenstehenden Tabelle 29 sind die Ergebnisse der Volumenzunahme nach Wasserlagerung der einzelnen Sandasphaltprüfkörpern aufgeführt. Daraus geht hervor, dass mit einer Fillerdosierung von 60% die grössten Volumenzunahmen festgestellt wurden.

Tabelle 29: Volumenzunahme nach Wasserlagerung (40°C/24h) vor Sandasphalt-Prüfkörpern mit unterschiedlicher Filler-Dosierung

Filler	Fillerdosierung	Volumenzunahme %
A	20%	0.11
	40%	0.24
	60%	0.05
	80%	0.05
B	20%	0.30
	40%	0.98
	60%	1.22
	80%	0.90

Für das weitere Vorgehen wurde beschlossen, eine Fillerdosierung von 60% zu wählen.

Die Unterschiede im Verhältnis der Druckfestigkeit vor/nach Wasserlagerung zwischen den beiden Labors der Prüfstellen sind bei einer Fillerdosierung von 60% beim Filler B relativ klein (EMPA 2,26; IMP 2,15) hingegen beim Filler A zu gross (EMPA 1,33; IMP 1,06).

Beide Labors verwendeten die gleichen Rezepturen jedoch unterschiedliche Labor-Mischer.

Optimierung Mischprozess

Um den Einfluss des Mischprozesses vorerst auszuschliessen, wurden in den weiteren Untersuchungsserie sämtliche Prüfkörper im gleichen Labor (IMP) nach einem definierten Verfahren hergestellt. Dabei wurde der Sandasphalt im Mischer gemäss Anleitung EMPA hergestellt. Da dieser Mischer weniger intensiv rührt, musste die vorgesehene Mischzeit von 30 Minuten auf 90 Minuten erhöht werden, um eine homogene Mischung zu erhalten. Die Einzelwerte der Untersuchungsergebnisse sind in der Tabelle 30 zusammengefasst. Trotz relativ grosser Unterschiede bei der Bestimmung der Bruchkraft, liegen die Verhältnisse der Bruchkräfte vor/nach Wasserlagerung der beiden Labor sehr nahe beieinander (Filler A 1,32 bzw. 1,29; Filler B 1,68 bzw. 1,57).

Der Vergleich zwischen den Labors fällt befriedigend auf, jedoch ist die Differenzierung zwischen den beiden Fillern unbefriedigend.

Es ist denkbar, dass die beim Mischprozess aufgetretene Bindemittelverhärtung die Quellbarkeit der Sandasphalt-Prüfkörper reduziert hat. Der Zutritt des Wassers zum Filler ist in Abhängigkeit der Bindemittelviskosität zu sehen. Da die Wasserlagerung bei +40°C erfolgt, ist eine Reaktion des Fillers mit dem Wasser bei niedrigviskoser Bindemittel eher möglich, als bei hochviskosen Bindemitteln.

Zur Erklärung dieser Frage wurden folgende Schritte eingeleitet:

- Untersuchung der Eigenschaften der rückgewonnenen Bindemitteln verschiedener Aufbereitungsprozesse.
- Bestimmung des Abfalls der Druckfestigkeit nach Wasserlagerung von Sandasphalt-Prüfkörpern die unterschiedlich aufbereitet wurden.
- Die Sandasphalt-Prüfkörper wurden mit dem Filler A bei einer Dosierung von 60% im Labor-Mischer IMP bei 150°C mit einer Mischdauer von 60 Minuten hergestellt sowie durch manuelles Rühren gemäss Anleitung in Pkt. 4.3.

Tabelle 30: Vergleich der Ergebnisse der beiden Labors, Druckversuche vor/nach Wasserlagerung; weggesteuerte Versuche (0,05 mm/sec.) bei 15°C (Fillerdosierung 60%).

Weg [mm]

Filler	MW ohne Wasserlagerung		MW mit Wasserlagerung		Verhältnis	
	EMPA	IMP	EMPA	IMP	EMPA	IMP
A	1.61	1.71	1.95	1.95	0.82	0.88
B	2.04	1.99	2.14	2.09	0.96	0.95

Kraft [kN]

Filler	MW ohne Wasserlagerung		MW mit Wasserlagerung		Verhältnis	
	EMPA	IMP	EMPA	IMP	EMPA	IMP
A	5.82	7.61	4.42	5.9	1.32	1.29
B	5.65	5.14	3.37	3.28	1.68	1.57

Die Ergebnisse der Bindemittleigenschaften sind in der Tabelle 31 zusammengefasst. Bei einem Ausgangsbitumen B80/100 müssen die Veränderungen der Bindemittleigenschaften im Labor-Mischer als dramatisch bezeichnet werden. Der verwendete Labor-Mischer muss als ungeeignet bezeichnet werden. Die Veränderungen der Bindemittleigenschaften bei der manuellen Herstellung der Sandasphalt-Prüfkörper entspricht etwa den zu erwartenden Veränderungen um eine Penetrationsstufe.

Tabelle 31: Veränderung der Bindemittel-Eigenschaften der Sandasphalt-Prüfkörper infolge unterschiedlicher Mischprozesse

		Rückgewonnenes Bindemittel	
		EP RuK °C	Pen 1/10 mm
Labor-Mischer	190°C / 90 Min.	83.8	19
Labor-Mischer	150°C / 60 Min.	77.7	24
Mischung von Hand 150°C		53	61

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sind in der Tabelle 32 aufgeführt. Trotz grossem Einfluss des Mischprozesses auf die Bindemittleigenschaften wirken sich diese Veränderungen im Abfall der Druckfestigkeit nicht markant aus. Bei den im Mischer hergestellten Prüfkörpern kann eine geringere Druckfestigkeitsabnahme nach Wasserlagerung festgestellt werden (Verhältnis 1.14). Auch die Volumenzunahme nach Wasserlagerung fällt bei den Prüfkörpern mit härteren Bindemittleigenschaften geringer aus, als bei den Prüfkörpern mit weicheren Bindemitteln (0,77 gegenüber 0,97 Vol.-%).

Tabelle 32: Vergleich der Druckversuche (weggesteuert mit Vorschubgeschwindigkeit 0.05 mm/sec; 15°C) an Sandasphalt-Prüfkörper welche manuell gemischt wurden mit Sandasphalt-Prüfkörper welche im Mischer gemischt wurden (Filler A;60%).

Bem.	P. Nr.	Weg				MW ohne:MW mit Wasserlagerung		Kraft				MW ohne:MW mit Wasserlagerung		Rohdichte				MW ohne:MW mit Wasserlagerung		Δ Vol.-% mit Wasserlagerung		
		ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		EW	MW	Verhältnis	EW	MW	EW	MW	Verhältnis	ohne Wasserlagerung		mit Wasserlagerung		EW	MW	Verhältnis	EW	MW
		mm	mm	mm	mm									kN	kN	kN	kN					
Hand 150°C	H1			--																		
	H2			3.14																		
	H3			3.65																		
	H4			3.57	3.45																	
	H5	3.07																				
	H6	3.14																				
	H7	3.01																				
	H8	3.13	3.09																			
Mischer 150°C	M1			1.50																		
	M2			1.53																		
	M3			1.77																		
	M4			1.56	1.59																	
	M5	1.48																				
	M6	1.49																				
	M7	1.53																				
	M8	1.43	1.48																			

Vergleich Druckfestigkeitsabfall-Volumenzunahme

Der Vergleich der Ergebnisse beim Druckfestigkeitsabfall nach Wasserlagerung mit der Volumenzunahme wurde beim Filler A sowie einem Filler E durchgeführt. Bei diesem Filler E handelt es sich um einen quellfähigen Eigenfiller. Die Einzelwerte der Untersuchungen sind in der Tabelle 33 zusammengefasst. Diese Versuchsreihe lässt folgende Schlüsse zu:

- Sowohl beim weg- wie auch beim kraftgesteuerten Versuch ist die Differenzierung zwischen den beiden Fillern unbefriedigend.
- Die Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels liegen im zu erwartenden Rahmen.
- Die zweimalige Durchführung der Volumenzunahme nach Wasserlagerung (je 4 Prüfkörper) zeigt sehr befriedigende Ergebnisse. Die Differenzierung zwischen den beiden Fillern ist deutlich. Zudem ist die Wiederholbarkeit sehr gut, wurden doch in den zwei Versuchsreihen sehr ähnliche Werte festgestellt (Filler A 0,23 bzw. 0,19; Filler E 1,58 bzw. 1,56 Vol.-%).

Tabelle 33: Vergleich der Volumenzunahme nach Wasserlagerung mit dem Abfall der Bruchkraft und des Bruchweges beider Druckfestigkeitsprüfung

Filler Art	kraftgesteuerter Versuch			weggesteuerter Versuch			Eigenschaften des rückgew. Bindem.	
	Verhältnis vor/nach Wasserlagerung		Volumen-Zunahme [%]	Verhältnis vor/nach Wasserlagerung		Volumen-Zunahme [%]	Pen. [1/10 mm.]	EP RuK [°C]
	Weg	Kraft		Weg	Kraft			
A	1.05	1.28	0.23	0.98	0.77	0.19	64	50.9
E	0.72	1.14	1.58	1.3	0.78	1.56	74	47

Trotz hohem Aufwand in der Optimierung sowohl der Versuchsdurchführung als auch der Prüfkörperherstellung sind die Ergebnisse bei der Druckfestigkeitsabnahme infolge Wasserlagerung unbefriedigend. Die durchgeführten Versuche zeigen die bekannten Unterschiede in den Fillern zuwenig auf. Bereits in einer früheren Arbeit ([2]; Seite 98) wurde aufgezeigt, dass Druckversuche an reinen Fillerprüfkörpern die Wasserempfindlichkeit des Fillers zuwenig ansprechen. Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen nun auf, dass auch Sandasphalt-Prüfkörper die Wasserempfindlichkeit von Fillern zuwenig ansprechen.

5.4 Spaltzugversuche

5.4.1 Grundsätzliches

Nachdem mit den monoaxialen Zugversuchen sowie den Druckversuchen das angestrebte Ziel nicht erreicht werden konnte, wurde der Spaltzugversuch in die Untersuchungen eingeschlossen.

Um strukturelle Veränderungen innerhalb des Prüfkörpers infolge der Wasserempfindlichkeit des Fillers nach Wasserlagerung anzusprechen, sind Zugversuche generell besser als Druckversuche. Bei den monoaxialen Zugversuchen war der Einfluss der Querrisse derart gross, dass die Versuche nicht mehr durchgeführt werden konnten. Dieser Einfluss wird bei den Spaltzugversuchen als kleiner erwartet, da die Zugbeanspruchung nicht senkrecht zu den Rissen verläuft. Zudem ist der Querschnitt der Beanspruchung beim Spaltzugversuch wesentlich grösser; ein einzelner Querriss sollte das Untersuchungsergebnis weniger beeinflussen.

Als Versuchsbedingung wurde diejenige Vorschubsgeschwindigkeit festgelegt, welche beim Marshallversuch angewendet wird; das heisst 50,8 mm/Min.

Eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung von Spaltzugversuche besteht darin, dass der Prüfkörper relativ spröde sein sollte. Der Prüfkörper sollte kein plastisches Verhalten aufweisen. Aus diesem Grunde wurden erste Vorversuche bei Temperaturen von -10°C und $+15^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Diese Versuchsreihe hat ergeben, dass sich im wassergesättigten Prüfkörper nach Wasserlagerung beim temperieren auf -10°C Eislinsen gebildet haben. Durch dieses Eis wurden die Prüfkörper bereits vor der Prüfung zerstört. Die Sandasphaltprüfkörper mit einem Hohlraumgehalt von ca. 25 Vol.-% haben offenbar ein Porengefüge, in welchem sich Eislinsen bilden können.

Spaltzugversuche an Sandasphalt-Prüfkörpern nach Wasserlagerung sind bei Temperaturen $>0^{\circ}\text{C}$ durchzuführen.

5.4.2 Durchgeführte Versuche

Unterschiedliche Fillerdosierung

Mit den Filler A und B wurden Sandasphaltprüfkörper mit einer Fillerdosierung von 20, 30 und 40 Masse-% hergestellt. Die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeiten bei +5°C und +15°C sind in der Tabelle 34 aufgeführt.

Tabelle 34: Spaltzugversuche bei +5°C und +15°C an Sandasphalt-Prüfkörper mit unterschiedlicher Fillerdosierung

Spaltzugversuche bei +5°C					
Filler	Dosierung	Hohlraum-Gehalt Vol.-%	Spaltzugfestigkeit N/mm2		
			vor WL	nach WL	vor/nach
A	20	25	0.93	0.34	2.74
	30	21.8	0.78	0.52	1.50
	40	18.6	0.81	0.39	2.08
B	20	25.9	0.82	0.35	2.34
	30	22.1	0.78	0.24	3.25
	40	22	0.73	0.32	2.28
Spaltzugversuche bei +15°C					
Filler	Dosierung	Hohlraum-Gehalt Vol.-%	Spaltzugfestigkeit N/mm2		
			vor WL	nach WL	vor/nach
A	20	24.6	0.55	0.27	2.04
	30	22	0.47	0.31	1.52
	40	18.5	0.49	0.26	1.88
B	20	24.3	0.43	0.19	2.26
	30	23.5	0.38	0.16	2.38
	40	21.6	0.32	0.22	1.45

WL: Wasserlagerung

Die Hohlraumgehalte der Sandasphaltprüfkörper liegen mit Ausnahme der Mischung Filler A mit 40 Masse-% oberhalb von 20 Vol.-%.

Die unterschiedlichen Filler-Rezepturen mit Fillergehalten von 20/30/40 Masse-% bringen nicht den erwünschten Erfolg. Die Differenz zwischen den beiden Fillern A und B ist unbefriedigend; insbesondere kann bei den Mischungen mit einem höheren Fillergehalt keine bessere Differenzierung festgestellt werden.

Beim Spaltzugversuch wurde eine sehr grosse Streuung festgestellt. Diese Streuung ist bei den Versuchen mit +5°C grösser als bei der Prüftemperatur von +15°C.

Der mittlere Varianzkoeffizient der Versuche beträgt bei +5°C 0.66; bei +15°C 0.22.

Einfluss des Prüffehlers bei der Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach Rigden auf die Spaltzugfestigkeit

Die Zusammensetzung des Sandasphalt-Prüfkörper wurde derart gewählt, dass eine effektive Volumenkonzentration des Bitumen im Filler von 1,16 entsteht. Bei der Berechnung des Bindemittelgehaltes spielt der Hohlraumgehalt nach Rigden eine massgebende Rolle. In den Labors der Forschungsstellen wurde daher der Hohlraumgehalt Rigden der Filler A und Filler E bestimmt. In der Tabelle 35 sind die Ergebnisse sowie die Differenzen aufgeführt.

Tabelle 35: Vergleich der Bestimmungen des Hohlraumgehaltes nach Ridgen durch die beiden Labors der Forschungsstellen

Filler	Hohlraumgehalt Rigden Vol.-%		
	Labor 1	Labor 2	Differenz
A	33	32.6	0.4
E	39	35.6	3.4

Gemäss europäischer Vornorm prEN [15] beträgt die Vergleichbarkeit zwischen 2 Labor maximal 5 Vol.-%. Die festgestellten Unterschiede (sogar beim Filler E mit 3,4 Vol.-%) liegen innerhalb der zulässigen Prüffehler-Toleranz zwischen zwei Labors. Aufgrund der Hohlraumgehalte nach Rigden wurden Sandasphalt-Prüfkörper mit unterschiedlicher Bindemitteldosierung hergestellt (siehe Tabelle 36).

Tabelle 36: Einfluss des Hohlraumgehaltes nach Rigden auf die Bindemittelgehalte der Sandasphaltprüfkörper bei einer effektiven Volumenkonzentration von $c_{eff} = 1.16$

Filler	Hohlraumgehalt Rigden	Bindemitteldosierung
	Vol.- %	Masse.-%
A	33	6.4
	32	5.6
E	39	8.4
	35.6	7

Der Einfluss des Hohlraumgehaltes nach Rigden auf das Verhältnis der Bruchkraft vor/nach Wasserlagerung ist klein (siehe Tabelle 37). Die Unterschiede scheinen eher zufällig; beim Filler A mit höherer Bindemitteldosierung ist der Abfall der Spaltzugfestigkeit grösser (Verhältnis 1,52) als beim Filler A mit einem tieferen Bindemittelgehalt (Verhältnis 1,23).

Beim Filler E kann das Gegenteil festgestellt werden.

Bei der Mischung mit mehr Bindemitteln wird ein kleiner Abfall der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung festgestellt.

Die Spaltzugfestigkeit zeigt keine grossen Unterschiede zwischen den beiden Fillern.

Tabelle 37: Spaltzugversuche bei (15°C) an Sandasphaltprüfkörpern vor/nach Wasserlagerung; Einfluss der Variation des Hohlraumgehaltes Ridgen auf die Bindemitteldosierung bei einer effektiven Volumenkonzentration $c_{eff} = 1.16$; Vergleich mit der Volumenzunahme

Filler	HR Ridgen Vol.-%	Bitumen Dosierung Masse-%	Kraft			Volumenzunahme [Vol.-%]
			mit WL [kN]	ohne WL [kN]	Verhältnis	
A	33	6.4	3.85	5.85	1.52	0.39
A	32	5.6	4.15	5.09	1.23	0.30
E	39	8.4	5.67	7.02	1.24	2.52
E	35.6	7.0	3.52	5.09	1.45	1.97

WL: Wasserlagerung

Die Volumenzunahme nach Wasserlagerung hingegen zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Fillern A und E. Der Einfluss des Hohlraumgehaltes nach Ridgen auf die Volumenzunahmen nach Wasserlagerung ist vor allem beim Filler E mit 0,55 Vol.-% relativ gross.

Um den Vergleich der Spaltzugfestigkeit mit der Volumenzunahme nach Wasserlagerung über einen grösseren Bereich der Wasserempfindlichkeit der Filler durchführen zu können, wurden zwei Filler (Filler A und Filler E) ausgewählt. Diese Filler wurden zusätzlich mit CaO angereichert, um eine grössere Spanne der Werte der Volumenzunahme zu erhalten.

Zur Berechnung der Bindemittelgehalte der Sandasphaltprüfkörper wurde der Hohlraumgehalt Ridgen an den Mischungen Fillern plus CaO bestimmt. Es zeigte sich dabei, dass die Dosierung von bis zu maximal 4 Masse-% an CaO den Hohlraumgehalt nach Ridgen nicht beeinflusst.

Die CaO-Gehalte der verwendeten Filler wurden gemessen, um den gesamten Gehalt an CaO in der Mischung (Filler + CaO) festzustellen. Im folgenden wird nur noch der Gesamtgehalt an CaO erwähnt (bereits im Filler vorhandenes CaO plus zudosiertes CaO). Die Ergebnisse der durchgeführten Spaltzugfestigkeiten bei +15°C sowie der Volumenzunahme nach Wasserlagerung sind in der Tabelle 38 aufgeführt.

Tabelle 38: Spaltzugversuche bei +15°C vor und nach Wasserlagerung sowie Bestimmung der Volumenzunahme in Funktion des CaO-Gehaltes

Filler	Gesamter CaO-Gehalt Masse-%	Verhältnis der Spaltzugfestigkeit vor/nach Wasserlagerung	Volumenzunahme nach Wasserlagerung Vol.-%
A	0.18	1.23	
	0.48	0.92	0.33
	0.78	0.92	0.52
	1.68	0.92	3.4
	2.68	1.25	7.25
	4.18	2.24	13.7
E	1.59	1.24	1.87
	2.70	0.88	6.59
	4.20	0.72	10.12

Eine eindeutige Abhängigkeit der Volumenzunahme von Gehalt an CaO ist feststellbar.

Die Spaltzugfestigkeit liefert eine sehr schlechte Aussagekraft bezüglich der Wasserempfindlichkeit des Fillers. Selbst bei einer um Faktor 30 grösseren Volumenzunahme zeigt das Verhältnis der Spaltzugfestigkeit vor/nach Wasserlagerung beim Filler A eine Veränderung um 220% (Faktor 2,24).

Beim Filler E nimmt das Verhältnis der Spaltzugfestigkeit vor/nach Wasserlagerung mit zunehmendem CaO-Gehalt sogar ab und liegt unter 1. Dies bedeutet, dass die Spaltzugfestigkeit nach der Wasserlagerung grösser ist als vor der Wasserlagerung. Offenbar werden die Schädigungen infolge Wasserlagerung durch Verfestigungen überlagert. Es ist wohl denkbar, dass das freie CaO Wasser binden konnte und damit als hydraulisch gebundenes Bindemittel zu einer Verfestigung führte.

Da in vielen Eigenfiller CaO-Gehalte in der Grössenordnung von 0,5 bis 2 Masse-% gemessen werden, ist ein Prüfverfahren gefragt, in welchem der Einfluss des CaO aufgezeigt wird. Die geringfügige Zunahme der Spaltzugfestigkeit (beim Filler E) wird in der Praxis durch die massive Volumenzunahme mehr als wettgemacht.

Die durchgeführten Untersuchungen führen zum Schluss, dass auch die Spaltzugfestigkeit zur Beurteilung der Wasserempfindlichkeit von Fillern ungeeignet ist.

5.5 Volumenzunahme

5.5.1 Grundsätzliches

Neben den durchgeführten mechanischen Versuche wie monoaxiale Zugversuche, Druckversuche und Spaltzugversuche wurde auch die Bestimmung der Volumenzunahme nach Wasserlagerung als Prüfverfahren verfolgt. Die Bestimmung der Volumenzunahme nach Wasserlagerung ist ein Prüfverfahren das bereits – gestützt auf der geltenden Norm SN 670 845 – in vielen Labors eingeführt ist.

Als negativ wurde in der jetzigen Norm neben der Prüfkörperherstellung auch die lange Lagerungsdauer von 28 Tage bewertet.

5.5.2 Durchgeführte Versuche

Vorversuche

An Fillerprüfkörpern gemäss Norm SN 670 845 wurde die Volumenzunahme nach verschiedenen Wasserlagerungen bestimmt:

- 20°C/28 Tage (entsprechend geltender Norm SN 670 845)
- 40°C/ 1 Tag
- 40°C/ 2 Tage
- 40°C/ 3 Tage
- 40°C/ 4 Tage

Die Ergebnisse dieser Vorversuche sind in der Tabelle 39 aufgeführt. Es wurden insgesamt 11 verschiedene Filler aus der Praxis untersucht. In der Tabelle 40 ist die lineare Korrelation der Wasserlagerungen aufgeführt. Dabei wurde als Wertepaar jeweils die Normprüfung mit einer Prüfung bei 40°C festgelegt. Die lineare Korrelation der 11 Wertepaare "20°C; 28 Tage/40°C; 1 Tag" ist sehr befriedigend (Korrelationskoeffizient 0,90). Es fällt auf, dass mit zunehmender Lagerungsdauer bei 40°C der Koeffizient abnimmt.

Tabelle 39: Volumenzunahme von Fillerprüfkörpern gemäss Norm SN 670 845 bei Wassertemperaturen von 20°C und 40°C und verschiedenen Lagerungszeiten

Filler	Volumenzunahme nach Wasserlagerung					
	20°C/28 Tage	nach dem Fluten	40°C/1Tag	40°C/2Tage	40°C/3Tage	40°C/4Tage
A90-0459	0.91	0.45	1.22	1.46	1.36	1.8
A90-0459	0.85	0.98	1.22	1.66	1.45	1.1
A90-0474	0.58	0.31	0.15	0.27	0.26	0.34
A90-0475	1.18	0.36	0.57	0.64	0.67	0.74
A90-0477	4.98	0.58	6.27	6.82	6.66	6.66
A90-0482	0.42	0.35	0.35	0.36	0.4	0.51
A90-0483	0.58	0.31	0.56	0.67	0.69	0.69
A90-0528	2.33	0.44	0.86	0.81	0.83	0.88
A90-0597	1.15	0.86	1.33	1.53	1.38	1.69
A90-0623	2.21	0.42	1.7	2.22	2.37	2.35
A90-0662	1.66	0.75	2.81	3.42	4.08	3.95

Tabelle 40: Lineare Korrelation zwischen den verschiedenen Wasserlagerungen Anzahl Wertepaare 11

Wertepaare	Korrelationskoeffizient
20°C; 28Tage / ohne Lagerung; nach dem Fluten	0.11
20°C; 28Tage / 40°C; 1 Tag	0.90
20°C; 28Tage / 40°C; 2 Tage	0.88
20°C; 28Tage / 40°C; 3 Tage	0.86
20°C; 28Tage / 40°C; 4 Tage	0.86

In einer Versuchsserie mit stark quellfähigem Filler wurde festgestellt, dass die Prüfkörper bei 40°C nach 3 Tagen Lagerung auseinanderfielen; die Volumenzunahme war nicht mehr messbar. Ebenfalls wurde festgestellt, dass bei einer Lagerungsdauer von 60°C die Prüfkörper stark quellfähiger Filler bereits nach 24 Stunden zerstört waren.

Nach 1 Tag wurde bereits 82% der Volumenzunahme nach 4 Tagen erreicht.

Aufgrund dieser Versuchsreihe wurde die Lagerung von 40°C/24 Stunden als optimal beurteilt.

Optimierung der Prüfkörperherstellung

In der Tabelle 41 sind die Ergebnisse der wiederholten Durchführung der Volumenzunahme von Fillerprüfkörpern und von Sandasphaltprüfkörpern aufgeführt. Die Sandasphalt-Prüfkörper wurden mit folgender Zusammensetzung hergestellt:

- Filler	20%
- Quarzsand 0,08 - 0,2 mm	55%
- Quarzsand 0,1 - 0,5 mm	25%

Tabelle 552.3 Wiederholbarkeit der Volumenzunahme von Fillerprüfkörpern (SN 670 845) und Sandasphaltprüfkörpern mit Fein- und Grobquarzsand und einer Fillerdosierung von 20 Masse-%

Tabelle 41: Wiederholte Durchführung der Volumenzunahme nach Wasserlagerung (40°C/24 Std.)

Filler	Prüfkörper	Mittelwert	StdAbw	VarianzKoeff	Max	Min	Anzahl PK
A	FillerPK	0.31	0.18	58.1	0.6	0.1	16
	SandasphaltPK	0.35	0.14	40	0.7	0.2	16
B	FillerPK	*	*	*	*	*	16
	SandasphaltPK	1.33	0.86	64.7	3.4	0.6	16

* Filler PK nach Wasserlagerung gerissen und schwammig

Bei beiden Fillern A und B ist die Wiederholbarkeit sowohl bei den Fillern-Prüfkörpern als bei den Sandasphalt-Prüfkörpern völlig unbefriedigend (siehe Tabelle 41).

Um die Wiederholbarkeit zu verbessern, wurde die Dosierung am Filler im Sandasphaltprüfkörper erhöht. Es wurden Sandasphalt-Prüfkörpern mit einer Fillerdosierung von 20, 30 und 40 Masse-% hergestellt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 42 aufgeführt. Es wurden bis zu 4 Serien à je 4 Prüfkörper geprüft. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Serien sind zu gross. Die Wiederholbarkeit der Volumenzunahme an diesen Prüfkörpern wird ebenfalls als unbefriedigend betrachtet.

Tabelle 42: Wiederholbarkeit der Volumenzunahme nach Wasserlagerung bei Sandasphalt-Prüfkörpern mit unterschiedlicher Fillerdosierung (Sandasphalt-Prüfkörper mit Fein- und Grobquarzsand)

Filler	Filler - Dosierung	Volumenzunahme			
		Mittelwert 1. Serie	Mittelwert 2. Serie	Mittelwert 3. Serie	Mittelwert 4. Serie
A	20%	0.29	0.22	0.36	0.03
	30%	0.08	0.03		
	40%	0.36	0.08		
B	20%	2.26	1.53	0.89	0.75
	30%	1.56	1.02		
	40%	0.46	0.56		

Zur Verbesserung der Aussagekraft wurde die Zusammensetzung der Sandasphalt-Prüfkörper geändert. Durch Weglassen des Feinquarzsandes 0,08 - 0,2 mm und einer Erhöhung der Fillerdosierung auf 60% wurden Prüfkörpern mit befriedigender Wiederholbarkeit der Volumenzunahme erstellt.

In der Tabelle 43 sind die Ergebnisse der Volumenzunahme zweier Serien beim Filler A und B. Die Wiederholbarkeit ist bei beiden Fillern als befriedigend zu beurteilen, liegen doch die zwei Werte nahe beieinander (Filler A 0,19 bzw. 0,23 Vol.-%; Filler B 1,56 bzw. 1,58 Vol.-%).

Tabelle 43: Wiederholte Durchführung der Volumenzunahme nach Wasserlagerung 40°C/24Std.(Sandasphalt-Prüfkörper ohne Feinquarzsand)

Filler	Filler - Dosierung	Volumenzunahme		
		Mittelwert 1. Serie	Mittelwert 2. Serie	Mittelwert 3. Serie
A	60%	0.19	0.23	0,23
B	60%	1.56	1.58	-

Im Zuge der Optimierung des Mischverfahrens konnte der Einfluss der Bindemittelwerte auf die Volumenzunahme beobachtet werden. In der Tabelle 44 sind die Ergebnisse der Volumenzunahme nach Wasserlagerung denjenigen der Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels gegenübergestellt. Der erstaunlich geringe Einfluss der Bindemittelseigenschaften auf die Volumenzunahme ist vorsichtig zu interpretieren. Eventuell überlagern sich bei diesem Beispiel andere Einflüsse wie beispielsweise die Homogenität der Mischung.

Tabelle 44: Einfluss der Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels auf die Volumenzunahme nach Wasserlagerung

Filler	Mischverfahren	Eigenschaften des rückgew. Bindemittels		Volumenzunahme nach Wasserlagerung Vol.-%
		Pen. 1/10 mm	EP RuK °C	
A	Mischer	24	77.7	0.77
A	Hand	61	53	0.97

Einfluss der Prüffehler-Toleranz bei der Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach Rigden

Der Bindemittelgehalt der Sandasphaltprüfkörper wird aufgrund des Bindemittelbedarfes des geprüften Fillers berechnet. Dieser wird aus dem Hohlraumgehalt nach Rigden abgeleitet. Im folgenden wird der Einfluss der möglichen Unterschiede bei der Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach Rigden auf die Volumenzunahme untersucht. Die Hohlraumgehalte nach Rigden wurden in den zwei Labors der Forschungsstellen bestimmt (siehe Tabelle 45). Die festgestellten Unterschiede in Hohlraumgehalten nach Rigden liegen innerhalb der Wiederholbarkeiten dieser Prüfmethode gemäss prEN (siehe auch Pkt. 5.4.2).

Der Einfluss der Unterschiede bei der Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach Ridgen ist unklar. Beim Filler B weist die Sandasphaltemischung mit einem höheren Bindemittelgehalt eine grössere Volumenzunahme auf. Eigentlich wäre zu erwarten gewesen, dass die Volumenzunahme mit steigendem Bindemittelgehalt abnimmt.

Es kann festgehalten werden, dass die Prüfmethode immer noch genügend zwischen den Filler A und B differenziert (auch unter Berücksichtigung der Prüffehler bei der Bestimmung des Hohlraumgehaltes Ridgen).

Tabelle 45: Einfluss der Prüffehler-Toleranz bei der Bestimmung des HR Ridgen auf die Volumenzunahme

Filler	Filler Dosierung Masse-%	Bindemittel Gehalt Masse-%	Hohlraumgehalt Ridgen Vol.-%	Volumen- Zunahme Vol.-%
A	60	6.4	33	0.39
	60	5.6	32	0.3
B	60	8.4	39	2.52
	60	7	35.6	1.97

In der Tabelle 552.8 sind die Ergebnisse der Volumenzunahme nach Wasserlagerung den Gehalten an CaO der Filler gegenübergestellt. Analog wie bei der Untersuchung der Spaltzugversuche (Pkt. 5.4.2) wurde dem Filler CaO zudosiert. In der Tabelle 46 wird der gesamte CaO-Gehalt aufgeführt; das heisst der bereits im Filler vorhandene CaO-Gehalt plus den zudosierten CaO-Gehalt. Wie auch aus der Abbildung 16 ersichtlich ist, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Gehalt an CaO sowie der Volumenzunahme nach Wasserlagerung. Der Korrelations-Koeffizient beträgt 0,92.

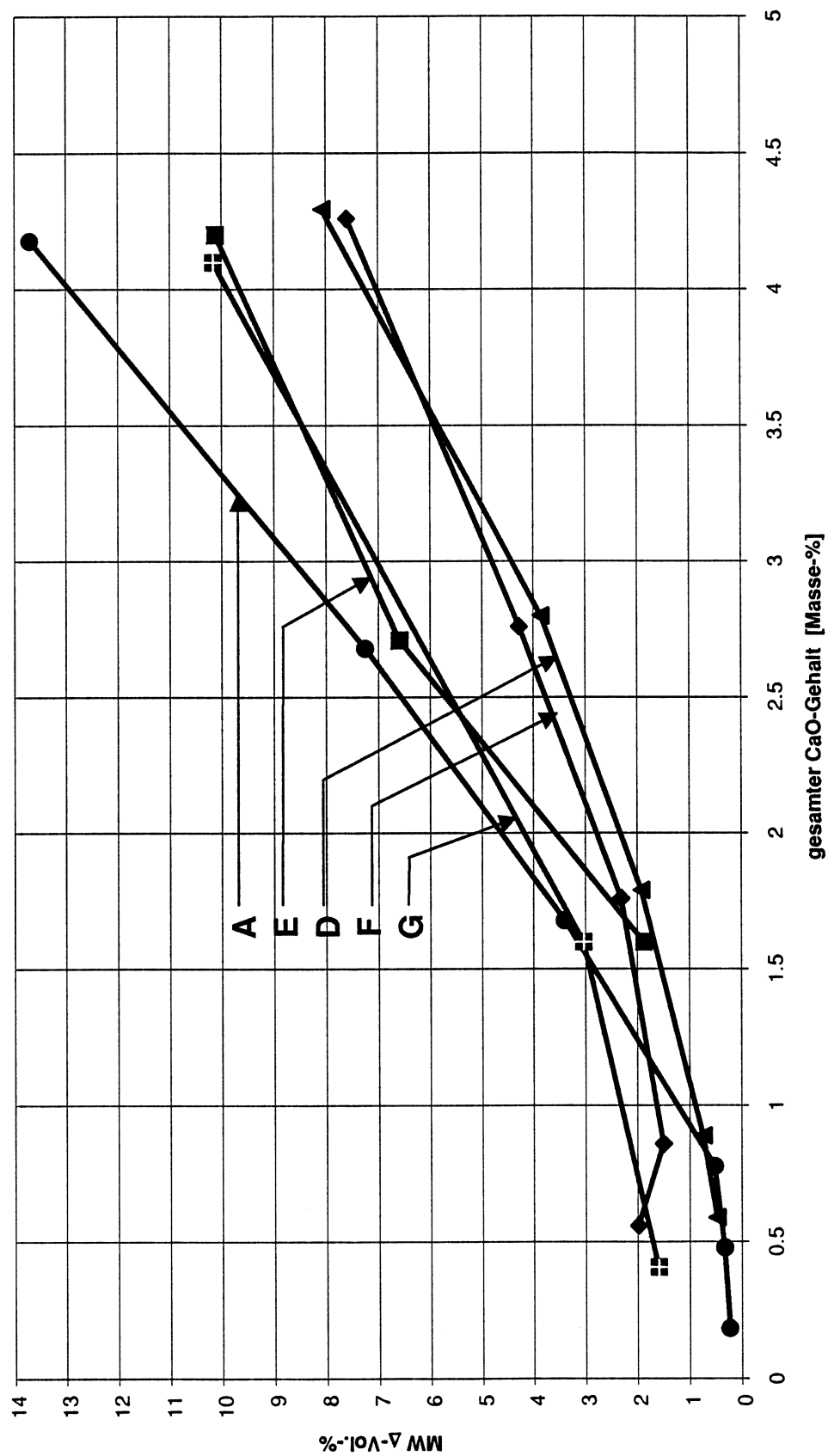
An dieser Stelle ist zu bemerken, dass es falsch wäre, die Volumenzunahme nach Wasserlagerung durch die Bestimmung des CaO-Gehaltes zu ersetzen. In früheren Forschungsarbeiten wurde nachgewiesen, dass auch zwischen dem Gehalt an Ton-Mineralien und der Volumenzunahme nach Wasserlagerung eine ausgezeichnete Korrelation besteht.

Tabelle 46: Zusammenhang zwischen CaO-Gehalt verschiedener Filler und deren Volumenzunahme nach Wasserlagerung

Filler	gesamter CaO-Gehalt	Volumenzunahme nach Wasserlagerung
	Masse-%	Vol.-%
A	0.18	0.23
	0.48	0.33
	0.78	0.52
	1.68	3.4
	2.68	7.25
	4.18	13.7
E	1.59	1.87
	2.70	6.59
	4.20	10.12
D	0.59	0.48
	0.89	0.74
	1.79	1.92
	2.79	3.86
	4.29	8.08
F	0.56	1.98
	0.86	1.5
	1.76	2.31
	2.76	4.28
	4.26	7.6
G	0.4	1.6
	1.6	3.04
	4.1	10.16

Korrelationskoeffizient zwischen Gehalt an CaO und Volumenzunahme : 0.92

Abbildung 16:



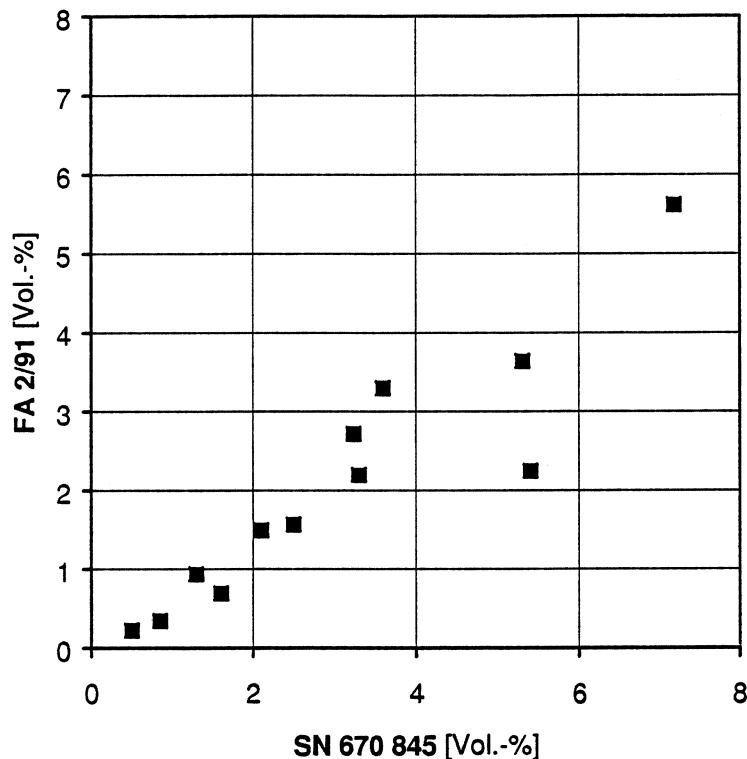
5.5.3 Vergleich mit dem normierten Prüfverfahren

Das neue Verfahren zur Bestimmung der Volumenzunahme an Sandasphalt-Prüfkörpern wurde an einigen ausgewählten Fillern mit dem bisherigen Verfahren der Norm SN 670 845 verglichen:

Tabelle 47: Vergleich der beiden Prüfverfahren für die Bestimmung der Volumenzunahme nach Wasserlagerung; Verfahren gemäss SN 670 845 und Verfahren des Forschungsauftrages.

Filler	Volumenzunahme nach Wasserlagerung	
	Verfahren SN 670 845	Verfahren FA 2/91
A	0.5	0.23
B	5.4	2.25
B2	3.3	2.2
E	2.5	1.57
F	2.1	1.5
G	3.6	3.3
A98-0012	1.6	0.7
A98-0060	1.3	0.94
A98-0177	7.18	5.62
A98-0178	5.3	3.64
A98-0179	3.24	2.72
A98-0246	0.85	0.35

Abbildung 17: Gegenüberstellung des neuen Verfahrens
(FA 2/91) mit dem bisherigen, normierten Verfahren



Aus dem Vergleich beider Prüfverfahren bei 12 verschiedenen Fillern, lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Anzahl von 12 Wertepaaren bildet zwar eine schmale Basis für statische Auswertungen, es lassen sich jedoch trotzdem Trends erkennen.
- Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,93 (ohne den Ausreisser Filler B sogar 0,98).
- Aus den Wertepaaren lässt sich folgende provisorische Formel zur Umrechnung der Ergebnisse ableiten (ohne Wertepaar Filler B berechnet):

$$\Delta\text{Vol SN-Verfahren} = 0,4 + 1,2 * \Delta\text{Vol FA 2/91-Verfahren}$$

6. Folgerungen

6.1 Art und Rezeptur der Prüfkörper

Bedeutung der Prüfkorpereigenschaften

Die Eigenschaften der Prüfkörper (Hohlraumgehalt, Homogenität) werden durch den Herstellungsvorgang stark beeinflusst und haben einen wesentlichen Einfluss auf die Reaktion mit Wasser. Somit sind die möglichen Zielgrössen zur Bestimmung der Wasserempfindlichkeit der Filler (Volumenänderung, mechanische Kenngrössen) ebenfalls von der Herstellung abhängig.

Vergleich der Eigenschaften von Sandasphalt- und Fillerprüfkörper

Es konnten in den beiden Laboratorien Sandasphaltprüfkörper mit gut vergleichbaren und wiederholbaren Eigenschaften hergestellt werden. Fillerprüfkörper weisen in jeder Hinsicht weniger gut definierte Eigenschaften auf (deutliche Unterschiede zwischen den beiden Labors, stärkere Schwankungen zwischen und innerhalb von Serien, etwas ausgeprägtere Inhomogenität).

Erreichen der Zielvorgabe für den Hohlraumgehalt

Mit verschiedenen Fillern konnte bei den Sandasphaltprüfkörpern die Zielvorgabe von 25 Vol.-% Hohlraumgehalt unter Anwendung der gleichen Herstellungsvorschrift erreicht werden. Bei Fillerprüfkörpern ist das nicht möglich, die erhaltenen Werte schwanken von 20 bis 30 Vol.-%. Das ist der **Hauptgrund** für die Wahl der Sandasphaltprüfkörper.

Differenzierungsvermögen der Sandasphaltprüfkörper

Sandasphaltprüfkörper mit 60% Fillergehalt weisen die beste Differenzierung zwischen ausgewählten Fillern aus.

Reproduzierbarkeit von Sandasphaltprüfkörpern

Sandasphaltprüfkörper mit 20, 30 und 40% Fillergehalt weisen eine deutlich schlechtere Reproduzierbarkeit auf als solche mit 60%. Sandasphaltprüfkörper ohne Feinsandanteil weisen eine bessere Reproduzierbarkeit auf. Bei Sandasphaltprüfkörpern mit einem Filleranteil >60% traten Schwierigkeiten beim maschinellen Mischen auf.

6.2 Methoden

Homogenitätsuntersuchungen

Werden am zweckmässigsten mittels Tauchwägung durchgeführt. Ultraschall und Röntgentomografie lieferten keine hinreichend aussagekräftigen Resultate.

Rollabrieb

Wenig stabile Prüfkörper produzieren frühzeitig Abrieb, der die Polierfähigkeit des Quarzsandes negativ beeinflusst. Am Ende differiert die Prüfung zu wenig.

Monoaxiale Zugversuche

Die Resultate vor und nach Wasserlagerung streuen erheblich. Die zu bildende Verhältniszahl weist dementsprechend starke Schwankungen auf, die keine sichere Differenzierung zwischen einem guten und schlechten Filler erlaubt.

Monoaxiale Druckversuche

Die Druckversuche an Sandasphaltprüfkörpern zeigen die bekannten Unterschiede zwischen den Fillern zu wenig auf. Das bestätigt die Resultate einer früheren Arbeit, bei der allerdings ausschliesslich mit Fillerprüfkörpern gearbeitet wurde.

Spaltzugversuch

Die Spaltzugversuche an Sandasphaltprüfkörpern zeigen wie bei den Druckversuchen die Unterschiede zwischen verschiedenen Fillern zu wenig auf. Das gilt sowohl für Prüftemperaturen von 5 °C wie auch von 15 °C.

Volumenänderung

Die Bestimmung der Volumenänderung lässt sich auch an Sandasphaltprüfkörpern problemlos durchführen. Es besteht eine ausreichende Korrelation zwischen den Werten mit der Volumenänderung nach 28 Tagen.

6.3 Ergebnisse, Verfahren

Verfahrensdauer

Die Verfahrensdauer konnte von 30 auf 3 Tage reduziert werden. Diese 3 Tage umfassen die ganze Abwicklung der Prüfung von Beginn der Arbeiten bis Berichterstellung. Damit rückt die Verfahrensdauer in den Bereich anderer Prüfungen im Strassenbau und kann als den Erfordernissen der Praxis angemessen bezeichnet werden. Ein Hauptziel der Forschung ist damit erreicht.

Prüfkörperherstellung

Die Prüfkörperherstellung konnte klar verbessert werden. Der Hohlraumgehalt der Prüfkörper hängt nur noch unwesentlich von den Fillereigenschaften ab, was für die nach Norm [10] hergestellten Fillerprüfkörper nicht gilt. Die erreichbare Homogenität kann als zufriedenstellend bezeichnet werden. Damit ist das zweite wichtige Ziel der Forschung erreicht worden.

Einflussgrössen

Es bestehen weiterhin Einflussgrössen auf das Ergebnis. Insbesondere kann die Vorgesichte des Fillers einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Diese Problematik gilt aber auch für die bestehende Norm. An Probenahme und Prüfdurchführung sind somit genaue Anforderungen zu stellen.

Rückführung auf die Praxis

Für sämtliche untersuchten Prüfungen und für die Volumenänderung nach Norm [10] fehlt eine ausreichende Verbindung zwischen den Prüfergebnissen und dem Verhalten in der Praxis. Damit sind auch die in der Anforderungsnorm an Filler [19] festgelegten Grenzwerte wie auch jene für das neu vorgeschlagene Prüfverfahren noch unzureichend abgesichert.

7. Ausblick

Im Rahmen der europäischen Normierung CEN ist innert nützlicher Frist keine Normprüfung für die Wasserempfindlichkeit von Filler in bituminösen Mischungen zu erwarten. Aus diesem Grund ist der eingeschlagene Weg weiter zu verfolgen.

Nachdem im Forschungsauftrag FA 2/91 „Wasserempfindlichkeit von Fillern; Teil1,“ die gesetzten Ziele erreicht wurden, liegt nun ein neues Prüfverfahren vor. Diese neue Methode liefert nicht nur wesentlich rascher Ergebnisse als die bisher normierte Prüfung (SN 670 845); die Prüfkörperherstellung ist auch wesentlich einfacher.

Die Wiederholbarkeit der Prüfmethode (Vergleich mehrerer Prüfungen im gleichen Labor) ist für verschiedene Grössenordnungen der Volumenzunahme bekannt. Offen bleibt die Bestimmung der Reproduzierbarkeit (Vergleich der Ergebnisse verschiedener Labors). Die Reproduzierbarkeit sollte in einem Ringversuch mit ca. 10 Prüfstellen bestimmt werden.

Obwohl ein klarer Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der neuen und der bisherigen Prüfmethode besteht, sind die Anforderungen an die Wasser-Empfindlichkeit der Filler von Grund auf neu zu überprüfen. Insbesondere sind Anforderungen zu formulieren, welche einen Bezug auf das Praxisverhalten bituminöser Beläge haben.

Das Verhalten von Belägen in praxisnahen Prüfungen soll die Festlegung von Grenzwerten ermöglichen. Im Vordergrund stehen dynamische Druck-Schwell-Versuche und Spurrinnenversuche.

Das Verhalten von bituminösen Mischungen, bei denen als einziger Parameter die Quellbarkeit des verwendeten Fillers variiert wird, soll Rückschlüsse über den Einfluss der Quellbarkeit auf das Verhalten der Beläge in der Praxis ermöglichen.

8. Literatur

- | | | |
|------|--|---|
| [1] | J. P. Junker, J. Weber,
H. W. Fritz | Untersuchung von Steinmehlen zur Erarbeitung
von Prüf- und Qualitätsvorschriften; 1. Teil, For-
schungsauftrag FA 10/68; EDI/VSS; 1973 |
| [2] | J. P. Junker, J. Weber,
H. W. Fritz | Untersuchung von Steinmehlen zur Erarbeitung
von Prüf- und Qualitätsvorschriften; 2. Teil, For-
schungsauftrag FA 6/71; EDI/VSS; 1974 |
| [3] | B. Meier | Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-
Gemischen; Forschungsauftrag 31/77;
EDI/VSS; 1980 |
| [4] | H. W. Fritz, B. Meier | Rheologische Eigenschaften von Filler-Bitu-
men-Gemischen; Schlussbericht; Forschungs-
auftrag 1/81; EDI/VSS; 1981 |
| [5] | A. Bernhard, R. Gubler | Filler für bituminöses Mischgut; Untersuchung
an 10 industriellen Fillern, Überarbeiten von
Prüf- und Qualitätsvorschriften; Forschungs-
auftrag 3/83; EDI/VSS; 1989 |
| [6] | S. Huschek, Ch. Angst | Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-
Gemischen; ISETH-Mitteilung Nr. 44; 1980 |
| [7] | TP Min StB | Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im
Strassenbau TP Min StB; Forschungs-gesell-
schaft für Strassen- und Verkehrswesen |
| [8] | Schulze, Breuer | Einfluss der Kornabstufung und der Gesteinsart
von Gesteinsmehlfüllern auf die Stabilität und
die Verschleissfestigkeit von Asphaltbeton-
Deckschichten; Prüfamts für bituminöse Bau-
stoffe der TU München; Forschungsauftrag
7.207; 1978 |
| [9] | K. Schellenberg | Die Wasserempfindlichkeit von Füller im bitu-
minösen Strassenbau; Strasse und Autobahn
1/1979 |
| [10] | SN 670 845 | Filler für bituminöses Mischgut; Volumen-ände-
rung von Prüfkörpern nach Wasser-lagerung |
| [11] | D. A. Anderson, J. P. Tarris | „Characterization and Specification of Bag-
house Fines“, Proceedings Association of As-
phalt Paving Technologists,
Vol. 52, 1983, pp 61-87 |

- | | | |
|------|-----------------|--|
| [12] | SN 671 110d | Bitumen; Qualitätsvorschriften |
| [13] | SN 671 960 | Bituminöses Mischgut, Prüfvorschriften; Haftvermögen von bituminösen Bindemitteln an Mineralstoffen |
| [14] | SN 670 840 | Filler für bituminöses Mischgut; Hohlraumgehalt nach Ridgen |
| [15] | EN 1097-4 | Tests for mechanical and physical properties of aggregates; part 4: Determination of the voids of dry compacted filler |
| [16] | SN 671 967a | Bituminöses Mischgut; Rohdichte, Berechnen des Hohlraumgehaltes |
| [17] | K. Schellenberg | Untersuchung von Füllereigenschaften; Bitumen 7/1972 |
| [18] | Klaus Schulze | Die Beurteilung der Qualität von Steinmehlen zur Verwendung als Füller in bituminösen Massen für den Strassenbau; Strasse & Autobahn 10/1964 |
| [19] | SN 670 760 | Filler für bituminöses Mischgut; Qualitätsvorschriften |